



## Avaliação conceitual e síntese de ferramentas metodológicas na determinação da sensibilidade à erosão e inundação costeira

*Conceptual assessment and synthesis of methodological tools to determine coastal sensitivity to erosion and flooding*

Giseli Modolo Vieira Machado\*   Jacqueline Albino  

Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

Email: albino.jacqueline@gmail.com

\*E-mail para correspondência: giselimodolo@gmail.com

Recebido (Received): 09/05/2022

Aceito (Accepted): 05/05/2023

**Resumo:** A identificação de seções da costa sensíveis ao aumento do nível do mar é necessária para uma gestão mais eficaz da zona costeira, a fim de aumentar a resiliência e ajudar a reduzir os impactos. Porém, a diversidade de sistemas costeiros e as diferenças regionais de aumento relativo do nível do mar fazem com que a resposta para os fenômenos de erosão e inundação costeira não sejam uniformes no globo. Por isto, a avaliação da sensibilidade costeira assume o ponto de partida para a avaliação da vulnerabilidade. No entanto, desafios metodológicos são decorrentes desta difícil tarefa de compreender e avaliar a dinâmica dos ecossistemas costeiros. Além disso, inconsistências conceituais em torno do termo vulnerabilidade podem gerar incompreensões metodológicas e o emprego distraído de certas variáveis pode comprometer os índices de sensibilidade costeira. Este artigo se propõe a contribuir com uma base conceitual e metodológica destinada aos pesquisadores que irão iniciar na jornada de mapeamento da sensibilidade costeira; apresentando uma síntese das principais ferramentas de avaliação da vulnerabilidade e discutindo o significado das variáveis físicas mais utilizadas para a classificação da sensibilidade costeira. Independente da abordagem metodológica adotada, o pesquisador deve ter ciência das limitações da ferramenta, onde a escolha das variáveis é também uma questão de escala, pois o detalhamento das feições morfológicas e dos processos se faz necessário em escala local.

**Palavras-chave:** Vulnerabilidade; Perigos costeiros; Variáveis físicas.

**Abstract:** Identification of sensitive coastal zone to sea level rise is necessary for more effective coastal zone management to increase resilience and help reduce impacts. However, coastal systems diversity and regional differences in relative sea level rise conduct to not uniform response of coastal erosion and flooding across the globe. For this reason, coastal sensitivity assessment should be the starting point for vulnerability assessment. However, methodological challenges for this assessment arise from this difficult task of evaluating the dynamics of coastal ecosystems. Also, conceptual inconsistencies around the term vulnerability can generate methodological misunderstandings and distracted use of certain variables can compromise coastal sensitivity indices. This paper proposes to contribute with a conceptual and methodological basis for researchers who will start in coastal sensitivity mapping journey; beside present a synthesis of the main vulnerability assessment tools and discuss the meaning of the most used physical variables to classify coastal sensitivity to the risks of coastal erosion and flooding. Regardless of the methodological approach adopted, researchers must be aware of the limitations of the tool and the scale of understanding, where the choice of variables is also a matter of scale, as the detailing of morphological features and processes is necessary at a local scale, ensuring thus further refinement of coastal sensitivity.

**Keywords:** Vulnerability; Coastal hazards; Physical variables.

### 1. Introdução

Sistemas climáticos alterados irão influenciar nas tempestades, na precipitação e no escoamento das bacias costeiras levando, consequentemente, a alteração das taxas de erosão e dos padrões de inundação (JACOB; GORNITZ; ROSENZWEIG, 2007; ROGERS; WOODROFFE, 2016). A elevação do nível do mar

é uma ameaça aos ecossistemas costeiros e aos assentamentos humanos ali presentes (NICHOLLS *et al.*, 2007), uma vez que resultará na ocorrência de processos erosivos em terras cada vez mais internas e em altitudes mais elevadas, além do aumento da amplitude e da extensão das inundações durante as marés altas ou durante outros eventos costeiros (ROGERS; WOODROFFE, 2016).

O aumento do nível do mar se manifesta gradualmente durante períodos de tempo relativamente longos, por isto pode ser considerado como um risco de início lento (BONETTI; WOODROFFE, 2017). Contudo, as variabilidades climáticas, ressacas marinhas e demais alterações meteoceanográficas são responsáveis pelo aumento relativo do nível do mar (ALLAN; KOMAR, 2002; JIMENEZ; VALDEMORO; BOSOM, 2017; EGUCHI; ALBINO, 2021) de menor duração, e pode gerar também o dano no que concerne aos processos erosivos e inundacionais.

A identificação de seções da costa suscetíveis ao aumento do nível do mar é necessária para uma gestão mais eficaz da zona costeira. Segundo Gornitz (1991), os principais processos físicos que afetarão a zona costeira durante um período de aumento acelerado do nível do mar são inundação permanente (*inundation*) ou episódica (*flooding*), aumento da erosão (*erosion*) e intrusão de água salgada (*saltwater intrusion*) em estuários e aquíferos. Assim, planejadores costeiros e formuladores de políticas precisam de uma indicação da vulnerabilidade dos ambientes costeiros aos perigos costeiros (*coastal hazard*), conforme afirmam Klein e Nicholls (1999) e Rogers e Woodroffe (2016).

São muitos os elementos que causam dificuldade na avaliação da vulnerabilidade costeira, seja pela interação dos sistemas físicos e sociais, seja pelo não consenso do significado do termo vulnerabilidade (*vulnerability*), (FÜSSEL, 2005; HINKEL; KLEIN, 2007). Por isso, é difícil a tarefa de compreender, mensurar e avaliar a dinâmica dos ecossistemas costeiros e das populações que neles habitam aos perigos costeiros, pois diferenças na zona costeira referem-se à gama de variabilidade dentro e entre estes sistemas, através das escalas espaciais e temporais, e para uma gama de riscos (*risks*) aos quais as zonas costeiras estão submetidas. Logo, o valor de uma definição de vulnerabilidade é, conseqüentemente, o grau em que se dão novas e úteis percepções sobre a natureza do problema em questão e também sobre a resiliência (*resilience*) dos ambientes e a capacidade adaptativa (*coping capacity*) das comunidades quando sujeitos a uma perturbação (McFADDEN *et al.*, 2007a).

A identificação de uma base de dados físicos é primordial para estabelecer cenários e respostas (MUEHE; NEVES, 2007; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a, 2010b), pois ela consegue alcançar a compreensão das ameaças, da resiliência e dos riscos já que há feições constituídas de sedimentos inconsolidados e mais facilmente susceptíveis à mobilização e transporte e há terras baixas, susceptíveis à transposição das ondas. Por isso, os estudos da vulnerabilidade precisam primeiramente analisar a ocorrência e o alcance de seus efeitos numa área específica, antes que os impactos sócio-econômicos possam ser avaliados (KLEIN; NICHOLS, 1999). Assim, a avaliação da sensibilidade da costa deve ser o ponto de partida, pois é certo que a resposta erosiva e inundacional não será uniforme ao redor do globo, uma vez que ela depende primeiramente da geomorfologia da linha de costa e dos processos atuando sobre ela, como a taxa local/regional de aumento relativo do nível do mar (McFADDEN *et al.*, 2007b).

Inconsistências conceituais também são recorrentes em torno de termos que cercam a avaliação da vulnerabilidade, reflexo talvez, da própria tradução das palavras para o português. Os conceitos de risco (*risk*) e perigo (*hazard*), por exemplo, são usados com considerável liberdade na literatura, pois não há uma palavra correspondente em português que exprima o verdadeiro significado da palavra *hazard*, até mesmo dentro da língua inglesa, onde os dois termos são frequentemente apresentados como sinônimos (MARANDOLA; HOGAN, 2004). Com a perspectiva de subida do nível médio do mar, torna-se cada vez mais necessário e útil distinguir também inundação costeira (*coastal flooding*) de inundação (*inundation*), pois um número crescente de avaliações da vulnerabilidade costeira deixa claro que o uso confuso é abundante (FLINCK; CHADWICK, 2012). Por exemplo, Lins-de-Barros e Muehe (2010), apesar de abordarem o conceito de *flooding* para a avaliação da vulnerabilidade costeira da Região dos Lagos (RJ) ocasionada por transposição de ondas, se apropriam dos termos inundação e alagamento traduzidos como *inundation*.

A diversidade de conceitualizações e a imprecisão levaram à diversidade de abordagens metodológicas na avaliação da vulnerabilidade, além disto, as metodologias cresceram em complexidade, pois são considerados vários estímulos, o que permitem uma análise dinâmica em vez de estática (HINKEL; KLEIN, 2007). Assim sendo, desafios e críticas são comumente relatados aos métodos de avaliação da vulnerabilidade costeira devido: a) à falta de uniformização metodológica; b) à difícil comparação entre os diferentes modelos empregados; c) à falta de uma classificação (*ranking*) das variáveis e seus respectivos pesos para diferentes escalas de abordagem e d) ao problema de comparação entre áreas (geograficamente)

distintas, que só é possível quando a metodologia é bastante consistente e/ou adequada para grandes escalas geográficas (BONETTI; WOODROFFE, 2017).

Nesta perspectiva, muitas publicações têm focado na aplicação de diversas ferramentas de avaliação da vulnerabilidade da zona costeira (ABUODHA; WOODROFFE, 2006; HARVEY; WOODROFFE, 2008; ABUODHA; WOODROFFE, 2010b; BONETTI; WOODROFFE, 2017). Algumas utilizam apenas a classificação de sensibilidade a partir das características físicas do sistema costeiro (GORNITZ, 1991; BUSH *et al.*, 1999; HARVEY *et al.*, 1999; PENDLETON; THIELER; WILLIAMS, 2008; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a; SOUZA; NICOLODI, 2016; ROGERS; WOODROFFE, 2016; SILVEIRA; BONETTI, 2019). Outras se apropriam também de parâmetros humanos para avaliar a vulnerabilidade (SZLAFSZTEIN, 2005; OZYURT; ERGIN, 2010; LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010; NICOLODI; PETERMANN, 2010; BALICA *et al.*, 2012; SERAFIN; BONETTI, 2017; NGUYEN *et al.*, 2016; ISGTIAQUE *et al.*, 2019). E tem ainda aquelas que se apropriam do termo sensibilidade apesar de incorporarem informações a cerca dos recursos/atividades socioeconômicas que são suscetíveis aos derramamentos de óleo, por exemplo, como é o caso das Cartas SAO (Carta de Sensibilidade Ambiental ao Óleo), segundo colocado por Martins *et al.* (2013).

De modo geral, em todo processo do mapeamento da vulnerabilidade costeira, os conceitos como risco, perigo, sensibilidade, suscetibilidade, exposição, resiliência e capacidade adaptativa estão conectados. Desta forma, este artigo visa contribuir para a orientação de pesquisadores brasileiros que irão iniciar na jornada de mapeamento da sensibilidade costeira, ancorada em uma síntese dos principais conceitos e das forças envolvidas baseada numa rebuscada revisão bibliográfica, com a proposta de apresentar as principais ferramentas de avaliação da sensibilidade costeira; e discutir sobre a importância, as limitações e o significado das variáveis físicas mais frequentemente utilizadas para a classificação da sensibilidade da costa aos riscos de erosão e inundação costeiras. Com esta proposta, o artigo foi subdividido em: esclarecimentos conceituais e definições das terminologias; ferramentas de avaliação da vulnerabilidade e; variáveis utilizadas no mapeamento da sensibilidade costeira.

## 2. Esclarecimento conceitual e definição das terminologias

O termo inundação já havia sido esclarecido por Barth e Titus (1984 *apud* MARFAI; KING, 2008), em que inundação (*inundation*) se refere ao deslocamento de pântanos e planícies e (*flooding*) ao aumento dos alagamentos por tempestades costeiras. Nota-se o caráter permanente para o primeiro caso e temporário para o segundo ambos em situação de subida do nível do mar. De acordo com Flinck e Chadwick (2012), *flooding* ocorre quando as áreas secas ficam molhadas temporariamente (periodicamente ou episodicamente) pelos rios, ondas de tempestades, furacões e inundações das marés. Por esta definição, a maré causa enchente periódica das terras entre-marés, mas nunca causa inundação. Já o termo *inundation* se refere à submersão permanente, ou seja, quando ocorre a elevação das águas em relação à terra, acima da altura média anual das médias mais baixas das duas marés baixas diárias. Neste processo, terras secas tornando-se permanentemente afogadas ou submersas.

Considerando que o fenômeno da maré é cíclico e pode ser causa importante dos processos inundacionais na zona litorânea, é válido consideraras oscilações diárias da maré como fator potencializador de *flooding*. Neste contexto, será adotado aqui o termo *inundação litorânea* ou *inundação costeira* para se referir aos fenômenos provocados por condicionantes oceanográficos adversos, incluindo também as marés meteorológicas e astronômicas, resultantes ou não de efeitos das mudanças climáticas e aumento relativo do nível do mar, propriamente dito. Assim, a essência do significado do termo *flooding* é preservada, além de remeter de forma mais objetiva a todos os fenômenos inundacionais em que áreas secas localizadas na zona costeira ficam temporariamente molhadas em decorrência de eventos oceanográficos extremos, mais intensificados e frequentes, conseqüente ou não de alterações climáticas e do nível do mar.

