



**PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS**



PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO
PROJETO BRA/06/032
ENQUADRAMENTO PNUD: R.1 P1.17
Carta de Acordo nº 25759/2014 (RC) – SAE – FCPC

Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas
Infraestrutura Costeira

Relatório 2/Produto 6 – IC
CARTEIRA ATUAL E FUTURA DAS INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS: INDICADORES DE PERFORMANCE
E VULNERABILIDADE

Responsável: Wilson Cabral de Sousa Junior

Brasília, 08 de dezembro de 2014

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. ESTADO ATUAL DO ESTUDO E ESCOPO DO RELATÓRIO	2
3. Levantamento e coleta de dados e informações para o indicador de Vulnerabilidade Costeira...4	
3.1. Modelo digital de terreno.....	5
3.2. Geotecnia, geomorfologia e ou pedologia	5
As cartas geotécnica e geomorfológica do Rio de Janeiro/RJ foram obtidas junto ao IPP e estão sendo introduzidas na base de dados.....	5
3.3. Mapeamento de usos do solo/cobertura da Terra e zoneamento urbano	6
3.4. Dados censitários	6
3.5. Delimitação política e série histórica de precipitação	6
3.6. Dados de variação do nível do mar e amplitude de marés	7
4. Infraestrutura portuária: elementos de análise	9
4.1. Exposição das infraestruturas costeiras aos riscos climáticos	9
4.1.1. Variações do nível do mar e formas de medida	9
4.1.2. Medições de maré no Brasil	13
4.1.3. Medições e dados de ondas	16
4.1.3.1. O modelo WAVE WATCH III.....	17
4.1.3.2. O modelo ERA-40	22
5. Fatores de vulnerabilidade para infraestrutura portuária e adaptação	24
6. Infraestrutura portuária brasileira: carteira atual e futura em análise	27
6.1.1. Porto de Belém/PA.....	30
6.1.2. Porto de Mucuripe (Fortaleza/CE)	31
6.1.3. Porto de Recife/PE	32
6.1.4. Porto de Maceió/AL	34
6.1.5. Porto do Malhado (Ilhéus/BA).....	35
6.1.6. Porto de Barra do Riacho (Aracruz/ES).....	35
6.1.7. Porto de Tubarão (ES).....	37
6.1.8. Embocadura de Saquarema (RJ)	37
6.1.9. Porto de Niterói (RJ)	38
6.1.10. Porto do Rio de Janeiro (RJ).....	40
6.1.11. Porto de São Sebastião (SP)	41
6.1.12. Porto de Santos (SP)	42
6.1.13. Porto de Paranaguá (PR).....	43
6.1.14. Porto de Imbituba (SC).....	45
6.1.15. Porto de Rio Grande (RS).....	45
6.1.16. Síntese das características principais dos portos	46

7. Exposição e vulnerabilidade atual e futura das infraestruturas portuárias: ensaios a partir da projeção da série histórica de marés	50
8. Necessidades de análise e desdobramentos do estudo.....	56



1. INTRODUÇÃO

O projeto “BRASIL 3 TEMPOS” BRA/06/032, executado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE/PR), tem como objetivo desenvolver estratégias e ações nacionais que subsidiem o governo na formulação e implementação de políticas públicas de longo prazo que promovam o crescimento econômico do país, acompanhado de inclusão social. Essas ações estão sendo realizadas por meio de estudos, produtos e eventos sobre temas de importância para o planejamento estratégico brasileiro, tendo como eixos temáticos: a infraestrutura urbana, a infraestrutura costeira, o setor energético, a disponibilidade hídrica, a agricultura e os transportes cotejados com a dimensão climática.

O presente relatório é produto do eixo **Infraestrutura Costeira** do projeto Brasil 3 Tempos, em desenvolvimento pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, por meio da Fundação Casimiro Montenegro Filho – FCMF. Este eixo contém duas abordagens: i) o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental da costa brasileira, a partir do desenvolvimento de um indicador compreensivo; e ii) a análise da vulnerabilidade da infraestrutura portuária brasileira sob cenários de elevação do nível do mar. Tais iniciativas estão sendo levadas a cabo em diferente cronologia, uma vez que dependem de dados secundários de origem diversa.

O próximo item descreve o atual estado de levantamento de dados e informações, além do desenvolvimento de cada abordagem.

2. ESTADO ATUAL DO ESTUDO E ESCOPO DO RELATÓRIO

Este relatório apresenta a consolidação de escopo metodológico e o resultado preliminar do levantamento de dados para os estudos envolvendo a **infraestrutura costeira** brasileira, com focos na infraestrutura portuária e em análise de vulnerabilidade costeira, diante de cenários de mudanças climáticas obtidos a partir de dados gerados pelos modelos climáticos regionais contratados pela SAE/PR junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Este relatório é complementar, portanto trata de uma continuidade em relação ao primeiro relatório.

Conforme estabelecido no cronograma de projeto, esta etapa teria como produto:



“Categorização da carteira atual e futura das infraestruturas costeiras; desenvolvimento de um conjunto de indicadores representativos da análise de performance das infraestruturas costeiras; elaboração de Relatório técnico descritivo (do panorama atual e futuro) com informação georreferenciada das infraestruturas costeiras e conjunto de indicadores analisados, em conformidade com o Termo de Referência”.

A categorização da carteira atual das infraestruturas costeiras, para fins de análise da infraestrutura portuária é apresentada neste relatório. Já para fins de vulnerabilidade costeira, será realizada a partir do mapeamento de uso e ocupação do solo das localidades em estudo, em obtenção pela atividade de levantamento e coleta de dados e informações. É esta informação secundária que permitirá definir o portfólio de infraestrutura a ser considerado no estudo. Já a projeção da carteira futura será baseada em projeções de crescimento associadas aos Planos Diretores dos municípios envolvidos (sobre os métodos, vide o item 5.4 do Relatório 1 e Anexo de Complementação Metodológica).

Tendo em vista os tempos de coleta e as dificuldades na obtenção dos dados secundários para a categorização das carteiras atual e futura das infraestruturas, para fins de análise de vulnerabilidade da costa brasileira¹, optou-se por **avançar no delineamento metodológico do Indicador de Vulnerabilidade Socioambiental à mudanças climáticas da Costa Brasileira (IVCB)**. Já para a infraestrutura portuária, o **escopo foi ampliado, bem como são apresentados alguns elementos para a análise da vulnerabilidade destas estruturas, como esforço analítico preliminar, embora os resultados desta análise estejam previstos para o Relatório 3 (Produto 7-C)**.

De acordo com o apontado no Relatório 1 (Produto 5-IC), acerca do escopo preliminar do estudo, este envolve algumas regiões críticas, apontadas no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais 2012-2014. Dentre as localidades constantes neste Plano, foram inicialmente selecionadas as regiões da Baixada Santista, Rio de Janeiro ou Baixada Fluminense, além das regiões metropolitanas de Fortaleza, Salvador e Recife, e suas infraestruturas portuárias, como objeto de

¹ Vide no Anexo 1 deste relatório um descritivo do processo de levantamento de dados e informações secundárias deste estudo.

prospecção preliminar.