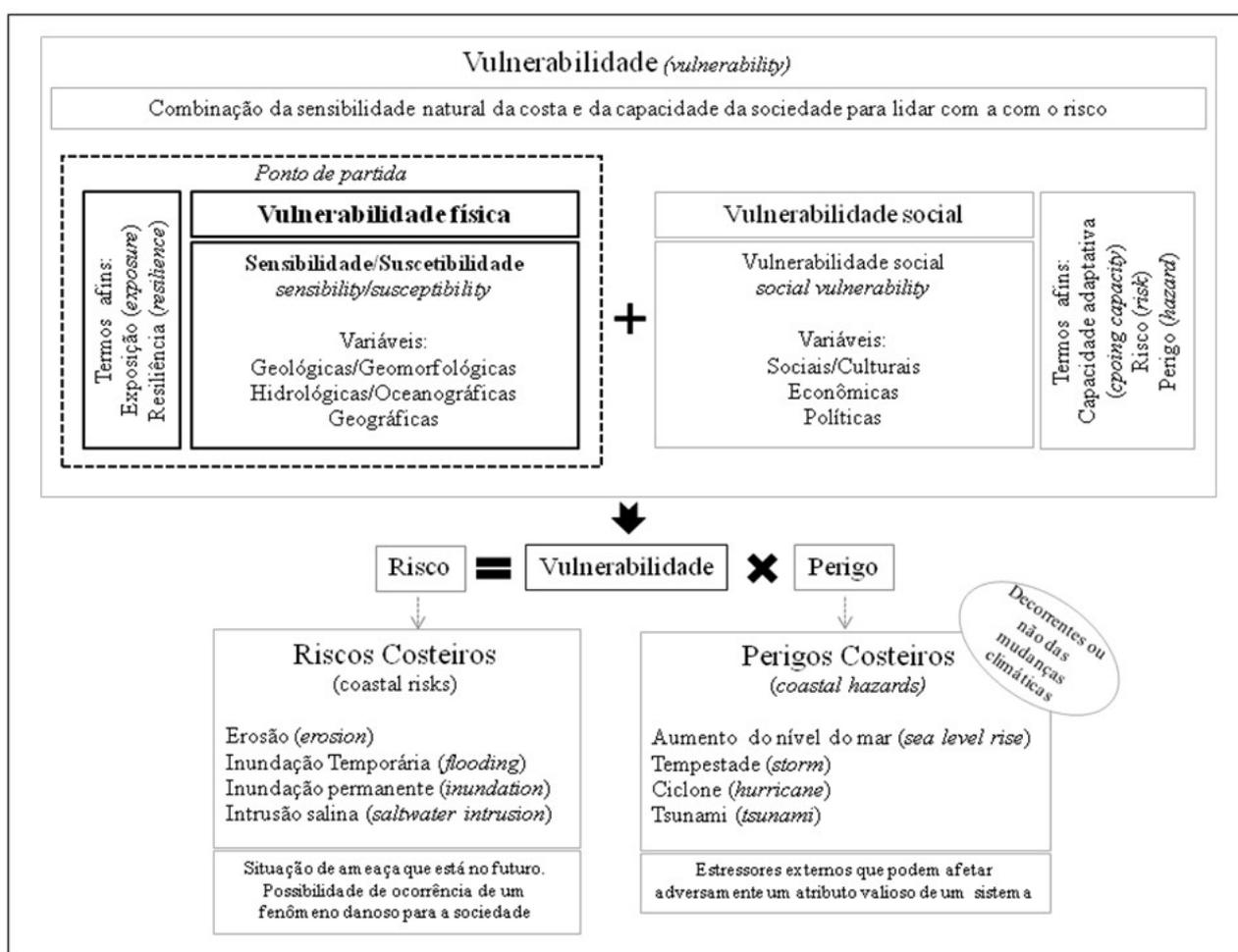
### 2.1. Riscos x Perigo

Erosão costeira, inundações temporárias ou permanentes e intrusão salina em corpos hídricos interiores são riscos costeiros considerados por diferentes simulações e modelagens afim de prever os efeitos de uma possível subida do nível do mar (LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010). Todos estes fenômenos são eventos, não raro serem extremos, que rompem um ciclo ou um ritmo de ocorrência dos fenômenos naturais, sejam estes geológicos, atmosféricos ou na interface destes. Contudo, não serão todos os fenômenos que serão

considerados perigosos, mas apenas aqueles que estão ocorrendo em áreas ocupadas pelo homem, gerando danos, perdas e colocando em perigo estas populações (WHITE, 1974b *apud* MARANDOLA; HOGAN, 2004). É por isso que, um perigo não é natural em si, mas trata-se de um evento que ocorre na interface sociedade-natureza.

O termo risco é utilizado pelos geógrafos como uma situação que está no futuro e que traz a incerteza e a insegurança, onde "estar em risco" é estar suscetível à ocorrência de um perigo (MARANDOLA; HOGAN, 2004). Em outras palavras, risco é a probabilidade de ocorrência de uma ameaça independente de ser quantificável ou não, e perigo se refere como um evento danoso (SMITH, 1992). Assim, o perigo é o estressor externo (ou conjunto de estressores), compreendido como alguma influência externa que pode afetar adversamente um atributo valioso de um sistema (FÜSSEL, 2005).

De maneira didática, o risco (R) é a relação entre a vulnerabilidade (V) e o perigo (P), pressupondo sempre a perda (PIMENTEL; SANTOS, 2018), ou seja, quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco (**Figura 1**). Assim, o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) define risco como a relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade.



**Figura 1:** Síntese conceitual e de termos utilizados na avaliação da vulnerabilidade costeira, destacando a avaliação da sensibilidade da costa como ponto de partida.

Perigos costeiros (*coastal hazards*), como aumento relativo do nível do mar, tempestades, ciclones e tsunamis, são eventos que podem gerar graus diferentes de risco de inundação e de erosão na zona costeira, em função, primeiramente, de quão sensível e suscetível a costa é ou está aos eventos e também, de quão hábil é a sociedade para enfrentar a situação adversa. Assim, independente da abordagem de vulnerabilidade adotada (física, social ou ambas), o objetivo sempre é avaliar o risco, ou seja, o dano à sociedade, sendo a abordagem integrada entre o físico e social a mais adequada para o termo vulnerabilidade, propriamente dito.

## 2.2. Vulnerabilidade e Sensibilidade/Suscetibilidade

Qualquer definição útil de vulnerabilidade implica na adoção de um determinado curso de ação em alguma escolha específica (McFADDEN *et al.*, 2007a), ou seja, não existe uma conceituação "correta" ou "melhor" única de vulnerabilidade, pois a diversidade de conceituações é vista principalmente como uma consequência do termo ser usado em diferentes contextos de política, referindo-se a diferentes sistemas sendo expostos para perigos diferentes (Füssel, 2005). Neste contexto, a vulnerabilidade deve ser usada como "um conceito flexível e adaptável", pois nenhuma definição ótima serviria para todos contextos de avaliação (NGUYEN *et al.*, 2016).

Contudo, uma definição bastante utilizada na literatura é a do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que define a vulnerabilidade como sendo a capacidade de uma nação para lidar com as consequências de uma subida do nível do mar e outros impactos costeiros da mudança climática global, incluindo impactos físicos, socioeconômicos e ecológicos (IPCC, 1991; SZLAFSTEIN, 2005). Em outras palavras, é a combinação da sensibilidade física, e da capacidade da sociedade para lidar com a sensibilidade e com o risco (HARVERY;e WOODROFFE, 2008).

Nas Geociências, existem três conceitos principais para guiar a avaliação da vulnerabilidade e que merecem ser esclarecidos (CUTTER, 1996): vulnerabilidade física (sensibilidade e suscetibilidade); vulnerabilidade social (avalia o quanto preparada a sociedade ou os indivíduos são ao lidar ou adaptar com um perigo; e vulnerabilidade social e física ou simplesmente, vulnerabilidade (relacionada à suscetibilidade e sensibilidade de um ambiente à um perigo particular que resulta de um contexto social).

Os conceitos de sensibilidade (*sensitivity*) e suscetibilidade (*susceptibility*) são derivados das condições ambientais, ou seja, consideram apenas os aspectos físicos da costa (CUTTER, 1996; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a; NGUYEN *et al.*, 2016; BONETTI; WOODROFFE, 2017) e representam o potencial físico (geomórfico) de resposta aos fenômenos naturais ocorridos na zona costeira (HARVERY; WOODROFFE, 2008). Para Woodroffe (2007) e Abuodha e Woodroffe (2010b), a suscetibilidade pode ser mais claramente compreendida como sendo a exposição, ou potencial do sistema para ser afetado por perigos e a sensibilidade é a sua capacidade natural de lidar com tal problema, ou seja, sua capacidade de resposta. Assim, a exposição (*exposure*) que é determinada por fatores biofísicos externos, como fortes tempestades severas e mudança do nível do mar, enquanto, a sensibilidade estaria relacionada a elementos internos do sistema, como topografia ou características ambientais (FÜSSEL, 2005). Mas de uma maneira geral, a exposição refere-se à presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, infra-estruturas ou recursos econômicos /sociais ou culturais ativos em locais que poderiam ser afetados negativamente (NGUYEN *et al.*, 2016).

Num contexto um pouco diferente, nas ainda na zona costeira e marinha, as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO) se apropriam do termo vulnerabilidade em detrimento da palavra sensibilidade, pois ambos termos são tratados como sinônimos nesses trabalhos (Martins *et al.*, 2013), mesmo sendo a segunda, de acordo com Romero (2009), conceitualmente complementar a primeira, uma vez que a conceituação de vulnerabilidade é de fato completa quando se compreende também a suscetibilidade. Nesta abordagem, a sensibilidade é entendida como o grau no qual o ambiente responde ao estresse (o óleo) e a suscetibilidade é a probabilidade ou tendência de um ambiente se atingido pelo óleo (ZACHARIAS; GREGR, 2005). Por fim, a vulnerabilidade é resultante da totalização entre a sensibilidade e a probabilidade (suscetibilidade) do ambiente se atingido por episódios de derramamento de óleo (ROMERO, 2009). Assim sendo, a exposição e a sensibilidade podem determinar um impacto potencial, que pode ser melhorado pelos aspectos de capacidade adaptativa/resiliência Nguyen *et al.* (2016).

## 2.3. Resiliência e Capacidade adaptativa

Os termos resiliência (*resilience*) e capacidade adaptativa (*coping capacity*) ou de enfrentamento são conceitos fortemente relacionados (BONETTI; WOODROFFE, 2017), pois o princípio básico que sustenta ambos é essencialmente o mesmo e reflete a resposta dinâmica (gerenciada ou não) do sistema quando sujeito a uma perturbação (McFADDEN, 2007). Em outras palavras, a resiliência reflete a capacidade de um ecossistema de retornar a um estado de referência após perturbação, ou manter certas estruturas e funções, apesar do aumento da força sobre o ecossistema (HOLLING, 1973; TURNER *et al.*, 2003 *apud* cFADDEN, 2007). De acordo com Orford, Pethick e McFadden (2007), a resiliência reflete o domínio do feedback negativo em resposta na costa ao ser forçada e, por portanto, aumentar a resiliência é a forma mais provável de efetuar mudanças na vulnerabilidade, ou seja, o aumento da vulnerabilidade física reflete processos que

umentam a tendência para o sistema costeiro mover-se na direção da mudança, enquanto a diminuição da vulnerabilidade física é ocasionada pela dominância de mecanismos de feedback negativo que resistem à mudança, então podemos ver a vulnerabilidade física como o equilíbrio entre suscetibilidade e resiliência. Assim sendo, o conceito de resiliência é mais frequentemente associado aos aspectos físicos do ambiente costeiro, ou seja, aos estudos ecológicos ou geomórficos, embora isso é também frequentemente associado à resposta social, cultural ou institucional (McFADDEN *et al.*, 2007a; McFADDEN, 2007).

A capacidade adaptativa por sua vez está relacionada à existência de uma maior habilidade de uma comunidade em enfrentar, resistir e se recuperar após ter sido afetada por um evento extremo, identificada através de fatores sociais e econômicos (UNISDR, 2009). Assim, a capacidade adaptativa é frequentemente citada no contexto dos sistemas humanos, como um conceito de base social que descreve a gestão ativa dos sistemas costeiros (McFADDEN *et al.*, 2007a).

Resumidamente, os conceitos como sensibilidade, suscetibilidade e exposição estão alinhados aos aspectos naturais e conseqüentemente à avaliação da vulnerabilidade física, enquanto, a capacidade adaptativa, o risco e o perigo estão mais alinhados aos aspectos humanos como fatores sócio-econômicos e políticos, e por isto, devem se apoiar no conceito de vulnerabilidade social ou simplesmente vulnerabilidade quando incluído também os aspectos físicos. Já o termo resiliência pode ser abordado em ambos os aspectos da vulnerabilidade, apesar de ser mais usualmente associado à avaliação do quadro natural (**Figura 1**).

### 3. Ferramentas de avaliação da vulnerabilidade costeira

Publicações internacionais como Abuodha e Woodroffe (2010b), Nguyen *et al.* (2016) e Bonetti e Woodroffe (2017) sintetizaram e avaliaram algumas das principais técnicas empregadas na avaliação de vulnerabilidade costeira para efeitos da mudança climática. Bonetti e Woodroffe (2017) agruparam as metodologias de acordo com a escala espacial onde as análises são mais eficientes: (1) larga escala, geralmente com base em imagem *raster* ou polígono e conjuntos de dados predefinidos operados principalmente em uma escala global; (2) multi-escala, usando procedimentos de segmentação da linha de costa; e (3) escala local, para a qual a entrada básica é o dado de pontos obtidos de documentos disponíveis de censos como o IBGE em nível de comunidade ou pesquisas de campo.

Avaliações de vulnerabilidade em larga escala podem ser úteis como uma ferramenta para identificar trechos da costa que requerem uma análise mais aprofundada, porém, muitas incertezas cercam as relações entre os sistemas físicos e humanos, ligações de feedback entre os dois ambientes e problemas de escala (no espaço e no tempo), (McFADDEN, 2007). A Metodologia Comum (MC), proposta pelo IPCC (1992), é um desse exemplos. Ela foi desenvolvida para auxiliar na estimativa dos impactos resultantes do aumento do nível do mar, sendo a avaliação da vulnerabilidade costeira uma de suas etapas metodológicas. A MC compreende sete etapas analíticas consecutivas que permitem a identificação de populações e recursos em risco, custo e viabilidade de possíveis respostas a impactos adversos (KLEIN; NICHOLLS, 1999). Esta metodologia foi concebida para servir como avaliações preparatórias, identificando regiões e setores prioritários, além de fornecer uma avaliação inicial da viabilidade e os efeitos de medidas de proteção costeira (HINKEL; KLEIN, 2007). O alto grau de simplificação e generalização da MC favorecem a aplicação para escalas maiores e inibe a aplicabilidade para as escalas local ou regional (ABUODHA; WOODROFFE, 2010b).

Várias publicações apontam críticas à MC ao considerarem inadequada para certas situações como: (1) inaplicabilidade de avaliação em economias de subsistência e tradicionais; (2) inadequada como ferramenta para gestores costeiros formularem políticas de avaliação de impactos decorrentes do aumento do nível do mar; (3) carência de cenários futuros regionais, o que direciona muitos estudos para o cenário global de 1m de elevação do nível do mar para 2100; (4) metodologia pouco efetiva quando inclui a avaliação de vários elementos em diferentes localidades onde existam diversidade tecnológica, econômica, cultural e política; e (5) muita ênfase colocada nos impactos baseados no mercado (WOODROFFE; MCLAREN, 1992 *apud* HARVEY; WOODROFFE, 2008; KAY *et al.*, 1996; KLEIN; NICHOLLS, 1999; HARVEY; WOODROFFE, 2008; BOENTTI; WOODROFFE, 2017). Estas limitações incentivaram o surgimento de outras abordagens metodológicas de análise da vulnerabilidade costeira, principalmente em países onde a variedade de ambientes costeiros é muito grande, como é o caso da Austrália (HARVEY; WOODROFFE, 2008).

Modelos computacionais globais, apesar de serem flexíveis para lidar com diferentes resoluções de dados, apresentam melhores resultados a partir de escala regional para global (BOENTTI; WOODROFFE, 2017). A ferramenta DIVA (*Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment*), por exemplo, consiste em um banco

de dados costeiro global, um modelo e um conjunto de cenários que permite que seus usuários simulem os efeitos do clima e mudança socioeconômica e de adaptação nos sistemas costeiros naturais e humanos em escalas nacionais, regionais e globais (HINKEL; KLEIN, 2007). Segundo os autores, o modelo é bem definido e documentado automaticamente, propondo ações de adaptação como: não fazer nada, construir diques, nutrir as praias e as zonas úmidas ou afastar-se. Porém o modelo DIVA não produz um indicador escalar de vulnerabilidade.

No limiar entre as escalas global e nacional, tem-se a metodologia proposta pelo COI (*Intergovernmental Oceanographic Commission*), aplicada em nível de União (nacional e/ou regional) que estabelece cinco etapas necessárias de adaptação às mudanças climáticas: 1) identificar e quantificar os perigos; 2) medir a vulnerabilidade; 3) avaliar o risco; 4) aumentar a conscientização e preparação; e 5) mitigar o risco. No Brasil, os esforços para construir uma estrutura técnica e institucional capaz de resistir aos efeitos das mudanças climáticas se intensificaram após o Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha (MDZCM), instrumento previsto na Lei 7.661/88, que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro. Esta metodologia combina uma ampla gama de informações com o objetivo estratégico de identificar trechos da costa brasileira com potencial de inundação, potencial de risco social e potencial de risco tecnológico. Focados nas duas primeiras etapas da metodologia proposta pelo COI, Nicolodi e Petermann (2010) se apropriaram do MDZCM desenvolvido por Nicolodi e Zamboni (2008) e de informações espaciais sobre a dinâmica da população, geomorfologia, uso e ocupação da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e biodiversidade em programas de geoprocessamento (IDRISI e ARCGIS) para identificar as regiões da zona costeira brasileira mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas e, assim, fornecer apoio para uma avaliação completa da vulnerabilidade do país.

Já as metodologias baseadas na segmentação de linha de costa tendem a ser flexíveis em termos de representatividade da escala, uma vez que a auto-similaridade estatística das linhas costeiras (geometria) permite sua representação precisa através de extensões diferentes (BONETTI; WOODROFFE, 2017), e ainda são mais aplicadas, já que há a opção de exclusão de fatores sócio-econômicos. As técnicas que se destacam quanto à maior aplicabilidade, facilidade operacional e bons resultados são: o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), (*Coastal Vulnerability Index, CVI*), originalmente apresentado por Gornitz (1991); o Mapeamento de Estabilidade Geomórfica (*Coastal Stability Mapping, GSM*), desenvolvido por Sharples (2006) e posteriormente denominado de 'Smartline' por Sharples, Mount e Pedersen (2009) e alguns modelos computacionais como DIVAS, que podem avaliar também um segmento predefinido da costa focado nas unidades administrativas (BONETTI; WOODROFFE, 2017).

A alternativa metodológica mais comumente empregada em todo mundo é o IVC (SZLAFSZTEIN, 2005; ABUODHA; WOODROFFE, 2007, PENDLETON; THIELER; WILLIAMS, 2008; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a; OZYURT; ERIGIN, 2010; BALICA *et al.*, 2012; NGUYEN *et al.*, 2016; SERAFIM; BONETTI, 2017). O IVC fornece um indicador de primeira ordem da vulnerabilidade relativa da costa e tem a grande vantagem de ser aplicável em múltiplas escalas, contudo, seus dados não podem ser comparados a outros lugares geograficamente distintos, pois as classes definidas devem ser ajustadas a cada local para se aplicar a metodologia (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a).

A determinação do IVC é representada pela raiz quadrada do produto das variáveis classificadas dividido pelo número total de variáveis. O índice original integra informações de 7 variáveis qualitativas e quantitativas em diferentes escalas e unidades como, relevo (elevação), tipo de rocha, forma do relevo costeiro, mudanças relativas do nível do mar, mudanças da linha de costa, amplitude da maré e altura das ondas. Cada variável possui uma classificação de 1 a 5, de muito baixa a muito alta vulnerabilidade. Uma grande vantagem desta metodologia é a incorporação de novos dados (novas variáveis) quando necessário, uma vez que os dados podem ser inseridos dentro de um SIG e visualizados em formatos vetoriais e/ou *raster*, o que permite também outras eventuais integrações com os dados climáticos e socioeconômicos. Este atributo de alta flexibilidade, comumente conduziram a modificações parciais da técnica original, o que explica sua ampla facilidade de aplicação.

Gornitz (1991) aponta algumas limitações do IVC como a não inclusão de variáveis do tipo tempestades (frequência e intensidade), transporte de sedimentos e densidade populacional. Rogers e Woodroffe (2016) reconhecem que o IVC é uma ferramenta muito útil para caracterizar a vulnerabilidade de feições costeiras uni-derecionais, como a linha de costa, mas não captura a variabilidade dos processos costeiros que afetam regiões mais complexas, como os estuários. No entanto, o IVC foi bastante inspirador para o refinamento da avaliação da vulnerabilidade física e surgimento do Índice de Sensibilidade Costeira, ISC (*Coastal Sensitivity Index, CSI*) proposto por Abuodha e Woodroffe (2010a). Nesta adaptação, os autores adotam a escala regional e agrupam variáveis semi-quantificáveis em variáveis estruturais e variáveis de processo. Os resultados são derivados da integração das variáveis num modelo de células de grade de imagem raster, onde

cada célula armazena e retrata os dados de cada uma das variáveis em uma tabela de atributos (formato vetorial no ArcGIS).

O Mapeamento Geomórfico Costeiro propõe uma abordagem pragmática visando o mapeamento indicativo pretendido como o primeiro estágio em uma sequência hierárquica de avaliações, que identifica os tipos de relevo costeiro que são potencialmente sensíveis ao aumento do nível do mar (Bonetti e Woodroffe, 2017). O termo *Smartline* refere-se a um método de captura de dados espaciais, em ambiente GIS, onde cada segmento vetorizado está relacionado a vários campos de atributos. Cada segmento identificado recebe uma classificação quanto à sensibilidade resultante da integração de vários atributos físicos selecionados e podem ser divididos em linhas curtas ou longas dependendo do nível de detalhamento que se pretende ter (Sharples, 2006). As variáveis são classificadas de acordo com sua maior ou menor influência na ocorrência dos processos de erosão e inundação. Os atributos também são categorizados em 1ª, 2ª e 3ª ordem, partindo das características mais abrangentes como a geologia e geomorfologia para os mais específicos, como a declividade da face da praia e tamanho do grão da praia (SILVEIRA; BONETTI, 2019).

As maiores vantagens do *Smartline* são a abrangência e a visibilidade, ou seja, a técnica permite prontamente o mapeamento de todos os tipos de formas de relevo costeiro e a distribuição das linhas pode ser facilmente visualizada com zoom em escalas diversas (SHARPLES; MOUNT; PEDERSEN, 2009). No entanto, a metodologia baseada em dado vetorial em linha é capaz de indicar apenas segmentos costeiros potencialmente propensos a inundação sem identificar quais áreas podem ser de fato afetadas pelas inundações (SILVEIRA; BONETTI, 2019). O conjunto de dados obtidos a partir de uma gama de diferentes fontes em diferentes áreas pode gerar inevitavelmente algumas imprecisões para algumas partes da costa, onde a verificação do solo não ocorreu (SHARPLES, 2006).

A abordagem metodológica focada na escala local que pode lidar também com questões sócio-econômicas e permite a criação de mapas de vulnerabilidade combinados é a ideia por trás dos geoindicadores (BONETTI; WOODROFFE, 2017). O termo geoindicador foi primeiramente usado por Berger e Iams (1996) e depois muito bem difundido por Bush et al. (1999). No Brasil, o termo nem sempre foi empregado, mas o conceito está implicitamente presente em muitos estudos que avaliam as influências dos processos geológicos no homem e vice-versa em diversos ambientes (COLTRINARI, 2001; ZUQUETTE; PEJON; COLLARES, 2004; SOUZA; NICOLODI, 2016; SILVEIRA; BONETTI, 2019).

Os geoindicadores derivam de características intrínsecas e naturais de um ambiente e implicam em resposta sensível às mudanças ambientais (SOUZA; NICOLODI, 2016). Eles são apresentados como índices ambientais (RUDORFF; BONETTI, 2010), ou seja, medidas de magnitudes, frequências, taxas e tendências de processos ou fenômenos geológicos que ocorrem em períodos curtos de 100 anos ou menos, na superfície da Terra ou perto dela, incluindo desde fenômenos rápidos (catastróficos) a fenômenos lentos, mas que geralmente são evidentes dentro de uma vida humana (BERGER, 1998). Por exemplo, vegetação, taxa de erosão, características da praia (largura, declive, espessura), configuração das dunas, transposição de ondas (*overwash*), estruturas de engenharia, drenagem do solo, presença de estuários, lagunas e áreas úmidas (*wetlands*), etc. (BUSH et al., 1999).

Por meio de geoindicadores, as variáveis selecionadas são identificadas em campo, classificadas em níveis de risco e tabuladas, resultando em um índice que expressa a sensibilidade natural local, o que facilita a atualização permanente das variáveis por meio de monitoramento de longo prazo e vigilância regular por instituições locais (BUSH et al., 1999; BONETTI; WOODROFFE, 2017). Tal ferramenta pode ter aplicação imediata e de mais longo alcance do que métodos sofisticados que dependem de instrumentação e bancos de dados de qualidade de longo prazo (BUSH et al., 1999). Apesar da facilidade de se trabalhar com geoindicadores, é importante verificar alguns os critérios que possibilitam a aquisição e processamento dos dados como: disponibilidade dos dados, custo, credibilidade e compreensibilidade (SOUZA; NICOLODI, 2016).

As abordagens metodológicas apresentadas aqui se apropriam também das diversas análises espaciais disponíveis nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG/*Geographic Information Systems, GIS*), onde os Modelos de Elevação Digital do terreno (MDE/*Digital Elevation Models, DEM*) e as imagens de satélite são ferramentas quase que indispensáveis na avaliação da sensibilidade costeira.

É importante ter ciência, que a zona costeira não é homogênea e as técnicas precisam focar na variabilidade geográfica da linha de costa, onde seja preferível o uso de variáveis físicas e humanas, assim como uma definição e quantificação da vulnerabilidade em diferentes partes da costa (ABUODHA; WOODROFFE, 2010b) para efeito de diagnóstico e quem sabe, comparação. Para tanto, não há um modelo ou metodologia melhor para a avaliação da sensibilidade costeira. A escolha depende do objetivo, da escala e da variabilidade e aplicação dos dados (BONETTI; WOODROFFE, 2017). Conforme questionado por

Hinkel e Klein (2007), pode uma metodologia para avaliar a vulnerabilidade ser específica o suficiente para considerar as circunstâncias únicas de um determinado sistema, sendo genérica o suficiente para garantir que a vulnerabilidade deste sistema possa ser comparada com a de outros sistemas, possivelmente avaliada usando diferentes metodologias?

#### 4. As variáveis utilizadas no mapeamento da sensibilidade

A escolha e a definição das variáveis que interferem na sensibilidade da costa devem ser realizadas com base numa pesquisa bibliográfica minuciosa e focada no fenômeno natural e no risco costeiro que se pretende avaliar. A qualidade e a aplicabilidade das variáveis dependem da precisão da informação sintetizada, e estas devem atender alguns questionamentos (SOUZA; NICOLODI, 2016): (1) a variável é relevante para usos potenciais (gerenciamento, visitantes e comunidades locais)? (2) a variável é representativa para compreender o fenômeno? (3) a variável é sensível o suficiente para detectar as mudanças no ambiente e promover informações em relação às tendências ou aos impactos? e (4) a variável tem limites bem definidos que permitem aos usuários avaliar os valores observados?

Grande parte dos trabalhos incluem a erosão quando se trata de sensibilidade costeira, mas nem por isto todas as variáveis e critérios de classificação se aplicarão adequadamente para o caso específico da inundação costeira. Dentre as variáveis consideradas na avaliação do potencial de risco de inundação tem o sistema fluvial, a elevação/altitude, as áreas de depressão, as áreas impermeáveis, as lagoas de retenção e a precipitação (CHEN *et al.*, 2016). Já Lins-de-Barros e Muehe (2010) acham importante considerar o estado morfodinâmico praiar, o grau de exposição às ondas, a altitude do cordão/escarpa ou duna frontal e o relevo no pós-praia ao avaliar a inundação por transposição de ondas. No caso da erosão, Muehe (2005) menciona a amplitude da maré de sizígia e o clima de ondas como os principais indutores dos processos costeiros, os quais incluem condições de ondas de tempo bom e de tempestade, a frequência e alternância entre ambos e o padrão geral do transporte litorâneo de sedimentos, uma vez que estes exercem importante efeito erosivo.