3. Levantamento e coleta de dados e informações para o indicador de Vulnerabilidade Costeira

No que concerne ao IVCB, o levantamento e coleta de dados e informações aponta, até o momento, a consolidação dos dados e informações para o município do Rio de Janeiro/RJ, para o qual já está sendo aplicado o indicador (não há registro de dados suficientes para a Baixada Fluminense). Há indicação da existência da completude dos dados para a Baixada Santista, porém os dados ainda não foram disponibilizados e, portanto, não conhecemos sua qualidade, integridade e abrangência. Para o município de Salvador, embora a base de dados ainda esteja insuficiente, há indicações da existência de boa parte dos dados necessários, os quais estão sendo coletados e serão analisados. Já em relação aos dados e informações referentes aos municípios de Fortaleza e Recife, não há ainda indicações da suficiência para os objetivos do estudo, motivo pelo qual há que se analisar melhor sua inclusão no escopo final².

De forma a orientar as investigações e resultados finais para prospecção de dados e melhor delineamento metodológico, a busca inicial para formação de base de dados foi concentrada nos seguintes dados e informações:

- modelo digital de terreno;
- Mapas geotécnicos, geomorfológicos e ou pedológicos;
- Mapas de uso e ocupação do solo;
- Dados cadastrais e mapas de setores censitários;
- Mapas político-administrativos;
- Séries históricas de precipitação;
- Mapas de zoneamento urbano;
- Dados de maré (amplitude);
- Projeções de elevação do nível do mar.

² Em princípio, e para fins da continuidade dos trabalhos, estes dois municípios estarão fora do escopo, situação esta que pode ser alterada caso os dados sejam suficientes e estejam disponibilizados em tempo compatível com a agenda deste estudo.

A escolha definitiva das localidades de estudo depende da pré-existência e disponibilidade dos dados necessários.

Nessa etapa, destacam-se os obstáculos para acesso a esses dados. Disponibilização de informações que são imprecisas para determinados eventos, ou simplesmente inexistem, são algumas das barreiras encontradas. Uma síntese do levantamento destes dados e informações é apresentada na Tabela 1.

3.1. Modelo digital de terreno

Foram obtidos dados para o município do Rio de Janeiro/RJ em boa resolução (5 metros), junto ao Instituto Pereira Passos (IPP). Já para as cidades de Salvador, Recife e Fortaleza, esses dados estão disponibilizados no sítio eletrônico da EMBRAPA, com resolução horizontal de 90 m.

Para o município de Santos, há informação da existência de dados de MDE gerados por levantamento com LIDAR e resolução espacial de 10 metros. Estes dados serão analisados e coletados em reunião com a equipe da Prefeitura de Santos no dia 06/jan/2015.

3.2. Geotecnia, geomorfologia e ou pedologia

As cartas geotécnica e geomorfológica do Rio de Janeiro/RJ foram obtidas junto ao IPP e estão sendo introduzidas na base de dados.

Para o município de Santos, há informação da existência de mapas geotécnicos e geomorfológicos, além de modelos de superfície, com boa resolução espacial e atualização. Estes dados serão analisados e coletados em reunião com a equipe da Prefeitura de Santos no dia 06/jan/2015.

Para os municípios de Salvador, Recife e Fortaleza, não foram identificadas referências para obtenção de mapeamento geotécnico e geomorfológico.

3.3. Mapeamento de usos do solo/cobertura da Terra e zoneamento urbano

Para a região do Rio de Janeiro, esses dados foram obtidos do sítio eletrônico do Comitê de Bacia da Baía de Guanabara.

Há informações sobre a existência de mapeamento do uso do solo e zoneamento urbano de 2011, georreferenciado em Datum SAD 69. Estes dados serão analisados e coletados em reunião com a equipe da Prefeitura de Santos no dia 06/jan/2015.

Os dados de uso e ocupação de Salvador, enviados pela Prefeitura Municipal, referem-se a um levantamento geral realizado para o Estado da Bahia.

As informações de uso e ocupação do solo de Fortaleza foram disponibilizadas apenas em formato PDF, de baixa resolução. Já para o município de Recife não foi identificado estudo atualizado de uso/ocupação do solo.

Um dado importante, a ser utilizado como opção à ausência de projeções de expansão baseadas nos mapas de uso e ocupação do solo, é o mapeamento do zoneamento urbano. Trata-se de estratégia alternativa para identificar o estado futuro da infraestrutura da zona costeira, a ser exposta a agentes de mudanças climáticas. Embora esta informação não esteja disponível para todas as localidades, já foram identificadas e contatadas as Prefeituras de Santos, Rio de Janeiro e Fortaleza, as quais devem encaminhar em breve tais mapas.

3.4. Dados censitários

Os dados censitários de todas as regiões em análise, originários do IBGE, foram obtidos por meio do Centro de Estudos da Metrópole, sediado na USP.

Os mapas de setores censitários foram obtidos diretamente junto ao sítio eletrônico do IBGE, em formato georreferenciado.

3.5. Delimitação política e série histórica de precipitação

Para essas regiões de estudo, a delimitação política foi obtida do sítio eletrônico da ANA, por meio do banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas. As séries históricas de precipitação diária foram obtidas do mesmo banco de dados da ANA. Os

dados de projeção da precipitação, para cada região, serão oriundos do estudo sobre a infraestrutura de drenagem urbana, em desenvolvimento, a partir de simulações do modelo Eta.

3.6. Dados de variação do nível do mar e amplitude de marés

Para uma análise preliminar, serão utilizados dados de projeção da elevação do nível do mar baseados em comportamento da série histórica, a serem fornecidos pelo grupo de estudos da infraestrutura portuária. Já as referências para os dados de simulação das variações futuras do nível do mar serão obtidas junto ao Sistema de Modelagem Costeira – SMC Brasil, sob iniciativa do Ministério do Meio Ambiente. Tais dados estão sendo solicitados diretamente aos gestores do SMC Brasil, objeto de parceria com a Universidade da Cantábria, na Espanha.

Já os dados de amplitudes de maré estão calculados a partir das Tábuas de Maré, fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira (DHN).

Tabela 1. Situação de levantamento de dados (em fundo vermelho, os dados ainda sem referência).