A **Tabela 1** sintetiza as principais variáveis físicas utilizadas na literatura para o mapeamento da sensibilidade da costa aos fenômenos de erosão e inundação costeira intensificados pela subida relativa do nível do mar. Eventualmente outras variáveis são usadas também, dentre elas, a salinidade (GRATTAN *et al.*, 2002; HOANG; HUYNH; NGUYEN, 2012), a drenagem do solo (BUSH *et al.*, 1999), a vegetação (BUSH *et al.*, 1999; FINLAYSON *et al.*, 2002), o número de ciclones ocorridos nos últimos 10 anos (BALICA *et al.*, 2012) e até mesmo variáveis físicas artificiais como o tipo de infra-estrutura na costa (BUSH *et al.*, 1999; ZANETTI; SOUSA; HOSOKAWA 2019). É importante salientar que a variável deve ser ajustada à área de estudo, então em regiões onde não tem registros de ciclones, esta informação passa a ser inapropriada e os registros de tempestades e marés meteorológicas passam a ser os mais adequados ou, em litorais de geologia uniforme ou com baixa variabilidade, a variável geologia pode ser excluída e outras mais relevantes incluídas, como a largura da praia (SERAFIM; BONETTI, 2017).

As variáveis foram divididas em três grupos: 1) variáveis geológicas e geomorfológicas, que abordam aspectos relacionados à resistência geológica e à forma do relevo em diferentes escalas de detalhe; 2) variáveis geográficas, que abordam questões de localização e orientação; 3) variáveis de processos físicos, que abordam os processos hidrológicos e oceanográficos atuantes nas alterações morfológicas da costa. As variáveis da **Tabela 1** podem apresentar denominações ou concepções um pouco diferentes das encontradas em algumas referências, além de união ou fragmentação entre duas ou mais variáveis. Além disso, uma variável pode ser idealizada de forma diferente dependendo do objetivo a ser alcançado, do significado dado ao atributo, do fenômeno abordado e também do autor de referência adotado. Um exemplo clássico é a adoção da "altura média das ondas", "média das alturas máximas das ondas" ou ainda "altura máxima das ondas". Neste caso, a opção adequada deve envolver uma base conceitual-teórica apropriada para justificar a escolha com base no que se pretende obter de resposta.

O mais importante na seleção das variáveis é saber o significado e a importância que cada uma delas representa dentro da problemática levantada, incluindo suas limitações e a escala de detalhe considerada. Avaliações de maior detalhe refletem no refinamento das feições geomorfológicas e geográficas e dos processos atuantes no ambiente, que conseqüentemente, conduz para o desmembramento de algumas variáveis. Por isto, há na literatura uma aparente superposição entre as informações (atributos) de certas variáveis. Na verdade, isso não é um problema metodológico ou de classificação e sim uma questão de escala. Por exemplo, a variável geologia-geomorfologia se tornar mais apurada ao incluir variáveis que trazem informações mais precisas da forma do relevo da costa, incluindo neste caso, informações como estado morfodinâmico praiar e/ou tipo e condições das barreiras arenosas (escala de maior detalhe).

Secundariamente, mas não menos importante, deve-se saber sobre a disponibilidade e acessibilidade dos dados que irão compor os atributos de cada variável.

**Tabela 1:** Proposta de classificação das principais variáveis físicas utilizadas na literatura para a avaliação e mapeamento da sensibilidade costeira aos fenômenos de erosão e inundação costeira.

Tipos	Variáveis físicas
Aspectos geológicos e geomorfológicos	Relevo/altitude (m)
	Declividade da costa (graus)
	Geologia e geomorfologia
	Morfologia e estado morfodinâmico praial Tipo e condições das barreiras arenosas
Aspectos Geográficos	Proximidade da costa e do rio (m)
	Grau de exposição às ondas (graus)
Processos físicos	Vazão do rio (m <sup>3</sup> /s)
	Profundidade do lençol freático (m)
	Taxa de mudança da linha de costa (m/ano)
	Taxa de subida do nível do mar (mm/ano)
	Altura das ondas (m)
	Amplitude da maré (m)

#### 4.1. Relevo/altitude (m)

A elevação do terreno, representada pelo relevo e pelos movimentos verticais da terra (particularmente subsidência), são os principais indicadores de risco de inundação e erosão relacionadas à subida relativa do nível do mar (HARVEY *et al.*, 1999). O relevo, expresso pela altitude (m), é a variável unânime em todas as avaliações de sensibilidade costeira, apesar da carência de dados altimétricos consistentes e da baixa resolução dos dados disponíveis. Estes problemas são destacados como as principais limitações na avaliação da sensibilidade (GORNITZ, 1991; BUSH *et al.*, 1999; HARVEY; WOODROFFE, 2008; NAGESWARA RAO *et al.*, 2008; ROGERS; WOODROFFE, 2016). Por outro lado, a associação da elevação com as feições geológicas dos depósitos quaternários se mostra mais adequada, apesar de mais complexa (ROGERS; WOODROFFE, 2016).

Áreas mais sensíveis à inundação costeira por transposição de ondas e/ou intrusão da maré por meio dos canais de drenagem e/ou pelo lençol freático compreendem as áreas topograficamente mais baixas e portanto mais expostas à erosão e a inundação costeira. O limite superior da cota mais baixa deve ser bem definido e ancorados na literatura e principalmente nas características locais do ambiente estudado. Segundo Gornitz (1991), a zona de elevação dentro de 1 m enfrenta a maior probabilidade de inundação permanente, contudo, a faixa costeira dentro de 5 m também está em alto risco para situações de marés acima do normal devido às fortes ondas de tempestade que podem atingir a costa.

Diversas classes altimétricas são definidas com diferentes níveis de sensibilidade (**Tabela 2**). Gornitz (1991) adotou cotas até 5 m de altitude como sendo áreas com nível muito alto de sensibilidade e Rogers e Woodroffe (2016) com nível alto. Bush *et al.* (1999) adotaram o limite de 3 m para a classe de alta sensibilidade. Entretanto, é prudente considerar todas as cotas abaixo de 6 m como sendo de alto risco de inundação quando há o problema de baixa resolução da topografia, comentam Rogers e Woodroffe (2016).

**Tabela 2:** Diferentes classes de sensibilidade costeira utilizadas na literatura para as variáveis relativas aos aspectos geológico-geomorfológicos mais gerais da costa na avaliação dos eventos de erosão e inundação costeiras.

Fonte	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
<b>Relevo/altitude (m)</b>					
Gornitz 1991	≥ 30.1	20.1 a 30.0	10.1 a 20.0	5.1 a 10.0	0 a 5.0
Bush <i>et al.</i> 1999	-	> 6	3 a 6	<3	-
Rogers e Wood. 2016	-	Barreira costeira e planície estuarina >5 m ou planície aluvial <5	Planície estuarina <5	Barreira costeira <5m e declive <10°	-
<b>Declividade da costa (% e graus)</b>					
Nageswara <i>et al.</i> 2008	> 1.0 %	0.5 a 1.0 %	0.10 a 0.50 %	0.05 a 0.10 %	< 0.05 %
Abuodha e Wood 2010a	> 45°	> 20.1 a 45°	10.1 a 20°	6.1 a 10°	0 a 6°
<b>Geologia (tipo de rocha)</b>					
Gornitz1991	Rocha plutônica; vulcânica; alto a médio grau de metamorfismo	Rocha de baixo grau de metamorfismo; arenito e conglomerado (bem cimentado)	Maioria das rochas sedimentares	Sedimentos não consolidados grossos e/ou mal selecionados	Sedimentos finos não consolidados; cinza vulcânica
Abuodha e Wood. 2010a	-	Rocha resistente antiga (promontórios); arenitos vulcânicos	Rochas sedimentares (xisto)	Rochas sedimentares (arenito, siltito, carvão)	Sedimentos quaternários não consolidados
<b>Geomorfologia (forma do relevo, tipo de litoral e feições morfológicas associadas)</b>					
Gornitz 1991	Costa rochosa, penhasco; fiorde	Falésia média; costa recortada	Falésia baixa; pântano salgado; recife de coral; mangue	Praia (seixos); estuário; laguna; planície aluvial	Barreira e praia arenosas; planície lamosa; delta
Bush <i>et al.</i> 99	-	Planaltos	Planície de inundação ou terraço de baixa elevação	Águas abertas no reverso da barreira (estuário, laguna); terras úmidas:pântano, mangue	-
Nageswara Rao <i>et al.</i> 2008	Costa rochosa	Costa recuada e abrigada	Cristas de praia; duna alta (>3m) vegetada	Duna frontal baixa (<3m); estuário; laguna	Planície de maré, manguezal, praia, barreira/pontal
Ozyurt e Ergin 2010	Costa rochosa, penhascos; fiordes	Falésias médias; costa recortada	Falésias baixas; deriva glacial; planícies aluviais	Praias (calçada); estuários; lagoas	Barreira/praias arenosa; pântano salgado; mangue; recife de coral; planície lamosa; delta
Abuodha e Wood. 2010a	Falésia alta ou litologia forte (rocha dura)	falésia de elevação média ou com litologia mais fraca	Costa reentrante	Costa arenosa apoiada em estruturas artificiais	Costa arenosa com dunas e planícies
Serafim e Bonetti 2017	Costa rochosa	Foz	Costa com vegetação costeira (brejo, mangue, restinga)	Praia	Estruturas artificiais

#### 4.2. Declividade da costa (graus)

Segundo Nageswara Rao *et al.* (2008), a inclinação da costa (*coastal slope*) é o fator mais importante a ser considerado na estimativa do impacto da elevação do nível do mar. Esta variável representa o gradiente topográfico generalizado da zona costeira que se estende da marca de água alta (*high watermark*) no interior até uma distância de referência no mar, que na costa sudeste da Austrália foi considerada 500m em direção ao mar (*offshore*), (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). Outra maneira de se obter a declividade da costa é a partir de uma grade de células *raster* da topografia e da batimetria, que possa se estender por alguns quilômetros (~10km) em direção à terra e ao mar da atual linha de costa (PENDLETON; THIELER; WILLIAMS, 2008).

Encostas íngremes experimentam menos inundações em comparação com costas suaves a moderadamente inclinadas (**Tabela 2**). De acordo com Abuodha e Woodroffe (2010a), declividade está associada às tipos de costa, onde os litorais de baixa altitude, tipicamente planos apoiados por depósitos costeiros do Holoceno se distinguem daqueles com costas apoiadas por rochas com terreno de inclinação moderada ou acentuada.

A principal restrição no uso desta variável é a falta de mapas de contorno de boa resolução (NAGESWARA RAO *et al.*, 2008). Neste caso, os autores comentam que os mapas topográficos comumente disponíveis apenas com contornos de 10 m de intervalo na escala de 1:25.000 são inúteis, uma vez que a maioria das áreas neste tipo de estudo está muito abaixo de 10 m. A solução citada pelos autores, é usar modelos digitais de elevação disponíveis, a partir dos quais os contornos no intervalo de 1 m podem ser interpolados no ArcGIS, porém, quando este mapa de contorno é gerado e sobreposto ao mapa de relevo, muitas inconsistências são observadas devido à resolução grosseira (90 m) dos dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Portanto, extensas correções são necessárias para trazer precisão nos contornos, levando em consideração a natureza dos acidentes geográficos (a partir de imagens de satélite) e alturas de pontos e limites das feições confirmadas em campo.

#### 4.3. Geologia e Geomorfologia

A geologia captura a resistência relativa da rocha subjacente à erosão (GORNITZ, 1991; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a) e a geomorfologia (forma do relevo) reflete a natureza dos acidentes geográficos na costa e sua resistência relativa também à erosão (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). Em outras palavras, geologia de rochas duras é menos sensível à erosão do que os depósitos quaternários. Desta forma, os penhascos rochosos oferecem resistência máxima e, portanto, muito menos sensíveis, enquanto, as feições compostas por areia e lama, como dunas, lamaçais (*mudflats*) e manguezais, oferecem menos resistência e são extremamente sensíveis ao aumento do nível do mar (NAGESWARA RAO *et al.*, 2008).

As variáveis geologia e geomorfologia comumente são avaliadas separadamente (GORNITZ, 1991; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a), no entanto, elas podem ser agrupadas numa única variável (aspecto geológico-geomorfológico), pois há forte conexão entre as formas de relevo e o material geológico. Além disto, o tipo de rocha (geologia) isoladamente é considerado uma variável "antiga" (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a) e passível de ser desconsiderada, principalmente quando o tipo de rocha apresenta baixa variabilidade regional (SERAFIM; BONETTI, 2017).

Já as formas de relevo costeiras mantêm significativa importância na avaliação da sensibilidade costeira. Cristas de praia, planície chenier, planícies lamosas, estuários, lagoas, baías, pântano salgados (*saltmarsh*), manguezais e turfeiras de água doce ou várzeas flúvio-lagunares (áreas úmidas ou *wetlands*) são feições geomorfológicas mais suscetíveis à inundação (GORNITZ, 1991; NASCIMENTO; DOMINGUEZ, 2009) por apresentarem baixas altitude e gradiente. Já os tabuleiros costeiros do Neógeno, como os pertencentes ao Grupo Barreiras, são relativamente menos suscetíveis (NASCIMENTO; DOMINGUEZ, 2009), (**Tabela 2**).

Quanto à erosão costeira, os litorais que apresentam maiores pré-disposição são os que possuem maior mobilidade e instabilidade, sustentados por materiais inconsolidados (GORNITZ; WHITE, 1992 *apud* SERAFIM; BONETTI, 2017), mas são também os litorais mais resilientes (ORFORD; PETHICK; McFADDEN, 2007; WOODROFFE, 2007). Feições geomorfológicas quaternárias merecem especial atenção, como os manguezais, os pântanos salgados (*saltmarsh*) e doces (*swamp*), localizados à retaguarda das ilhas barreira e lagunas, já que exercem papel fundamental na manutenção da linha de costa por oferecerem proteção contra ondas e ventos (BUSH *et al.*, 1999), pois a cobertura vegetal destes ambientes tem o papel de bloquear o escoamento, aprisionar os sedimentos e reduzir o potencial de erosão da costa, afirmam os autores.

Pelo exposto, observa-se que os aspectos geológicos e geomorfológicos, por vezes, incluem características sedimentológicas, pois seus atributos são entrelaçados e complementares, sendo difíceis separá-los ou ignorá-los, quando avaliados isoladamente ou quando avaliados em uma escala de maior detalhe. Assim, as características texturais dos sedimentos podem compor uma variável que fica entre a geologia e a geomorfologia, já que o tamanho do grão é considerado como um atributo de segunda ordem por apresentar uma condição transicional entre estrutural e dinâmica, cujas características são regionalizadas e apresentam pontos relevantes de mudança das condições físicas (SILVEIRA; BONETTI, 2019). Assim, a caracterização mais detalhada da litologia dos depósitos inconsolidados permite um refinamento maior do grau de sensibilidade, uma vez que a inundação é mais alta em terrenos de baixa drenagem como os depósitos argilosos do que em depósitos arenosos (**Tabela 3**).

**Tabela 3:** Diferentes classes de sensibilidade costeira usadas na literatura para variáveis relativas aos aspectos geológico-geomorfológicos mais detalhados na avaliação dos eventos de erosão e/ou inundação costeiras.

Fonte	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
<b>Estado morfodinâmico e condições da praia</b>					
Abuodha e Woodroffe 2006	-	Dissipativo; banco e calha longitudinal; banco e praia de cúspides	Bancos transversais	Terraço de baixa mar; refletivo	-
Bush <i>et al.</i> 1999; Serafim e Bonetti 2017	-	Ampla e plana; com berma bem desenvolvida; bom suprimento de areia	Largura moderada a estreita; potencial p/ interrupção do fornecimento de areia	Estreita e íngreme; lama, turfa ou tocos expostos; pobre suprimento de areia	-
<b>Tipo e condições das barreiras arenosas e ocorrência de transposição de ondas (<i>overwash</i>)</b>					
Tipo de barreira (Abuodha e Wood. 2010a)	Barreira progradante	Barreira de praia continente	Barreira estacionária	Barreira de duna transgressiva episódica	Barreira recuada
Configuração das dunas frontais (Bush <i>et al.</i> 1999)	-	cristas altas, largas, contínuas, não alcançadas, com vegetação	Dunas baixas, descontínuas ou destruídas; moderadamente bem vegetada; com peq. perturbações (cortes de estrada)	Nenhuma duna ou interrompida por cortes de estradas, canteiros de obras, trilhas ou remoção de vegetação	-
Elevação das dunas frontais (Souza e Nicolodi 2016)	-	> 2m	1-2 m	< 1 m (baixa ou ausente)	-
Elevação do cordão/duna frontal (Lins-de-Barros e Muehe 2010)	-	Praia abrigada de baixa energia sem elevação específica	Praia refletiva semi-exposta de moderada energia c/ elevação ≤ 7m	Praias expostas de alta energia c/ elevação ≤ 7m, ≤ 6m e ≤ 5m respect.	-
Condições de <i>overwash</i> (Bush <i>et al.</i> 1999)	-	Sem <i>overwash</i>	Ocasional; leques de transposição de extensão limitada	Frequente; leques de transposição peq. ou numerosos; lacunas nas dunas	-
Média de <i>overwash</i> (n/km) (Souza e Nicolodi. 2016)	-	< 0.5	0.5 to 0.8	> 0.8	-
<b>Feições sedimentares</b>					
Silveira e Bonetti 2019	-	embasamento e grãos grossos	grãos médios	grãos finos	-

Da mesma forma, as características de proveniência dos sedimentos podem auxiliar na definição de classes de maior e menor sensibilidade. Rogers e Woodroffe (2016) distinguiram os sedimentos de origem marinha e de origem fluvial para inferir a exposição à inundação por processos costeiros e terrestre (fluvial), onde depósitos marinhos exibem maior exposição aos condutores marinhos do que unidades estuarinas e aluviais. Em costas estuarinas, onde a natureza restrita das linhas costeiras é altamente abrigada, a amplitude da elevação do nível do mar e a altura das ondas podem variar significativamente dentro destes ambientes e, neste caso, as características dos sedimentos podem ser usadas para inferir a exposição aos fatores de mudança climática e assim avaliar a maior ou menor sensibilidade costeira (ROGERS; WOODROFFE, 2016).

As diferenças, por vezes sutis, de classes que abordam aspectos geológicos, geomorfológicos e/ou sedimentológicos são comuns entre os autores, pois retratam as particularidades locais como exposição da costa, tipo de litoral e feições morfológicas associadas. Gornitz (1991) e Ozyurt e Ergin (2010) consideraram costas recortadas como forma de relevo de baixa sensibilidade costeira, sendo este atributo, na verdade, diretamente associado ao grau de exposição às ondas, e não à geomorfologia. Isto mostra as afinidades diretas que existem entre os atributos de diversas variáveis.

#### 4.4. *Morfologia e estado morfodinâmico praias*

A sensibilidade costeira às mudanças climáticas pode ser avaliada também pelo tipo de praia e suas características morfométricas (BUSH *et al.*, 1999; ABUODHA; WOODROFFE, 2007) e esta avaliação pode ser realizada a partir de evidências observadas em campo, como medição da altitude do cordão/duna frontal e reconhecimento do estado morfodinâmico praias.

As praias mudam entre os estados morfodinâmicos em resposta às variações de fatores externos, como clima e condições das ondas (WOODROFFE, 2007), mas uma situação modal é comumente observada (WRIGHT; SHORT, 1984). De acordo com a classificação proposta por estes últimos autores, as praias submetidas ao regime de micro-maré podem apresentar seis estados morfodinâmicos que podem oscilar entre dois estados extremos, do dissipativo ao refletivo, passando por quatro estados intermediários.

Bush *et al.* (1999) consideram as condições da praia como largura, declividade e espessura importantes geoindicadores de risco costeiro às propriedades localizadas em costas inconsolidadas. Para estes autores praias amplas e planas com bermas bem desenvolvidas e bom suprimento de areia são menos sensíveis. Ou seja, em sistemas praias mais largos, a água percorre uma maior distância até o setor do pós-praia, favorecendo a dissipação da energia e, conseqüentemente, conferindo uma maior propensão à estabilidade; logo, maiores larguras de praia podem ser associadas à baixa sensibilidade (SERAFIM; BONETTI, 2017). Assim, as praias dissipativas tendem a ser sistemas relativamente estáveis com baixa frequência de eventos de deslocamento da linha de costa (ABUODHA; WOODROFFE, 2007). Na sequência, Bush *et al.* (1999) classificam as praias com largura (parte seca) moderada a estreita e com potencial de interrupção do fornecimento de areia como moderadamente sensíveis; enquanto, praias estreitas e íngremes com fina camada de lama, turfa ou tocos expostos e pobre suprimento de areia como as mais fisicamente vulneráveis (**Tabela 3**).

Para Abuodha e Woodroffe (2007) as praias dissipativas e as intermediárias do tipo banco-calha longitudinais e banco-praia de cúspides apresentam baixa sensibilidade, seguida das praias do tipo bancos transversais consideradas com moderada sensibilidade, enquanto as praias dos tipos terraço de baixa-mar e refletiva são consideradas de alta sensibilidade às mudanças climáticas (**Tabela 3**).

Lins-de-Barros e Muehe (2010) ressaltam que o risco de inundação por transposição de ondas da área imediatamente à retaguarda da praia varia de acordo com o tipo de feição da praia (escarpa, falésia, dunas vegetadas). Esses autores propõem que em praias refletivas, com elevada exposição às ondas, associadas a cordão litorâneo de altura inferior a 7 m e, praias intermediárias, com alta exposição às ondulações e cujo cordão litorâneo ou dunas frontais apresentam altura até 4 m são praias de sensibilidade muito elevada. Já as praias consideradas com baixa sensibilidade são as que apresentam cordão ou dunas com altura superior a 7 m, estão abrigadas das ondas ou são limitadas por falésias que impedem a transposição. Todos os outros casos foram considerados como moderadamente sensíveis.

Neste caso, as características morfométricas do sistema praias, como altura do cordão/duna frontal e a largura da porção seca da praia imprimem maior importância na avaliação da sensibilidade do que o estado morfodinâmico propriamente dito. Porém, significativa convergência entre os autores citados é atribuída ao ganho de sensibilidade à inundação e à erosão das praias do tipo dissipativa para a refletiva (BUSH *et al.* 1999; LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010; SERAFIM; BONETTI, 2017).

#### 4.5. Tipo e condições das barreiras arenosas

O tipo de barreira arenosa é uma variável adicional que foi considerada por Abuodha e Woodroffe (2010a) para determinar o ISC porque seus registros morfológicos e estratigráficos preservados nos permitem compreender as alterações e tendências da linha de costa em escalas milenar, o que fornece uma visão sobre os dias atuais e mudanças costeiras futuras. Ainda são indicadores importantes na avaliação da sensibilidade das barreiras arenosas, a elevação, as condições da vegetação e os processos de transposição de ondas (overwash/washover), (BUSH *et al.*, 1999, LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010; SOUZA; NICOLODI, 2016).

Abuodha e Woodroffe (2010a) classificam a sensibilidade das barreiras da seguinte forma: as mais sensíveis são as barreiras recuadas (*receded*), pois são particularmente propensas a uma futura retrogradação; as barreiras de alta sensibilidade são as dunas transgressivas episódicas (*episodic transgressive dune*), pois indicam uma linha de costa retrogradante; as barreiras estacionárias (*stationary*) tendem a se formar onde há um suprimento limitado de sedimentos (HESP; SHORT, 1999) com pouca evidência de progradação no Holoceno e podem sofrer erosão no futuro, portanto, apresentam moderada sensibilidade; as barreiras de baixa sensibilidade são as praia do continente (*mainland beach*), depósitos confinados em uma costa rochosa (CHAPMAN *et al.*, 1982); e por fim, as barreiras progradantes (*prograded*) são consideradas como uma indicação de um suprimento de sedimentos positivo e contínuo, por isto, são consideradas com sensibilidade muito baixa (**Tabela 3**).

Segundo a proposta de geoindicadores expeditos de Bush et al. (1999), ambientes com ausência de dunas e submetidos a frequentes processos de transposição de ondas evidenciam erosão severa. Dunas interrompidas por cortes de estradas, canteiros de obras, trilhas ou remoção de vegetação são indicativos de alta sensibilidade; dunas baixas ou descontínuas, destruídas, moderadamente vegetada e com cicatrizes ou brechas evidenciam processos de erosão e são indicativos de moderada sensibilidade nesta classe inclui-se as dunas submetidas a transposições ocasionais ou com leques de lavagem de tamanho limitado. Já dunas e cristas de praia robustas, altas, largas, contínuas e com vegetação sinalizam acreção ou estabilidade de longo prazo da linha de costa e por isto podem ser classificadas como baixo grau de sensibilidade (BUSH *et al.*, 1999). O evento de transposição das ondas sobre a barreira arenosa é um indicativo precursor para eventual quebra da barreira e futuro desenvolvimento de uma costa aberta, dado o espaço de acomodação exposto aberto para o reverso da barreira (ORFORD; PETHICK; McFADDEN, 2007). Por isso, Souza e Nicolodi (2016) classificaram esses eventos em valores médios de número de ocorrência registrado por quilômetro de linha de costa (**Tabela 3**).

A falta de padronização existente na classificação da sensibilidade das barreiras arenosas com relação à altitude/altura é uma dificuldade metodológica para efeito de apropriação da classe e/ou comparação dos índices de sensibilidade costeiros. Os distintos valores métricos para o mesmo grau de sensibilidade são explicados pelas diferentes características locais da barreira arenosa, aporte sedimentar disponível e grau de exposição às ondas (ver SOUZA; NICOLODI, 2016; LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010 na **Tabela 3**).

#### 4.6. Proximidade da costa e/ou do rio (m)

O órgão governamental de hidrologia de Bangladesh, *Hidrological Organization* (BWDB), reconhece que a baixa altitude, a proximidade de rios/mar, além da menor cobertura de árvores podem fazer certas partes da região costeira mais sensíveis do que outras (ISHTIAQUE *et al.*, 2019). Áreas perto da costa exibem maior exposição à ação das ondas e conseqüentemente à erosão costeira, sendo aquelas mais rebaixadas também mais sensíveis às inundações (MUEHE; NEVES, 2007; LINS-DE-BARROS; MUEHE, 2010; ROGERS; WOODROFFE, 2016).

Uma costa abrigada pode ser protegida de alguma forma da intensidade do ataque das ondas durante uma tempestade, no entanto, a inundação por tempestade pode ser ampliada à medida que a água das ondas é canalizada para dentro do embaixamento. Por outro lado, uma costa convexa não é um risco para amplificação de onda de tempestade, contudo, é provável que experimente convergência de energia das ondas (BUSH *et al.*, 1999). Isto explica que as áreas costeiras mais sensíveis à inundação não estão necessariamente mais próximas da costa, ou melhor, do mar. Regiões estuarinas podem prolongar o alcance dos processos costeiros para áreas mais internas, desde que a topografia permita.

As classes de maior ou menor sensibilidade para a variável distanciamento da costa foi proposta por Ozyurt e Ergin (2010), onde considera distâncias até 100 m da costa como classe muito alta de sensibilidade e maiores que 1000 m como classe muito baixa de sensibilidade (**Tabela 4**). Contudo, cautela merece ser

tomada para litorais com estuários e lagunas, onde os limites internos destes ambientes podem, quando conveniente, serem considerados como a linha de referência para a medição inicial da "costa".

Na ausência de classes definida para a variável distanciamento de rios na análise da sensibilidade costeira, sugere-se a adoção das classes originalmente indicadas para distância da costa. Porém, é válido lembrar que esta variável passa a ser mais relevante para o caso de inundações costeiras, uma vez que estas podem ser potencializadas pelo transbordamento dos rios.

**Tabela 4:** Diferentes classes de sensibilidade costeira utilizadas na literatura para as variáveis relativas aos aspectos geográficos da costa para a avaliação dos eventos de erosão e inundação costeiras.