Localidade	Modelo digital de elevação do terreno	Carta geotécnica	Carta geomorfológica	Mapas de usos do solo e cobertura da Terra	Dados pluviométricos	Dados de tendência de variação do nível do mar	Dados de amplitude de maré	Mapas dos setores censitários	Dados populacionais (renda, idade, escolaridade e população total por setor censitário)
Santos	Pendente de envio ¹	Pendente de envio ¹	Pendente de envio ¹	Pendente de envio ¹	Dado coletado	Solicitados ao SMC Brasil ²	Origem identificada, em obtenção	Dado coletado	Dado coletado
Rio de Janeiro	Dado coletado - resolução 5m	Dado coletado	Dado coletado	Dado coletado	Dado coletado	Solicitados ao SMC Brasil ²	Calculado a partir das Tábuas de Maré	Dado coletado	Dado coletado
Recife	Dado coletado - 90m (baixa resolução)	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Dado coletado	Solicitados ao SMC Brasil ²	Origem identificada, em obtenção	Dado coletado	Dado coletado
Fortaleza	Dado coletado - 90m e pts cotados (baixa resolução)	Sem informação	Sem informação	Dado coletado - apenas PDF	Dado coletado	Solicitados ao SMC Brasil ²	Origem identificada, em obtenção	Dado coletado	Dado coletado
Salvador	Dado coletado - 90m (baixa resolução)	Sem informação	Dado coletado - Estado da Bahia (baixa resolução)	Dado coletado - Estado Bahia (baixa resolução)	Dado coletado	Solicitados ao SMC Brasil ²	Origem identificada, em obtenção	Dado coletado	Dado coletado

Notas: 1) Há reunião prevista para o dia 06/jan/2015 para levantamento e cessão dos dados; 2) Sistema de Modelagem Costeira (MMA, 2014)

A abordagem sobre “Infraestrutura Portuária” é apresentada a seguir, com uma complementação metodológica, e resultados preliminares do estudo.

4. Infraestrutura portuária: elementos de análise

4.1. Exposição das infraestruturas costeiras aos riscos climáticos

O IPCC, define exposição como sendo a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções, serviços e recursos naturais, infraestrutura ou ativos econômicos, sociais ou culturais em lugares e entornos que possam ver-se adversamente afetados por fenômenos relacionados à mudança do clima.

Este estudo analisa a exposição das infraestruturas portuárias a partir de 2 fenômenos:

- Variações do nível do mar;
- Interação vento-onda/clima de ondas.

Os impactos às infraestruturas portuárias, em termos de exposição à variação do nível do mar e clima de ondas, em análise são:

- A perda de borda livre, a partir das variações do nível do mar; e
- O impacto sobre molhes e outras estruturas de contenção, a partir do clima de ondas.

4.1.1. Variações do nível do mar e formas de medida

As medições de nível do mar contêm informações de várias variáveis, isto é, variam em correspondência a um conjunto grande de variáveis:

- Variação astronômica, devido à Lua e Sol (marés astronômicas) e ao posicionamento de longo termo das órbitas dos planetas (causador das Glaciações) em relação à Terra;
- Variação eustática, devido ao aumento, ou diminuição, do volume de água doce;
- Variação halostérica, devido à alteração da salinidade decorrente da variação do volume da água doce do mar;

- Variação estérica, devida à mudança de temperatura pelo aquecimento, ou esfriamento, da água do mar;
- Variação crustal, devida à alteração do nível da crosta em relação ao Centro da Terra.
- Variação atmosférica, devido à mudança de pressão atmosférica, aos ventos, e outras. É também conhecida como maré meteorológica.
- Variação oceanográfica, devida às ondas e correntes oceânicas.

Estas variáveis, dentre outras, definem o nível relativo do mar, isto é quando a referência de cota é assumida com relação a pontos fixos na crosta, como no caso das obras de Engenharia Portuária.

Até a década de 1960, a consideração de um nível relativo do mar quase-estático, ou imutável, era assumida muito frequentemente em várias aplicações práticas da escala temporal típica das obras de Engenharia Portuária, que consideram obras com vida útil minimamente de 50 anos (ABNT, 1995), mas mais frequentemente superior a 100 anos.

Na costa do Brasil foram e são poucas as estações permanentes do Serviço Permanente para o Nível do Mar (PSMSL), órgão da Associação Internacional para as Ciências Físicas dos Oceanos (IAPSO), criado em 1933, e destinado a coletar e distribuir a todos os interessados dados de nível do mar. Naquela época já era percebida a elevação relativa do nível do mar, o que justificou a criação da organização. Uma das razões para as poucas estações foi a de que em poucas localidades o nível relativo do mar havia sido medido por período maior do que 20 anos. Esse período de tempo mínimo justifica-se pelo ciclo astronômico de 18,6 anos da Lua cruzando a eclíptica no mesmo ponto.

Na Figura 1 ilustram-se curvas de variação de nível do mar de distintos autores utilizando as séries do PSMSL.

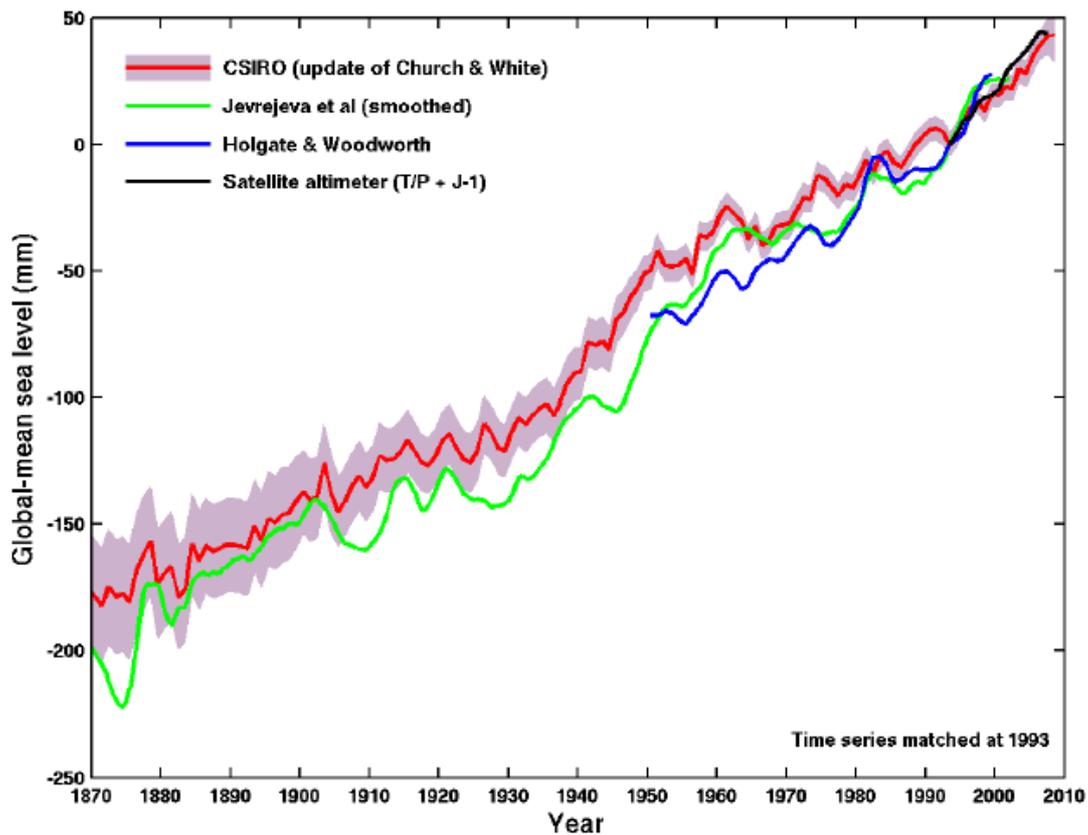


Figura 1. Curvas de variação de nível do mar de distintos autores utilizando as séries do PSMSL. Fonte: WOODWORTH (2011).