Fonte	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
<b>Proximidade da costa ou do rio (m)</b>					
Ozyurt e Ergin 2010	> 1000	700 a 1000	400 a 700	100 a 400	< 100
<b>Grau de exposição às ondas (graus)</b>					
Abuodhae Wood. 2010a	-	Abrigada	Semi-abrigada	Exposta	Muito exposta
Lins e Muehe 2010; Serafim e Bonetti 2017; Silveira e Bonetti 2019	-	Abrigado de baixa energia; baixa exposição	Semi-exposto de moderada energia; média exposição	Exposto de alta energia; alta exposição	-

#### 4.7. Grau de exposição às ondas

As maiores alturas e fluxos de energia de onda potencializam um maior avanço do mar sobre a costa, induzindo um cenário de maior sensibilidade (SERAFIM; BONETTI, 2017). Contudo, as ondas tem um efeito menor em um praia abrigada em comparação com uma costa exposta, inserida num mesmo tipo de rocha; da mesma forma que a presença ou ausência de feições protetoras como promontórios e ilhas, garante segmentos costeiros mais ou menos expostos às ondas do que outros (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a).

A exposição da linha costeira é considerada uma variável relativamente nova na derivação de IVC, mas que merece ser incluída porque a exposição da costa à direção da onda dominante influencia sua suscetibilidade (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). Neste caso, esta é uma variável física, mas que captura um elemento de uma variável de processo, também adotada por Lins-de-Barros e Muehe (2010), Serafim e Bonetti (2017) e Silveira e Bonetti (2019) nas costas sudeste e sul brasileira.

A exposição da linha de costa pode ser medida em graus positivos de 0 a 359,9° (Tabela 4). Entretanto, os dados de direção de onda devem ser analisados primeiramente em um diagrama de rosa dos ventos e a direção predominante considerada (SERAFIM; BONETTI, 2017). Os valores de grau de exposição considerados para cada classe de sensibilidade são dependentes do clima de ondas e da orientação da linha de costa locais. SERAFIM; BONETTI (2017), por exemplo, ao analisarem a vulnerabilidade das praias do estado de Santa Catarina, assumiram que quanto maior o ângulo entre a direção de exposição do segmento da costa e a direção do fluxo médio de energia das ondas, menor o grau de sensibilidade. Nesta metodologia foram consideradas a direção do fluxo médio de energia das ondas e a direção da altura significativa também (período de retorno de 50 anos, Hs Tr-50), onde atribuiu peso dobrado para a direção do fluxo médio de energia de onda, pois considerou-se que uma praia que recebe um maior fluxo de energia é mais suscetível que outra com alto valor de Hs Tr-50, considerando que este geralmente representa episódios ocasionais.

#### 4.8. Vazão do rio ( $m^3/s$ )

A baixa vazão do rio significa alta suscetibilidade a inundações pela maré (OZYURT; ERGIN, 2010), principalmente durante a estação seca, quando a água salgada do mar vai para o interior através dos rios e canais (HOANG; HUYNH; NGUYEN, 2012). No entanto, outros autores assumem que maior descarga fluvial, considerando os registros dos últimos 10 anos, representa maior capacidade de conduzir eventos inundacionais, devido ao grande volume de água fluvial disponível no sistema (BALICA *et al.*, 2012). Desta forma, o alto valor da descarga do rio, a grande extensão da linha de costa e a exposição a ciclones tropicais são as variáveis naturais que mais afetam a sensibilidade a inundação de cidades litorâneas (BALICA *et al.*, 2012).

A escolha da referência adotada para sustentar o papel que a descarga fluvial depende do grau de importância relativa que existe entre as características fluviais locais e o regime de maré (macro, meso ou micro), ou seja, a capacidade do rio de desencadear fenômenos inundacionais sobrepõe ou não a capacidade de intrusão da maré para o interior através dos canais fluviais.

A área de inundação de rios com vazão muito baixa, até 50 m<sup>3</sup>/s, principalmente quando inseridos num regime de micro-maré, são considerados com índice de sensibilidade muito alto para os fenômenos de inundação permanente (*inundation*), erosão e inundação costeiras (*flooding*) ocasionados pelo aumento de tempestades e intrusão salina; já os rios com vazão muito alta, acima de 500 m<sup>3</sup>/s, são considerados com sensibilidade muito baixa mesmo num regime de macro-maré (OZYURT; ERGIN, 2010) (**Tabela 5**).

**Tabela 5:** Diferentes classes de sensibilidade costeira utilizadas na literatura para as variáveis relativas aos aspectos hidrológicos para a avaliação dos eventos de erosão e inundação costeiras.

Fonte	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
<b>Vazão do rio (m<sup>3</sup>/s)</b>					
Ozyurt e Ergin 2010	> 500	250 - 500	150 - 250	50 - 150	0 - 50
Balica <i>et al.</i> 2012	Vazão mais baixa	-	-	-	Vazão mais alta
<b>Profundidade do lençol freático (m)</b>					
Ozyurt e Ergin 2010	> 2.0	1.25 - 2.0	0.75 - 1.25	0.0 - 0.75	≤0.0

#### 4.9. Profundidade do lençol freático (m)

Dentre as variáveis utilizadas para a avaliação da sensibilidade à inundação costeira, a profundidade do lençol freático pode ser considerada uma das mais importantes a nível local. Porém, sua utilização ainda é pequena, muito provavelmente devido à dificuldade de aquisição de dados. Esta é a principal limitação desta variável, pois esse tipo de dado requer coleta *in situ* realizada por técnicas manuais ou mecanizadas. Outra alternativa é o uso de dados secundários como os relatórios técnicos de sondagens (tipo SPT) ou similares, desde que a localização dos pontos de coleta contemplados nos relatórios sejam coincidentes ou próximas à área de interesse. De qualquer forma, áreas de estudo relativamente grandes exigem um adensamento maior dos pontos de amostragem, o que demanda equipe, custo e tempo para a coleta de dados de campo.

Atualmente as áreas mais rebaixadas localizadas próximas ao mar ou às lagunas já sofrem com inundações em função da transposição de ondas e pela subida do lençol freático, esta última causada não apenas pelas chuvas, mas por efeito das oscilações das marés lunar e meteorológica (MUEHE; NEVES, 2007; LINS-DE BARROS; MUEHE, 2010). Ou seja, a intrusão de água salgada pode se dar por superfície e sub-superfície (NICHOLLS; KLEIN; TOL, 2007). Se o nível do lençol freático for raso (próximo à superfície), a inundação ocorrerá mais rápido do que o nível do lençol freático mais profundo (OZYURT; ERGIN, 2010). A altura do lençol freático sob a faixa arenosa da praia é ainda uma variável determinante nos processos de infiltração, exfiltração e no transporte de sedimentos da zona de espriamento da praia, processos que participam de processos erosivos (LI *et al.*, 2002; AUSTIN; MASSELINK, 2006).

Os valores de profundidade do lençol freático acima do nível do mar são propostos por Ozyurt e Ergin (2010) para avaliar a sensibilidade da área costeira a eventos inundacionais, baseado no princípio de *Ghyben Herzberg* utilizado para a intrusão de salinidade na fonte de água subterrânea (**Tabela 5**).

#### 4.10. Taxa de mudança (erosão/acreção) da linha de costa (m/ano)

Mudanças da linha de costa (*shoreline change*) e estabilidade da linha de costa são denominações comumente empregadas para se referir à taxa de erosão/acreção do litoral, expressa normalmente em metros/ano. As classes de sensibilidade da praia relacionadas a este parâmetro podem ser qualitativas, como costas em acreção, estável, erosão lenta ou erosão severa (BUSH *et al.*, 1999) ou quantitativas com intervalos variados (GORNITZ, 1991; ABUODHA; WOODROFFE, 2007; ABUODHA; WOODROFFE, 2010a; SOUZA; NICOLLODI, 2016; SERAFIM; BONETTI, 2017), principalmente quando atribuídos às litorais expostos ou abrigados (**Tabela 6**).

Mudanças nas taxas de erosão ou ganho em dunas frontais, desenvolvimento de pontos fracos como eventos de *overwash* e impactos de tempestades serão refletidos na avaliação desta variável (BUSH *et al.*, 1999). Em outras palavras, o comportamento de uma praia envolve volumes consideráveis de areia que

podem acumular em uma praia durante períodos de condições relativamente calmas, mas podem ser erodidos na face da praia e depositados na zona submersa perto da costa, como consequência de condições de energia mais elevadas. Nessas circunstâncias, o reconhecimento de uma tendência na posição da linha de costa parece bem complexa (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a) e o padrão variável de deslocamento da linha costeira significa que é difícil atribuir uma classificação de sensibilidade para certas praias (ABUODHA; WOODROFFE, 2007).

Além disso, variações na posição da linha de costa podem ocorrer em escala de longo prazo, ocasionadas pela variação do nível médio do mar; de médio prazo, devido à migração de uma desembocadura; ou de curto prazo, como em episódios de tempestades. Independentemente da escala da variação, maiores taxas de retrogradação da linha de costa indicam um maior avanço do mar sobre a orla, resultando em um cenário de maior sensibilidade (SERAFIM; BONETTI, 2017).

Por isto, mudança na linha de costa é um parâmetro difícil de determinar, porque erosão é um fenômeno episódico. Além disso, as fotografias aéreas, comumente usadas para medir estas variações, fornecerem apenas uma visão geral sinótica no tempo, onde as taxas de mudanças da posição da linha de costa são comumente inferidas entre as fotografias disponíveis (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). Estes autores defendem, portanto, que a mudança da linha de costa é um indicador ruim da sensibilidade costeira porque as taxas de mudança nem sempre são medidas em todas as praias, assumindo muitas vezes que tendências semelhantes possam ser extrapoladas para as praias que não foram medidas, o que nem sempre é verdade.

Embora seja frequentemente usada em muitas avaliações do IVC, a variável mudança da linha de costa é diferente das outras no sentido de que é mais uma indicação de resposta aos processos costeiros, como aumento do nível do mar e tempestades (e, em alguns casos, perda ou desvio de sedimentos), em vez de representar uma característica física (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). Estes autores advertem, portanto, que a taxa de mudança da linha costeira não é uma variável adequada para testar ou validar os índices, principalmente em costas influenciadas por grandes eventos de tempestades e experiências de variações espaciais e temporais de erosão ou progradação, uma vez que estas variações podem não significar uma tendência dominante de qualquer um.

#### 4.11. Taxa de subida do nível do mar (mm/ano)

Espera-se que as mudanças climáticas e as taxas aceleradas de aumento do nível do mar aumentem as inundações e a erosão nos litorais do mundo (KIRBY *et al.*, 2021). A variável elevação relativa do nível do mar normalmente é obtida a partir de registros de bóia de ondulação, medidor de maré e por altimetria de satélite. As taxas obtidas são comumente comparadas com a taxa média global determinada a partir de medidores de maré nas últimas décadas e quando há diferentes taxas para um mesmo trecho do litoral, adota-se a um valor médio (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a). No entanto, tendências de aumento podem variar com o tempo de registro analisado e/ou disponível. Outra limitação desta variável é a ausência deste dado, sendo quando possível a adoção de taxas estabelecidas para outros setores próximos da costa avaliada. Da mesma forma que a baixa variabilidade regional deste tipo de dado, permite desconsiderar esta variável na avaliação da sensibilidade costeira (SERAFIM; BONETTI, 2017).

Segundo Gornitz (1991), a oscilação do nível relativo do mar em cada localidade inclui um componente eustático (1-2 mm/ano), glacio-isostático, neotectônico e de subsidência local. Áreas afundadas, ou aquelas com nível relativo do mar acima da faixa eustática (>2 mm/ano), independentemente da causa final, enfrentam maiores riscos de inundação (**Tabela 6**). Nota-se portanto, que esta é uma variável complexa. A incorporação de dados de projeções climáticas atuais de subida do nível do mar e de taxas de aceleração nos próximos 100 anos usados para determinar taxas de recuo costeiro, não tem se mostrado adequados para delinear a fronteira de Áreas de Gestão de Mudanças Costeiras (*Coastal Change Management Areas*, CCMA), uma vez que, classificação de tipologias costeiras e sua resposta ao aumento do nível do mar, são mais necessárias para delinear a extensão da erosão ou mudança costeira futuras do que propriamente taxas de subida do nível do mar (KIRBY *et al.*, 2021). De qualquer forma, os autores concluem que compreender e mapear a resposta costeira ao aumento do nível do mar ajudará as autoridades de planejamento a construir comunidades mais resilientes na costa.

**Tabela 6.** Diferentes classes de sensibilidade costeira usadas na literatura para variáveis relacionadas aos aspectos oceanográficos na avaliação da erosão e/ou inundações costeiras.