No esforço de ampliar as séries históricas, retrocedendo a tempos pretéritos à utilização dos marégrafos, têm sido utilizados métodos não convencionais indiretos de estimativa do nível médio do mar. Nesta linha pode-se citar a correlação arqueológica com indicadores de microfósseis foraminíferos enterrados em colunas de turfa em páleo terras úmidas de pântanos salgados, como ilustrado na Figura 2.

Handwritten signature

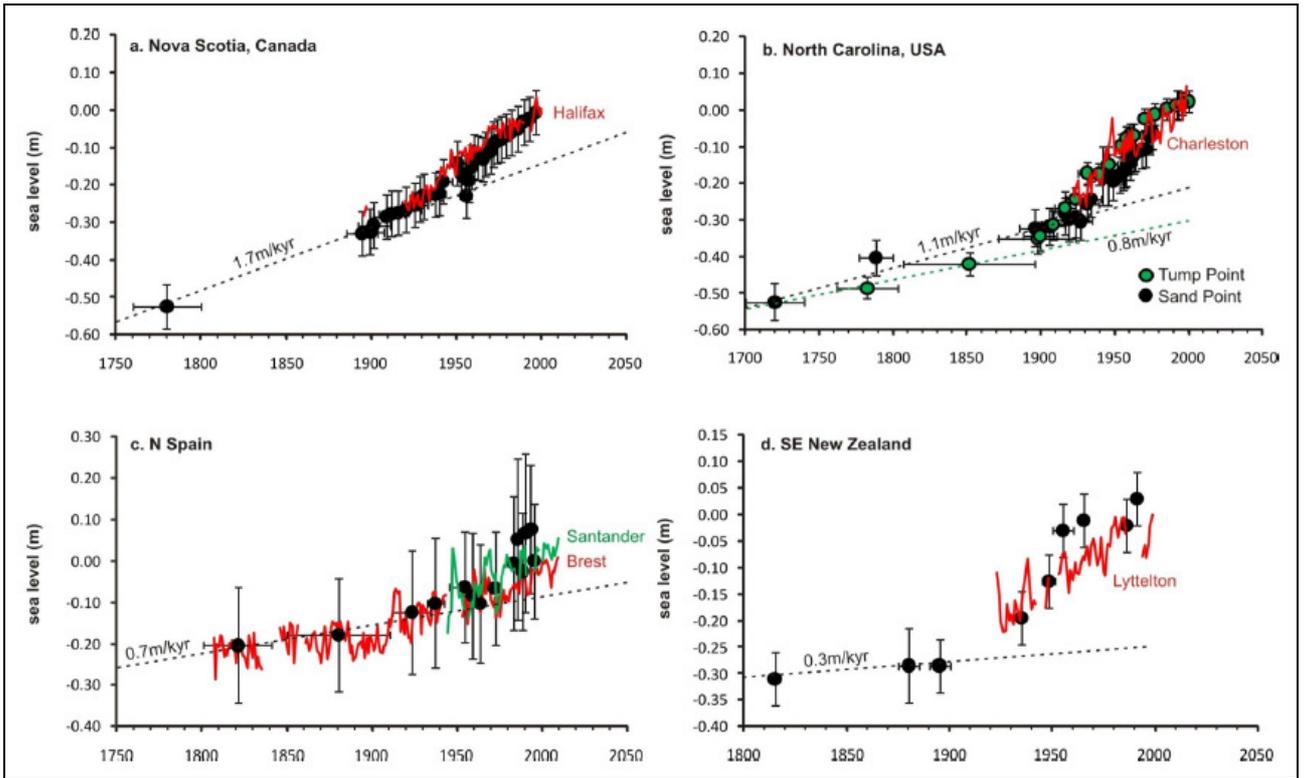


Figura 2. Estimativa da variação do nível médio do mar com base em correlação arqueológica. Fonte: WOODWORTH (2011).

Finalmente, devem ser consideradas as metodologias para realizar as projeções dos futuros níveis do mar. Na Figura 3 evidenciam-se as duas famílias de processos para realizar estas estimativas, que são os semi-empíricos e os modelos climatológicos.

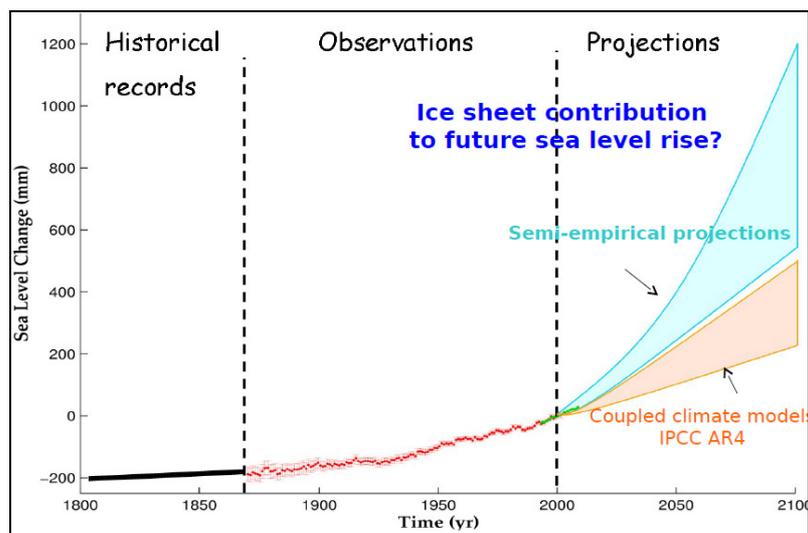


Figura 3. Evolução do nível médio do mar global desde 1800. Fonte: WOODWORTH (2011).

Handwritten signature

4.1.2. Medições de maré no Brasil

Na localidade de Cocal, Município de Uruçanga, Santa Catarina, em 13 de outubro de 1945, o IBGE, através da Seção de Nivelamento - SNI, do antigo Conselho Nacional de Geografia, deu início à medição da sua Rede de Nivelamento Geodésico. Até então não existia no Brasil uma superfície de referência a partir da qual fossem calculadas as altitudes, ou seja, não havia sido adotado ainda, oficialmente, um Datum Altimétrico Brasileiro, traduzido pelo nível médio do mar em alguma localidade.

O Datum Altimétrico Brasileiro foi referido em 1958 ao marégrafo do Porto de Imbituba (SC), que contava na época com 9 anos de observações maregráficas (1949-1957), sob a supervisão e manutenção do Inter American Geodetic Survey – IAGS. Essa instituição norte-americana cuidava também dos marégrafos do Rio de Janeiro, Canavieiras, Salvador, Recife, Fortaleza e Belém.

Na Figura 4 é apresentada uma comparação entre o registro de Imbituba e outros 17 marégrafos, relacionados em ordem decrescente de latitude, todos conectados com a Rede de Nivelamento. O sinal positivo indica que o plano do nível médio do mar registrado pelas observações do marégrafo local é mais alto do que o determinado em Imbituba, e transportado pelo nivelamento, abstraído o erro nesse transporte. Nota-se que entre Imbituba e Salvador a discrepância entre esses dois marégrafos é de apenas 11,3 mm, o que pode ser atribuída ao transporte no nivelamento. De Salvador até Salinópolis, passando por Recife e Fortaleza, a variação apresenta-se muito uniforme, obedecendo quase que uma linha reta e acusando uma divergência de + 0,6422 m em Salinópolis.