Fonte	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
<b>Taxa de mudança da linha de costa (m/ano)</b>					
Gornitz 1991 Abuodha e Wood. 2006	$\geq 2.1$ (acrecção)	1.0 a 2.0 (estável)	(-) 1.0 a 1.0 (estável/erosão)	(-) 1.1 a (-) 2.0 (erosão)	$\leq (-) 2.0$ (erosão)
Bush <i>et al.</i> 1999	-	acrecção	estável	erosão lenta severa	-
Nageswara <i>et al.</i> 2008	$> 5.0$ (acrecção)	$< 5.0$ (acrecção)	nada	$< 5.0$ (erosão)	$> 5.0$ (erosão)
Abuodha e Wood. 2010 <sup>a</sup>	$> 2.0$	1.0 a 1.9	$\pm 0.9$	(-)1.0 a (-) 1.9	$< (-) 2.0$
Souza e Nicolodi 2016 (costa abrigada)		$> (-) 0.5$ (acrecção ou estável)	(-) 0.5 a (-) 2.0 (erosão)	$< (-) 2.0$ (erosão severa)	-
Serafim e Bonetti 2017	(-) 0.13	(-) 0.18	(-) 0.25 a (-) 0.30	(-) 0.35	(-) 0.73
<b>Taxa de subida do nível do mar (mm/ano)</b>					
Gornitz 1991	$\leq (-) 1.1$ (progradação)	(-) 1.0 a 0.99	1.0 a 2.0 (faixa de aumento eustático)	2.1 a 4.0 (retrogradação)	$\geq 4.1$
Abuodha e Wood. 2010a	$< 0.0$	0.0 a 0.9	1.0 a 2.0	2.1 a 3.0	$> 3.0$
Ozyurt e Ergin 2010	$< 1$	1 a 2	2 a 5	5 a 7	$> 7$
<b>Altura das ondas (m)</b>					
Gornitz 1991 Abuodha e Wood. 2006 (altura máxima)	0.0 a 2.9	3.0 a 4.9	5.0 a 5.9	6.0 a 6.9	$\geq 7.0$
Nageswara Rao <i>et al.</i> 2008 (altura significativa)	$< 0.55$	0.55 a 0.85	0.85 a 1.05	1.05 a 1.25	$> 1.25$
Abuodha e Wood. 2010a (altura média)	0.0 a 0.5	0.6 a 1.0	1.1 a 1.5	1.6 a 2.0	$> 2.1$
<b>Amplitude da maré (m)</b>					
Gornitz 1991 Abuodha e Wood. 2006	0 a 0.99 (micromaré)	1.0 a 1.9	2.0 a 4.0 (mesomaré)	4.1 a 6.0	$\geq 6.1$ (macromaré)
Nageswara Rao <i>et al.</i> 2008 (maré de sizígia)	$< 1.0$	1.0 a 2.0	2.0 a 4.0	4.0 a 6.0	$> 6.0$
Abuodha e Wood. 2010a	$> 2.1$	1.6 a 2.0	1.1 a 1.5	0.6 a 1.0	0.0 a 0.5
Ozyurt e Ergin 2010	$> 6.0$	4.0 a 6.0	2.0 a 4.0	0.5 a 2.0	$< 0.5$

#### 4.12. Altura das ondas (m)

A altura da inundações é aumentada se a onda coincidir com a maré alta e é importante considerar também que as ondas de tempestade de maior duração (dias) permitem que a inundações penetre mais para o interior e, portanto, pode cobrir uma extensão de área mais ampla (JACOB; GORNITZ; ROSENZWEIG, 2007). Na ausência de dados de ondas in situ, modelos computacionais de ondas como o Wave do MIKE-21, podem ser usados para simular as alturas de onda numa costa específica (NAGESWARA RAO *et al.*, 2008).

Alguns autores adotam a altura máxima (GORNITZ, 1991; ABUODHA; WOODROFFE, 2007), outros a altura significativa das ondas (NAGESWARA RAO *et al.*, 2008) ou ainda, a altura média das ondas (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a) para avaliar a sensibilidade costeira. Portanto, valores diferentes de altura de onda geram classes diferentes para retratar baixa e alta sensibilidade (Tabela 6). A definição do parâmetro considerado é extremamente importante e devem ser cuidadosamente justificado.

As ondas e correntes de maré transformam ativamente a linha costeira e as alturas das ondas são proporcionais à raiz quadrada da energia das ondas, que é uma medida da capacidade de erosão (GORNITZ, 1991). Desta forma, a ação das ondas pode resultar em erosão e este é um fator significativo que modifica a

linha costeira, portanto, é uma variável importante a ser incluída em um índice de sensibilidade costeira (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a), principalmente quando se trata da avaliação de fenômenos erosivos. Neste aspecto, é prudente considerar a altura máxima ou a média das máximas ao invés das altura média das ondas.

Porém, no caso da avaliação da inundação costeira em áreas mais internas da planície, o atributo considerado para a variável altura da onda pode ser revisto. Litorais menos expostos e outros caracterizados por praias seguidas de cordões litorâneos ou dunas frontais largos e relativamente mais altos que o nível médio de alcance das ondas mais altas e até das ondas mais frequentes durante as tempestades, podem adotar o valor da altura média das ondas, pois este atributo passa a ser mais coerente para avaliar uma situação de inundação de locais mais internos onde o contato com a água do mar pode se dar predominantemente por intrusão da maré por canais ou lençol freático e não necessariamente por transposição de ondas.

#### 4.13. Amplitude da maré (m)

As inundações e as erosões resultam de ondas de tempestade quando as marés altas são produzidas por uma combinação de baixa pressão atmosférica e ondas impulsionadas pelo vento, especialmente durante marés astronômicas altas (GORNITZ, 1991). O paradigma que, áreas alagáveis (*marsh*) situadas em ambientes de grande amplitude de maré são mais resistentes ao aumento do nível do mar do que aquelas situadas em ambientes com pequena amplitude de maré, já foi objeto de pesquisa para Kirwan e Guntenspergen (2010) por meio de investigações de campo e modelagem numérica.

Controvérsia, portanto, existe com relação a variável maré na avaliação da sensibilidade costeira (**Tabela 6**). Gornitz (1991), Abuodha e Woodroffe (2007) e Nageswara Rao *et al.* (2008) consideram litorais com regime de macro, meso e micro marés com níveis respectivos de sensibilidade muito alto, moderado e muito baixo. Antagonicamente, Ozyurt e Ergin (2010) e Abuodha e Woodroffe (2010) definem classes (*rank*) inversas, onde pequenas amplitudes de maré proporcionam maior sensibilidade do que litorais com grandes amplitudes de maré. Veja:

A amplitude das marés está ligada aos riscos de inundação e erosão. Embora uma grande amplitude das marés dissipe a energia das ondas, limitando a erosão da praia ou penhasco a um breve período de maré alta (BIRD, 1985 *apud* GORNITZ, 1991), ela também delinea uma ampla zona de pântanos inter-marés, que será mais suscetível a inundações após a subida do nível do mar [...] Portanto, ... a amplitude das marés altas está associada a correntes de maré mais fortes, capazes de erodir e transportar sedimentos. Assim, as costas com macromarés (> 4 m) serão mais vulneráveis do que aquelas com intervalos menores (GORNITZ, 1991 p. 389).

Por outro lado,

... quanto maior a amplitude da maré, menor a sensibilidade com base na seguinte perspectiva defendida por vários trabalhadores em estudos anteriores [...]. O raciocínio é baseado principalmente na influência potencial de tempestades ou outros níveis extremos de água e a extensão para os quais é provável que impactem acima dos níveis de maré mais altos. [...] Em uma linha de costa sob o regime de micromaré, no entanto, elevações extremas incomuns do nível de água sempre excederão os níveis de maré alta e essas costas estão, portanto, sempre em maior risco de inundação das tempestades (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 1999 *apud* ABUODHA; WOODROFFE, 2010a, p. 200). A razão para afirmar uma alta vulnerabilidade para um sistema de micromaré é baseada principalmente na influência potencial das tempestades na evolução costeira e seu impacto em relação à amplitude das marés[...] (OZYURT; ERGIN 2010, p. 269).

Segundo Kirwan e Guntenspergen (2010), a estabilidade da rede de canais e a amplitude e desenvolvimento de planícies de maré com vegetação aumenta com o aumento da amplitude das marés, ou seja, os pântanos (*marsh*) com altas amplitudes de maré são de fato mais estáveis. Outro fator que deve ser considerado é que os efeitos das marés são consideravelmente diferentes numa costa aberta e dentro de estuários; a amplitude das marés pode variar consideravelmente, sendo ampliada ou diminuída dependendo da morfologia estuarina (DALRYMPLE; ZAITLIN; BOYD, 1992); e o efeito das marés com grande amplitude talvez seja substancialmente menor dentro de um estuário onde as planícies de maré evoluíram para modular as inundações das águas (KIRWAN; GUNTENSPERGEN, 2010), em comparação com litorais que exibem maior exposição à erosão e para os quais a zona de impacto é maior (ROGERS; WOODROFFE, 2016).

Portanto, em costas sob regime de micromaré, alturas extremas incomuns do nível da água sempre tendem a exceder os níveis da maré alta e essas costas estão, portanto, sempre sob maior risco de inundação por tempestades (ABUODHA; WOODROFFE, 2010a; ROGERS; WOODROFFE, 2016). Em outras palavras, a influência potencial das tempestades na evolução costeira e seu impacto em relação à amplitude das marés é maior em um sistema de micromaré (OZYURT; ERGIN, 2010).

Em estudos de vulnerabilidade costuma-se trabalhar com o pior cenário ambiental. Desta forma, valores extremos de amplitude de marés meteorológicas com tempos de retorno (Tr) de 50 anos e marés astronômicas referentes ao quartil 0,90 anual merecem ser levados em consideração (SERAFIM; BONETTI, 2017). A maré influencia tanto a inundação quanto a erosão costeira e quando os piores cenários são somados, grandes amplitudes elevam o nível de base as ondas e geram correntes de maré mais fortes, capazes de erodir a costa e transportar os sedimentos em proporções maiores que o habitual (GORNITZ, 1991). Assim, maiores amplitudes da maré meteorológica potencializam um maior avanço do mar sobre a zona costeira, colaborando para o aumento da sensibilidade (SERAFIM; BONETTI, 2017).

## 5. Considerações finais

Independente da definição ou concepção adotada, a vulnerabilidade costeira pode ser reduzida através da atenuação do impacto das forçantes externas nos sistemas costeiros e também do aumento da capacidade de adaptação dos ambientes e das comunidades costeiras (McFADDEN; PENNING-ROWSELL; NICHOLLS, 2007a). A razão pela qual se busca definir vulnerabilidade é para nos ajudar a decidir o que fazer para reduzir seu impacto. Isto se aplica também para os termos risco e perigo. Algumas dessas terminologias são usadas em diferentes comunidades científicas com distintas concepções conceitual e empírica, incluindo conceitualizações diferenciadas até mesmo dentro da mesma comunidade (McFADDEN, 2007; HINKEL; KLEIN, 2007). E por aí se vê que essa discussão não se encerra por aqui. Contudo, para se evitar a propagação dos erros provenientes de traduções inadequadas, os termos conhecidamente imprecisos, confusos ou ambíguos merecem ser seguidos do termo em inglês (entre parênteses).

De todo modo, a diversidade de conceitualizações e a imprecisão levaram a uma diversidade de abordagens metodológicas para avaliar a vulnerabilidade (HINKEL; KLEIN, 2007). Desafios metodológicos, portanto, podem focar antagonicamente na generalização, padronização ou uniformização de técnicas metodológicas, ao mesmo tempo que podem direcionar esforços para o refinamento e maior assertividade na avaliação da sensibilidade com apropriações metodológicas bastante particulares à área de estudo. O mais importante na escolha da metodologia é o pesquisador ter consciência das limitações e do alcance da ferramenta; e que esta seja apropriada à escala e aos objetivos definidos. Além disto, é importante contextualizar o valor da metodologia perante outras existentes, pois aquela pode ter sua utilidade ao dar suporte (efeito leque ou funil) para outras avaliações em diferentes escalas, fenômenos ou contextos geográficos.

Não é objetivo aqui propor a utilização conjunta de todas as variáveis físicas discutidas no artigo. A finalidade é valorizar as variáveis e dar suporte teórico e metodológico para que o leitor possa compreender a importância e as limitações de cada uma delas e selecionar as que são mais relevantes para cada estudo e ainda escolhidas em função da disponibilidade de dados e do nível de detalhamento que se pretende avaliar, ou seja, a seleção criteriosa das variáveis é antes de mais nada uma questão de definição de escala. Por isso, algumas variáveis parecem superpostas, mas em escala local, com diversidade geomorfológica, o detalhamento das feições morfológicas e dos processos podem auxiliar no mapeamento das particularidades observadas, conduzindo para o maior refinamento da sensibilidade costeira.

Embora as escalas de mudança climáticas sejam incertas, a tendência positiva de mudanças relacionadas às forçantes naturais, gerando o aumento da vulnerabilidade costeira (físico + social) são inegáveis (McFADDEN; PENNING-ROWSELL; NICHOLLS, 2007). Os sistemas físicos precisam de espaço para se ajustar às forças que os moldam, e se a gestão costeira pode promover amortecedores para fornecer este espaço, em vez de espremer o litoral em uma forma desatualizada, isso poderia ter benefícios importantes na redução da vulnerabilidade costeira (ROCHELLE-NEWALL *et al.*, 2005 *apud* McFADDEN; PENNING-ROWSELL; NICHOLLS, 2007). Por isto, é tão importante o uso das ferramentas físicas como contribuição inicial na avaliação da vulnerabilidade costeira. Segundo Orford, Pethick e McFadden (2007), o caminho provável para a redução desta vulnerabilidade é alterar a sensibilidade através da mudança de resiliência, especialmente a longo prazo, onde a maneira mais apropriada é promover o "manejo de sedimentos", ou seja, criar uma suficiência de sedimentos costeiros necessários para sustentar a resiliência do litoral contemporâneo, se não promovendo um excesso e armazenamento de sedimento a ser disponibilizado para futuros desenvolvimentos morfo-sedimentares.

Além disto é necessário evoluir na compreensão do tempo de resposta dos ambientes aos eventos, ou seja, o tempo que leva para o sistema reagir, o tempo de relaxamento e o tempo que leva para o sistema recuperar sua condição de pré-perturbação (WOODROFFE, 2007). Portanto, a avaliação da sensibilidade assume o ponto de partida para a compreensão da resiliência dos ambientes costeiros à um estressor externo, ou seja, à algum fenômeno natural ou induzido que possa ameaçar o equilíbrio dinâmico dos atributos naturais. De qualquer forma, reconhece aqui a necessidade de integração dos dados sócio-culturais, econômicos e políticos nos espaços costeiros junto à aos aspectos geomorfológicos, geográficos, hidrológicos e oceanográficos para uma avaliação legítima da vulnerabilidade.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pela bolsa de pós-doutoramento da primeira autora (Edial 10/2018, nº 386/2018) e a Universidade de Wollongong, na Austrália, pelo apoio pessoal e físico durante o período de estudo como pesquisadora visitante.