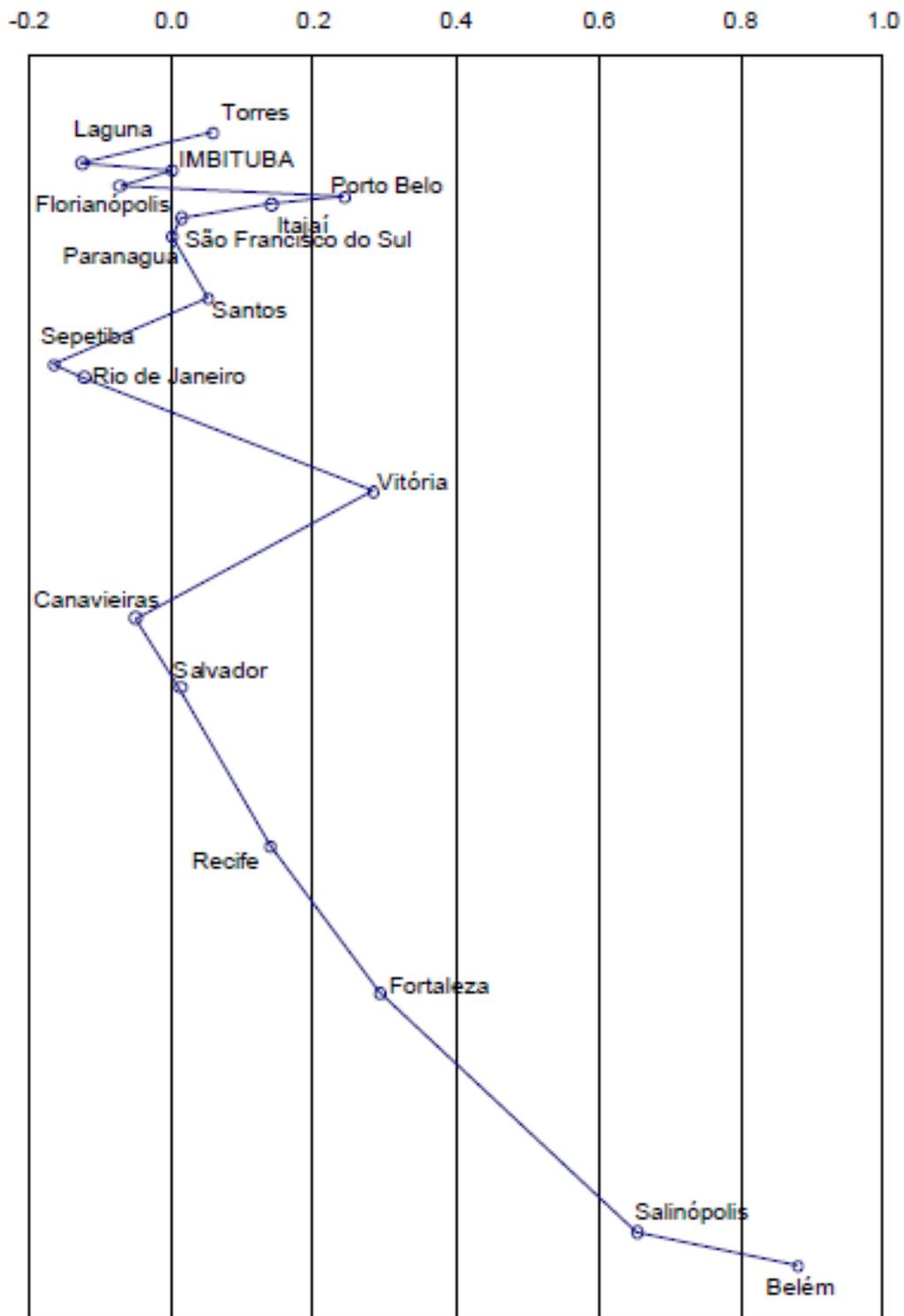


Figura 4. Comparativo do nível médio do mar referido ao marégrafo de Imbituba (SC).
 Fonte: ALENCAR (1990).

A partir das séries de valores médios anuais de maré, são calculados os valores da tendência, inclinação da reta indicativa da variação relativa do nível do mar de cada série. Como se pode ver na Figura 5, os dados maregráficos de nível relativo do mar

Alf

em vários portos da costa brasileira indicam que o nível relativo do mar aumentou, a partir de 1950, numa taxa aproximada de 40 cm/século (4 mm/ano).

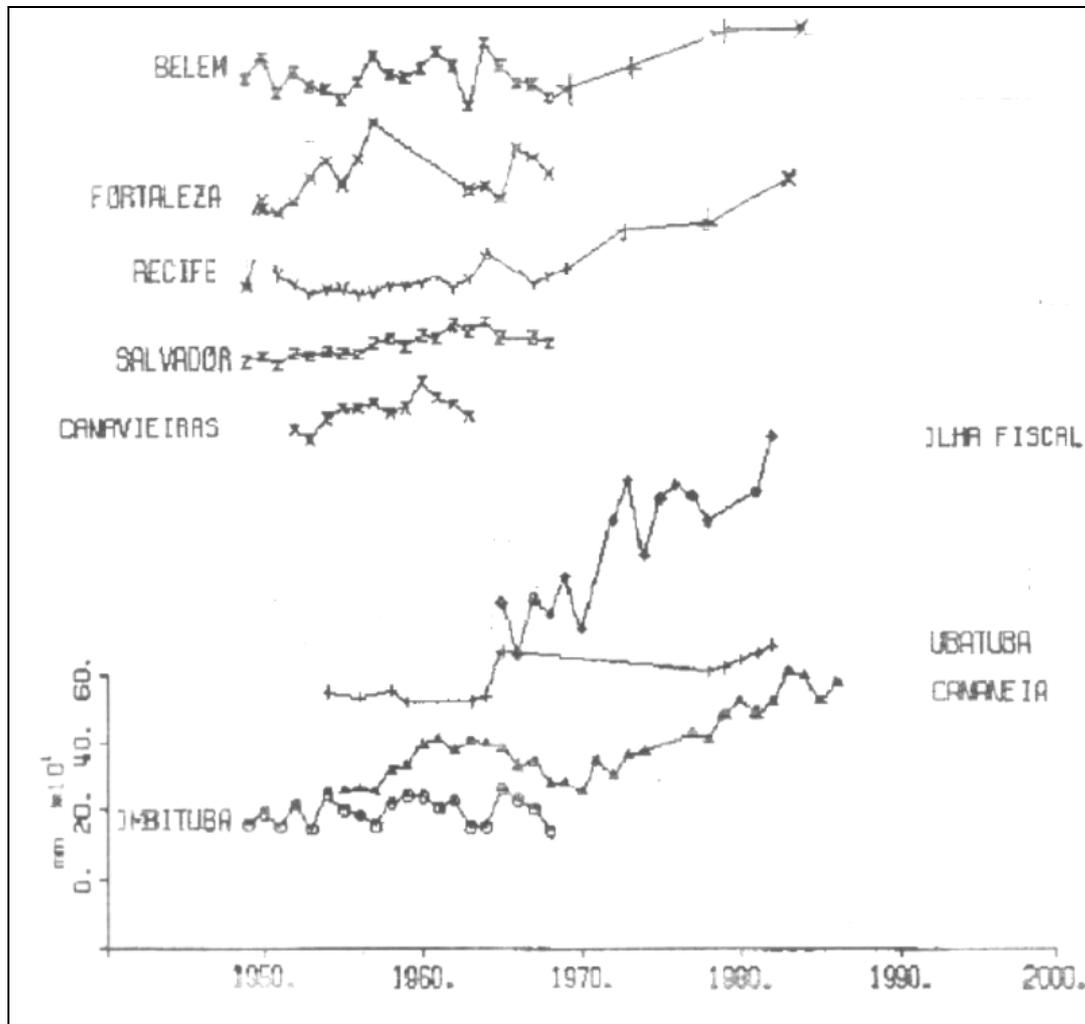


Figura 5. Dados de nível do mar registrados em marégrafos na costa brasileira.
Fonte: MESQUITA (2009).

A despeito da complexidade de entendimento sobre a razão de variação do nível global dos oceanos, não há dúvida que o nível relativo do mar está aumentando no litoral brasileiro. É de se observar que as estações de Fortaleza, Salvador, Canavieiras e Imbituba foram descontinuadas ao final da década de 1960. Também deve-se mencionar a estação maregráfica do Porto de Santos, que não consta desta figura.

4.1.3. Medições e dados de ondas

Na costa brasileira não existem longas séries de registros contínuos de dados ondográficos. Assim, as avaliações que serão realizadas neste relatório utilizarão modelos matemáticos de clima de ondas globais, que a partir de informações das condições de pressões atmosféricas e de ventos geram os parâmetros básicos das ondas, ou seja: altura, período e rumo de propagação. O gráfico da Figura 6 ilustra a correlação física entre vento e onda.

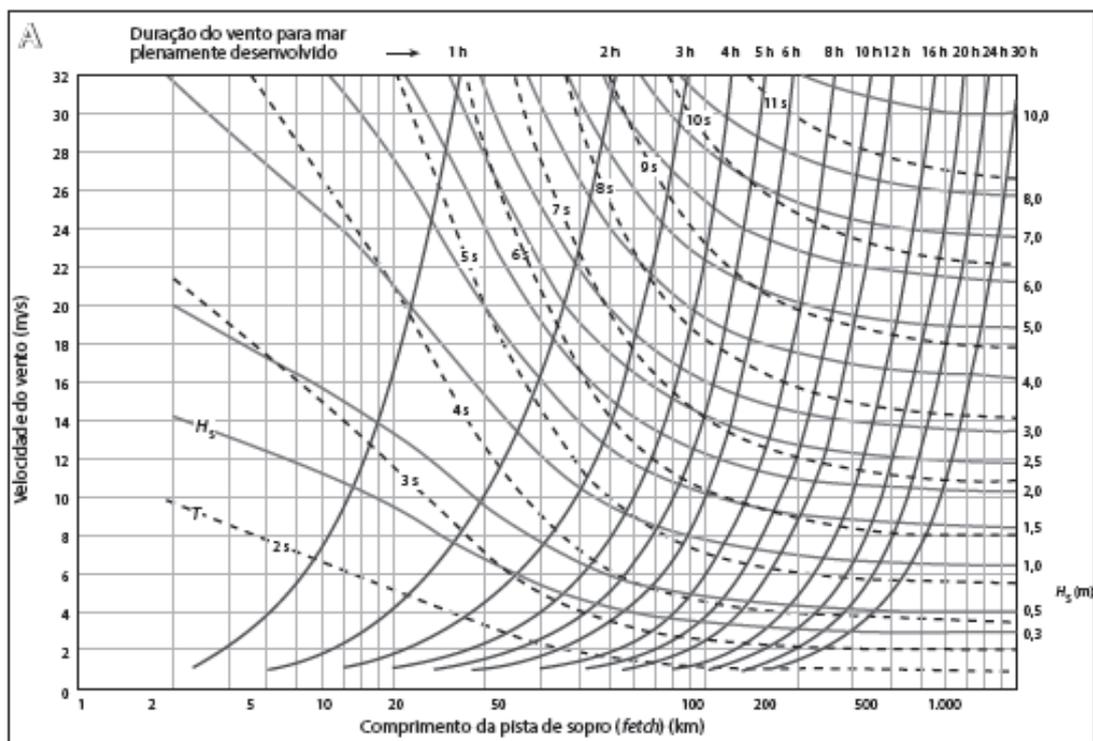


Figura 6. Estimativa das características da agitação em águas profundas por ação do vento. Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

Tais modelos de clima de ondas globais possuem ajustes em escala oceanográfica, no entanto para serem utilizados em escala náutica junto à costa necessitam de calibrações a partir de medições locais de pelo menos um ano. Deste modo, torna-se possível efetuar uma reconstituição do mar pretérito (*hindcasting*), gerando uma série que pode iniciar na década de 1950, tendo maior precisão a partir da década de 1980, em função dos avanços na transmissão dos dados dos satélites meteorológicos.

Dentre os modelos de clima de ondas globais mais utilizados estão o Wave Watch III da NOAA, norte-americano, e o ERA-40 do ECMWF, europeu.

Neste relatório foram utilizadas bases de dados de ondas medidas nas proximidades dos seguintes portos: Recife, Maceió, Barra do Riacho, Tubarão, Saquarema e Santos.

4.1.3.1. O modelo WAVE WATCH III

Os modelos numéricos de interação vento-onda apresentam diferentes classificações, dividindo-se em primeira ou terceira geração e em modelos de ondas profundas, rasas ou de Boussinesq, referentes às aproximações utilizadas nas equações do movimento.

Modelos de terceira geração representam, em duas dimensões, todos os processos físicos de transferência de momentum entre o vento e o oceano, ambos relevantes de um mar em estado completamente desenvolvido. A aproximação de águas profundas consiste em assumir que o comprimento de onda é muito maior do que a sua altura. Assim, a equação de onda é dada pela teoria de Airy, ou linear.

O modelo WAVEWATCH III® (WW3), desenvolvido pela agência americana National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), em parceria com o National Climate for Environmental Prediction (NCEP), consiste em um modelo de águas profundas de terceira geração (NOAA, 2014; TOLMAN, 2014).

O WW3 é forçado apenas pelo vento e resolve a equação linear do balanço de energia da ação espectral em função do número de onda e da direção. Sua física inclui os processos de geração de energia, dissipação devido à quebra de ondas e fricção com o fundo, refração, advecção e interações onda-onda quádruplas. Entretanto, tal modelo não é apropriado para regiões cuja profundidade seja menor que 40m, pela não consideração das interações não lineares triplas que dominam a propagação das ondas em águas rasas (PIUMBINI, 2009; TOLMAN, 2014).