## Referências

- ABUODHA, P.A.; WOODROFFE, C.D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. **Journal of Coastal Conservation**, v. 14, p.189-205, 2010a.
- ABUODHA, P.A.; WOODROFFE, C.D. Vulnerability assessment. In: GREEN, D.R. (Ed.) **Coastal Zone Management**. London: Thomas Telford Ltd, 2010b. p.262-290.
- ABUODHA, P.A.; WOODROFFE, C. Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. In: WOODROFFE, C.D.; BRUCE, E.; PUOTINEN, M.; FURNESS, R.A. (Eds). **GIS for the Coastal Zone: A selection of Papers from CoastGIS2006**. Wollongong: Australian National Centre for Ocean Resources and Security University of Wollongong, 2007
- ABUODHA, P.A.; WOODROFFE, C.D. International assessments of vulnerability of the coastal zone to climate change, including in Australian perspective. **Australian Greenhouse Office**, Department of the Environment and Heritage, 2006.
- ALLAN, J.C.; KOMAR, P.D. Extreme Storms on the Pacific North West Coast during the 1997-1998 El Niño and 1998-1999 La Niña. **Journal of Coastal Research**, v.18 (1), p. 175-193, 2002.
- AUSTIN, M.J.; MASSELINK, G. Swash-groundwater interaction on a steep gravel beach. **Continental Shelf Research**, v. 26 (20), p. 2503-2519, 2006.
- BALICA, S.F.; WRIGHT, N.G.; MEULEN, F. VAN DER. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. **Nat Hazards**, v. 64, p.73-105, 2012.
- BERGER, A.R.; IAMS, W.J. Geoinformatics: Assessing rapid environmental changes in earth systems. Rotterdam: Balkema, 1996. 466 p.
- BONETTI, J; WOODROFFE, C. D. Spatial Analysis on GIS for Coastal Vulnerability Assessment. In: BARLETT, D.; CELLIERS, L. (eds). **Geoinformatics for Marine and Coastal Management**. Boca Raton: CRC Press, 2017. p.367-396.
- BUSH, D.M.; NEAL, W.J.; YOUNG, R.S.; PILKEY, O.H. Utilization of geoinformatics for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. **Ocean and Coastal Management**, v. 42, p. 647-670, 1999.
- CHEN, H.; ITO, Y.; SAWAMUKAI, M.; SU, T.; TOKUNAGA, T. Spatial and temporal changes in flood hazard potential at coastal lowland area: a case study in the Kujukuri Plain, Japan. **Nat Hazards**, v.84, p. 1513-152, 2016.
- COLTRINARI, L. Mudanças ambientais globais e geoinformadores. **Pesquisa Geociências**, v. 28 (2), p.307-314, 2001.

- CUTTER, S.L. Vulnerability to Environmental Hazards. **Progress in Human Geography**, v. 20 (4), p. 529-539, 1996.
- DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual Basis and stratigraphic implications. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 62, p. 1130-1146, 1992.
- EGUCHI, B.M.M.; ALBINO, J. Influência dos modos de variabilidade climática sobre eventos de ressacas no litoral sul do Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 165-183, 2021.
- FINLAYSON, C.M.; BEGG, G.W.; HOWES, J.; DAVIES, J.; TAGI, K.; LOWRY, J. A manual for an Inventory of Asian Wetlands: version 1.0. Kuala Lumpur: Wetlands International Global Series 10, 2002.
- FLINCK, R.E.; CHADWICK, B. "Flooding" versus "inundation". **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 93 (38), p 365-366, 2012.
- FÜSSEL, H.M. Vulnerability in climate change research: a comprehensive conceptual framework. In: Breslauer Symposium. Berkeley: University of California International and Area Studies. 2005, **Anais...**
- GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**, v. 89, p. 379-398, 1991.
- GRATTAN, S.R.; ZENG, L.; SHANNON, M.C.; ROBERTS, S.R. Rice is more sensitive than previously thought. **California Agriculture**, v. 56 (6), p. 189-195, 2002.
- HARVEY, N.; WOODROFFE, C.D. Australian approaches to coastal vulnerability assessment. **Sustain Science**, 3:67-87, 2008.
- HARVEY, N.; BELPERIO, T.; BOURMAN, B.; BRYAN, B. A GIS-based approach to regional coastal vulnerability assessment using Holocene geological mapping of the northern Spencer gulf, South Australia, Asia Pacific. **Journal on Environment and Development**, v. 6 (2), p. 1-25, 1999.
- HINKEL, J.; KLEIN, R.J.T. Integrating Knowledge for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change. In: McFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap.5.
- HESP, P.A.; SHORT, A.D. Barrier morphodynamics. In: SHORT A.D. (Eds.). **Handbook of beach and shoreface morphodynamics**. Wiley, Chichester, 307-333, 1999.
- HOANG, H.N.; HUYNH, H.X.; NGUYEN, T.H. Simulation of salinity intrusion in the context of the Mekong delta region (Viet Nam). 978-1-4673-0309, **IEEE**, 2012.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. A common methodology for assessing vulnerability to sea level rise. 2nd revision. In: Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. IPCC CZMS. Ministry for Transport, Public Works and Water Management. The Hague, The Netherlands, appendix C, 1992.
- IPCC- Intergovernmental Panel On Climate Change. The seven steps to the assessment of the vulnerability of coastal areas to sea-level rise (Draft). Response Strategies Working Group, Geneva: IPCC, 1991.
- ISHTIAQUE, A.; EAKIN, H.; CHHETRI, N.; MYINT, S.W.; DEWAN, A; KAMRUZZAMAN, M. Examination of coastal vulnerability framings at multiple levels of governance using spatial MCDA approach. **Ocean and Coastal Management**, v. 171, p. 66-79, 2019.
- JACOB, K.; GORNITZ, V.; ROSENZWEIG, C. Vulnerability of the New York City Metropolitan Area to Coastal Hazards, Including Sea-Level Rise: Inferences for Urban Coastal Risk Management and Adaptation Policies. In: McFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap. 9.

- JIMENEZ, J.A.; VALDEMORO, H.I.; BOSOM, E. Impacts of sea level rise induced erosion on the Catalan coast. **Reg. Environ. Change**, v. 17, p. 593-603, 2017.
- KAY, R.C.; ELIOT, I.; CATON, B.; MORVELL, G.; WATERMAN, P. A review of the intergovernmental panel on climate change's common methodology for assessing the vulnerability of coastal areas to sea-level rise. **Coastal Management**, v. 24, p. 165-188, 1996.
- KIRBY, J.A.; MASSELINK, G.; ESSEX, S.; POATE, T.; SCOTT, T. Coastal adaptation to climate change through zonation: A review of coastal change management areas (CCMAs) in England. **Ocean and Coastal Management**, 2151-14, 2021.
- KIRWAN, M.L.; GUNTENSPERGEN, G.R. Influence of tidal range on the stability of coastal marshland. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010.
- KLEIN, R.J.T.; NICHOLLS, R.J. Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change. **Ambio**, v. 28 (2), 1999.
- LI, L.; BARRY, D.A.; PATTIARATCHI, C.B.; MASSELINK, G. BeachWin: modelling groundwater effects on swash sediment transport and beach profile changes. **Envir. Modelling Software**, v. 17, p. 313-320, 2002.
- LINS-DE-BARROS, F.M.; MUEHE, D. Avaliação local da vulnerabilidade e riscos de inundação na zona costeira da Região dos Lagos, Rio de Janeiro. **Quat. and Envir. Geosciences**, v. 2 (1), p. 55-66, 2010.
- MARANDOLA, J.R.; HOGAN, D.J. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente e Sociedade**, v. 7 (2), 2004.
- MARFAI, M.A.; KING, L. Potencial vulnerability implications of coastal inundation due sea level rise for the coastal zone of Semarang city, Indonesia. **Environmental Geology**, v. 54, p. 1235-1245, 2008.
- MCFADDEN, L. Vulnerability Analysis: A Useful Concept for Coastal Management? In: MCFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap. 2.
- MCFADDEN, L.; PENNING-ROWSELL, E.; NICHOLLS, R.J. Vulnerability and beyond. In: MCFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap. 14.
- MARTINS, P. T.A.; RIEDEL, P.S.; MILANELLI, J.C.C. Carta de sensibilidade ambiental ao óleo: origem, evolução e tendências. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM**, v. 35, p. 163-175, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2179-460X863>
- MUEHE, D.; NEVES, C. F. Impactos potenciais da mudanças climáticas na cidade do rio de Janeiro e possíveis ações de mitigação. Rio de Janeiro: Instituto Pereira Passos. Seminário de Reação: Rio Próximos 100 anos, 2007.
- MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. **Mercator, Rev. de Geografia da UFC**, v. 04 (07), p. 97-110, 2005.
- NAGESWARA RAO, K.; SUBRAELU, P.; VENKATESWARA RAO T.; HEMAMALINI, B; RATHEESH, R.; BHATTACHARYA, S.; RAJAWAT, A.S. AJAI, Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast India through remote sensing and GIS. **Journal Coast Conservation**, v. 12, p. 195-207, 2008.
- NASCIMENTO, D.M.C.; DOMINGUEZ, J.M.L. Avaliação da vulnerabilidade ambiental como instrumento de gestão costeira nos municípios de Belmonte e Canavieiras, BA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39 (3), p. 395-408, 2009.

- NGUYEN, T.T.X.; BONETTI, J.; ROGERS, K.; WOODROFFE, C.D. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. **Ocean & Coastal Management**, v. 123, p. 18-43, 2016.
- NICHOLLS, R.J.; WONG, P.P.; BURKETT, V.R.; CODIGNOTTO, J.; HAY, J.; MCLEAN, R.; RAGOONADEN, S.; WOODROFFE, C.D. Coastal systems and low-lying areas. In: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VANDER LINDEN, P.J.; HANSON, C.E. (Eds.). **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the 4th assessment report of the IPCC, Cambridge: Cambridge University Press, 2007, p. 315-356.
- NICHOLLS, R.J.; KLEIN, R.J.T.; TOL, R.S.J. Managing Coastal Vulnerability and Climate Change: A National to Global Perspective. In: MCFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap. 13.
- NICOLODI, J.L.; PETERMANN, R.M. Potential vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5 (2), p. 184-204, 2010.
- NICOLODI, J. L.; ZAMBONI, A. Gestão Costeira. In: ZAMBONI, A.; NICOLODI J. L. (Eds.). **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2008. p. 213-241..
- ORFORD, J.; PETHICK, J.; MCFADDEN L. Reducing the Vulnerability of Natural Coastal Systems: A UK Perspective. In: MCFADDEN, L.; NICHOLLS, R.J.; PENNING-ROWSELL, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, cap. 11.
- OZYURT, G.; ERIGIN, A. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator based methodology for decision markes. **Journal of Coastal Research**, v. 26( 2), p. 265-273, 2010.
- PENDLETON, E.A.; THIELER, E.R.; WILLIAMS, S.J. Coastal vulnerability assessment of Cape Hatteras National Seashore (CAHA) to sea-level rise. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. Open-File Report 2004-1064. 2008. <http://www.usgs.gov>
- PIMENTEL, J.; SANTOS, T.D. (Org). Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES Rio de Janeiro: CPRM/SGB, 2018.
- ROGERS, K.; WOODROFFE, C.D. Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate. **Journal Coastal Conservation**, v. 20, p. 127–144, 2016.
- ROMERO, A. F. Mapa de vulnerabilidade ambiental ao óleo e cartas SAO. Trecho: Praia Grande - Ilha Comprida, Litoral Paulista. 2009. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2009.
- RUDORFF, F.M.; BONETTI, J. Avaliação da suscetibilidade à erosão costeira de praias da ilha de santa Catarina. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, v. 14 (1), p. 9-20, 2010.
- SERAFIM, M.B.; BONETTI, J. Vulnerability of Santa Catarina beaches to coastal erosion and flooding: a methodological approach based on a multicriterial index. **Quaternary Environmental Geosciences**, v. 08, p. 36-54, 2017.
- SHARPLES, C.; MOUNT, R.; PEDERSEN, T. The Australian Coastal Smartline Geomorphic and Stability Map: manual and data dictionary. v.1.0. Report for Geoscience Australia and the Department of Climate Change by School of Geography and Environmental Studies. Hobart: University of Tasmania, 2009.
- SHARPLES, C. Indicative Mapping of Tasmanian Coastal Geomorphic Vulnerability to Sea-level Rise using GIS Line Map of Coastal Geomorphic Attributes. Explanatory Report. Tasmania: Consultant Report to department of Primary Industries & Water, 2006.

SILVEIRA, Y.G.; BONETTI, J. Assessment of the physical vulnerability to erosion and flooding in a sheltered coastal sector: Florianópolis Bay, Brazil. **Journal of Coastal Conservation**, v. 23, p. 303-314, 2019.

SMITH, K. Environmental hazards: assessing risk & reducing disaster. London: Routledge, 1992.

SOUZA,P.E.; NICOLODI, J.L. Coastal vulnerability assessment using geoindicators: case study of Rio Grande do Sul coastline. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64 (3), p. 309-322, 2016.

SZLAFSTEIN, C.F. Climate change, Sea-level rise and Coastal Natural Hazards: A GIS-Based Vulnerability Assessment, State of Pará, Brazil. Human Security and Climate Change An International Workshop Holmen Fjord Hotel, Asker, near Oslo, 2005.

WOODROFFE, C. D. The natural resilience of coastal systems: Primary concepts. In: McFadden, L.; Nicholls, R.J.; Penning-Rowsell, E.C. (Eds.). **Managing Coastal Vulnerability**. Amsterdam: Elsevier Science, 2007, p.45–60.

WRIGHT,, L.D.; SHORT, A.D. Morphodynamic variability of surf zone sand beaches: a synthesis. **Marine Geology**, v. 1, p. 93-118, 1984.

ZACHARIAS, M. A.; GREGR, E. J. Sensitivity and Vulnerability in Marine Environments: an Approach to Identifying Vulnerable Marine Areas. **Conservation Biology**, v. 19 (1), p. 86–97, 2005. DOI: 10.1111/j.15231739.2005.00148.x.

ZANETTI, V.; SOUSA Jr., W. C.; HOSOKAWA, E. K. Vulnerability of Critical Infrastructure Under Climate Change Scenarios: The Case of Santos. In book: NUNES, L. H.; GRECO, R.; MARENGO, J. A. (Eds). **Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options**. Springer. 245-251, 2019. DOI:10.1007/978-3-319-96535-2\_12

ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; SANTOS COLLARES, J.Q. Land degradation assessment based on environmental geoindicators in the Fortaleza metropolitan region, state of Ceará, Brazil. **Environ.Geol.**, v. 45 (3), p. 408-425, 2004.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).