A versão do WW3 utilizada no presente relatório foi a mais atual disponível pela NOAA (3.14). Os dados adquiridos são de rodadas globais para o período de 1979 até 2009,



forçados pelos modelos de vento do NCEP. Estes dados têm resolução espacial de 0,5º e temporal de 3h e referem-se à altura significativa, período e direção de pico.

O software R (Versão 3.0.3) foi utilizado para a análise de dados de altura, direção e período de onda, bem como para a análise de eventos extremos e análise dos fenômenos climáticos envolvidos. Tal software é usado para a realização de cálculos numéricos e científicos e possibilita a realização de qualquer tipo de operação com dados na forma de matriz, como processamento de sinais, construções de gráficos em 2D e 3D, entre outros.

A seguir são exemplificadas saídas obtidas com estes procedimentos.

Na Figura 7 são apresentadas as ocorrências de direções de onda de uma localidade ao longo do período do banco de dados. Os meses estão representados no eixo horizontal e as direções no eixo vertical, sendo que as cores representam o número de registros para cada time step (180 minutos) do modelo WW3, ou seja para cada 3h, cada cor representando o número de ocorrências de cada uma das direções durante os 30 anos analisados.



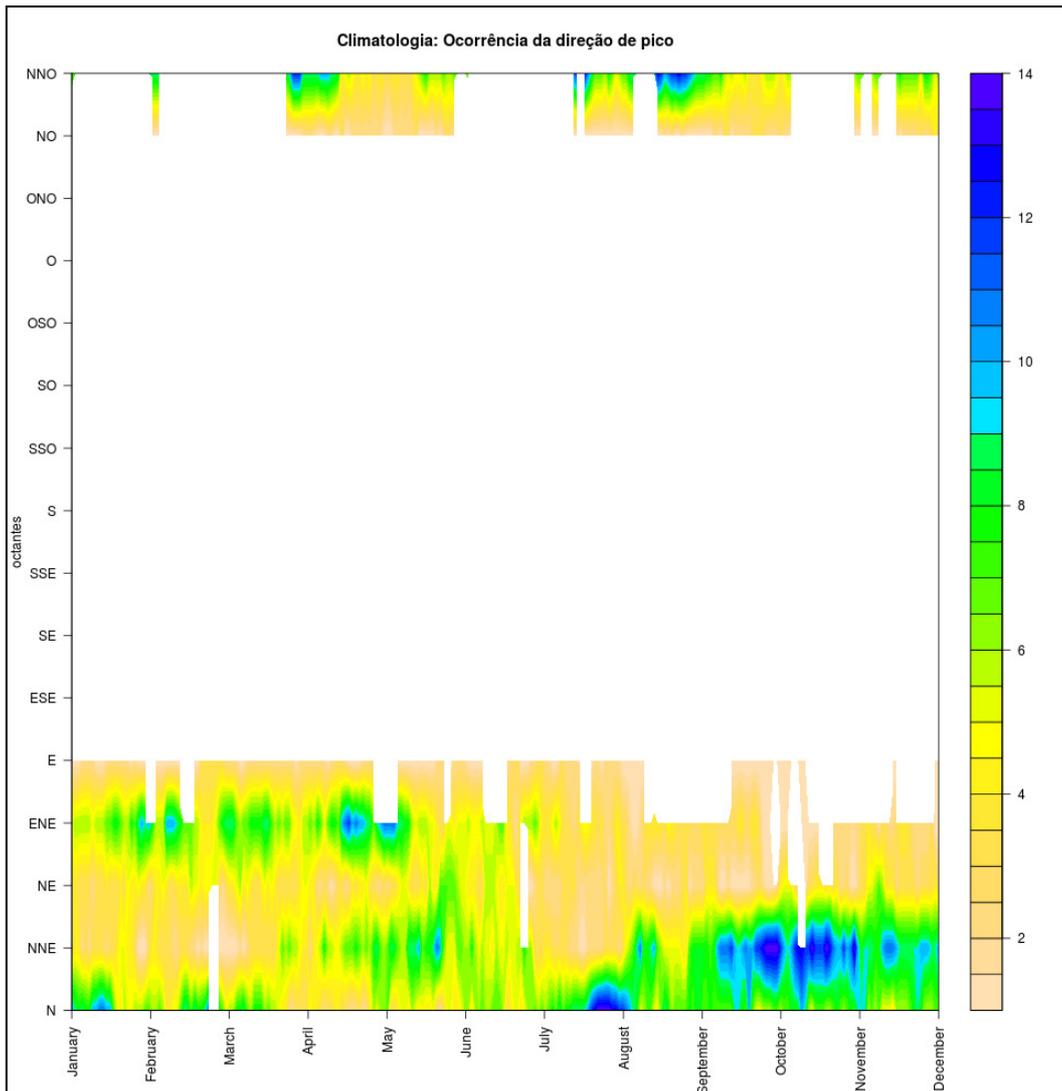


Figura 7. Climatologia das ocorrências de cada uma das direções para os meses do ano.

Observa-se que as ondas ocorrem de leste a noroeste, com padrão sazonal em que as ondas provêm principalmente de leste-nordeste durante os meses de janeiro a maio e de norte-nordeste durante o período de junho a dezembro.

Na Figura 8 pode-se visualizar a variação da altura significativa com média, desvio-padrão, máximos e mínimos registrados para cada *time step* do modelo. A altura média encontrada ao longo do período analisado foi de 1,9 m, e sua variação sazonal é observada entre os períodos de janeiro a maio e maio a novembro, com alturas significativas relativamente menores no primeiro período. Essa mesma sazonalidade pode ser observada para os valores mínimos e máximos de alturas significativas. A máxima altura encontrada foi de 4,27m em fevereiro e a mínima de 0,74m em

Alfieri

outubro. O mínimo do primeiro time *step* de janeiro observado na figura ocorre devido ao primeiro valor ser sempre nulo na modelagem numérica.

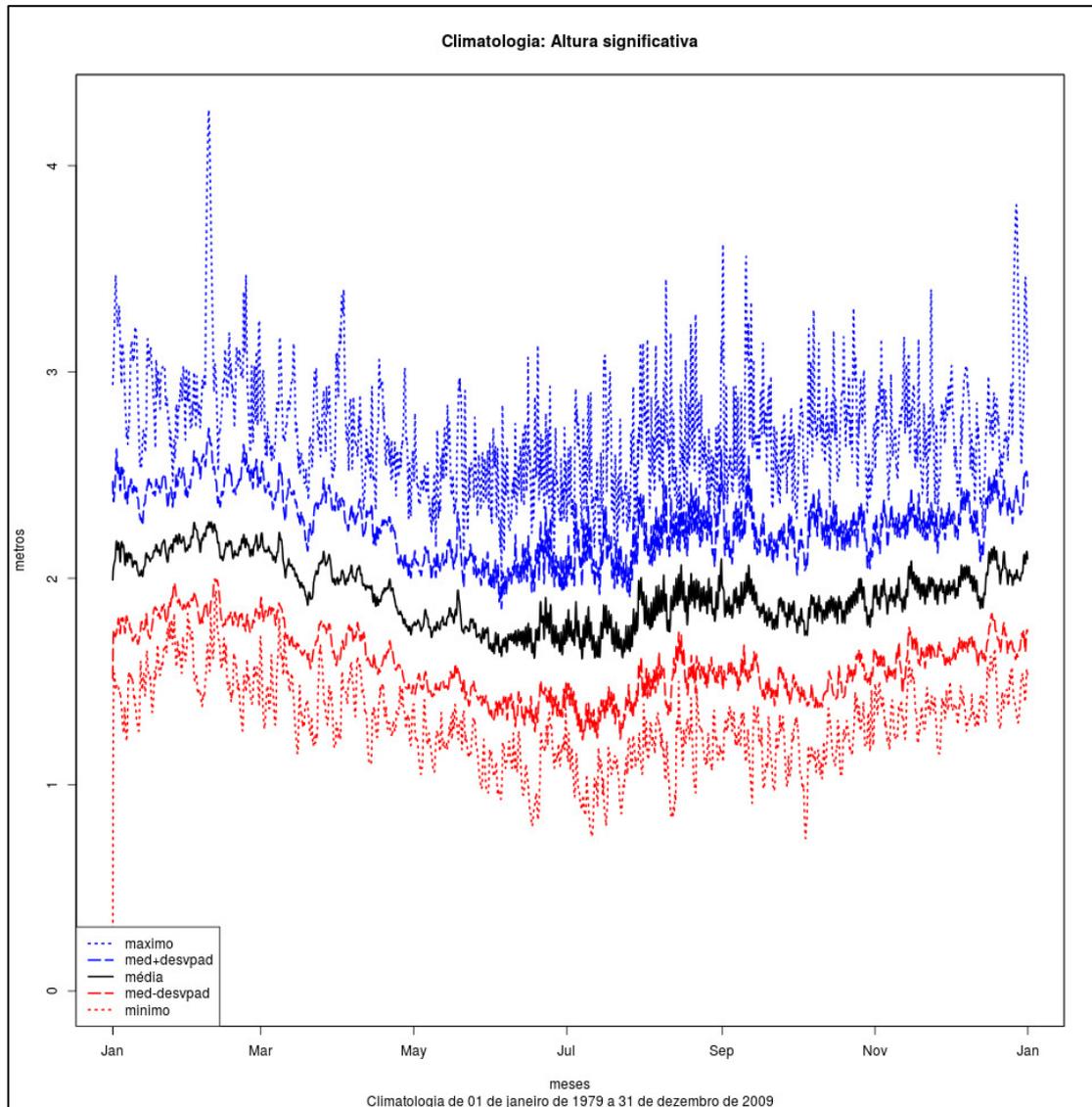


Figura 8. Variação climatológica da altura significativa de onda.

O período de pico de ondas, analogamente às duas figuras anteriores, pode ser visualizado na Figura 9. Neste caso, a variação sazonal é mais evidente para os mesmos períodos supracitados, com período máximo encontrado de 20,7s e médio de 9,3s.

Alf

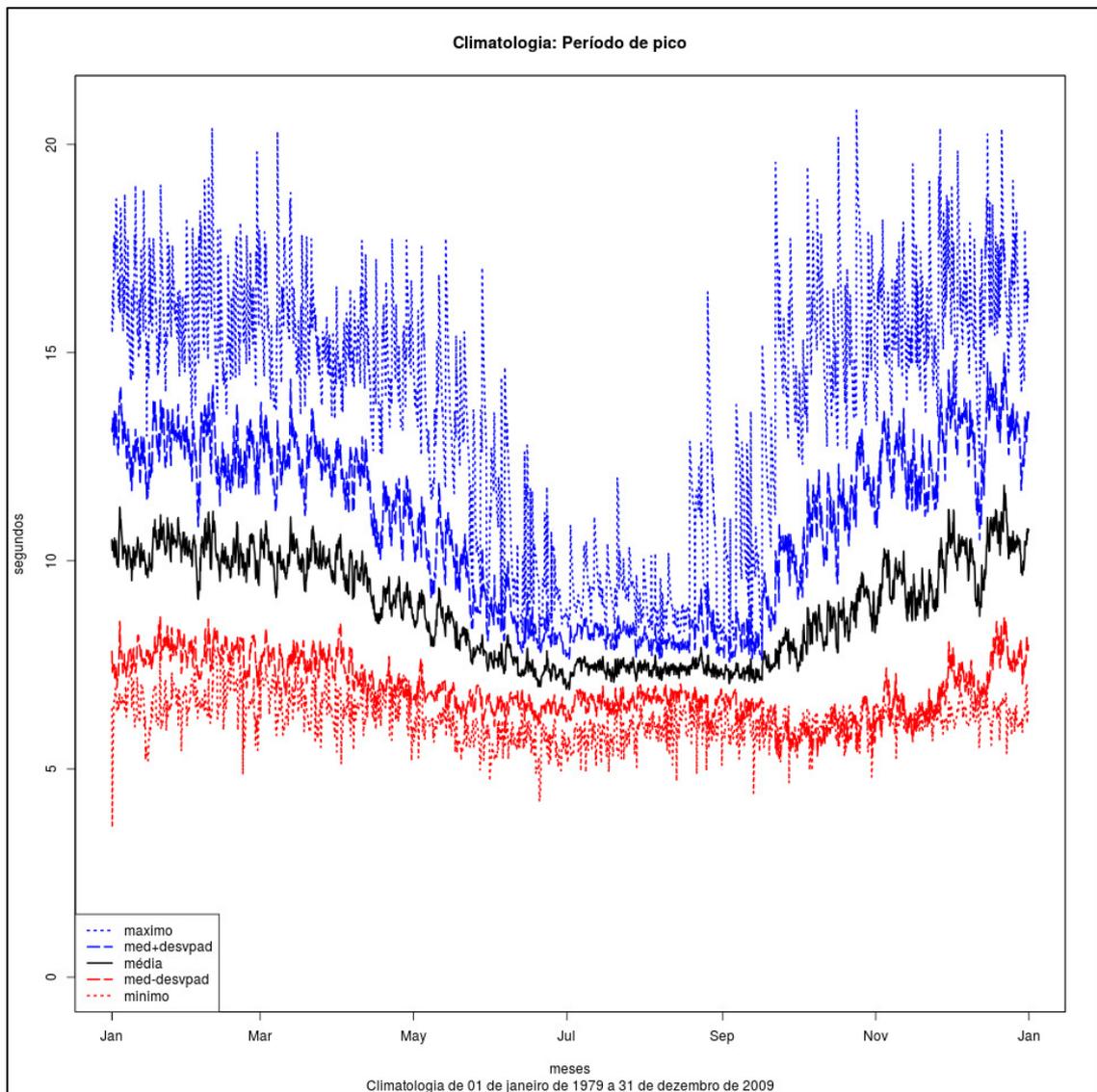


Figura 9. Variação climatológica do período de onda.

Na Figura 10 pode ser visualizada a série temporal das alturas significativas de onda ao longo do período analisado (1979 a 2009).

de Jesus

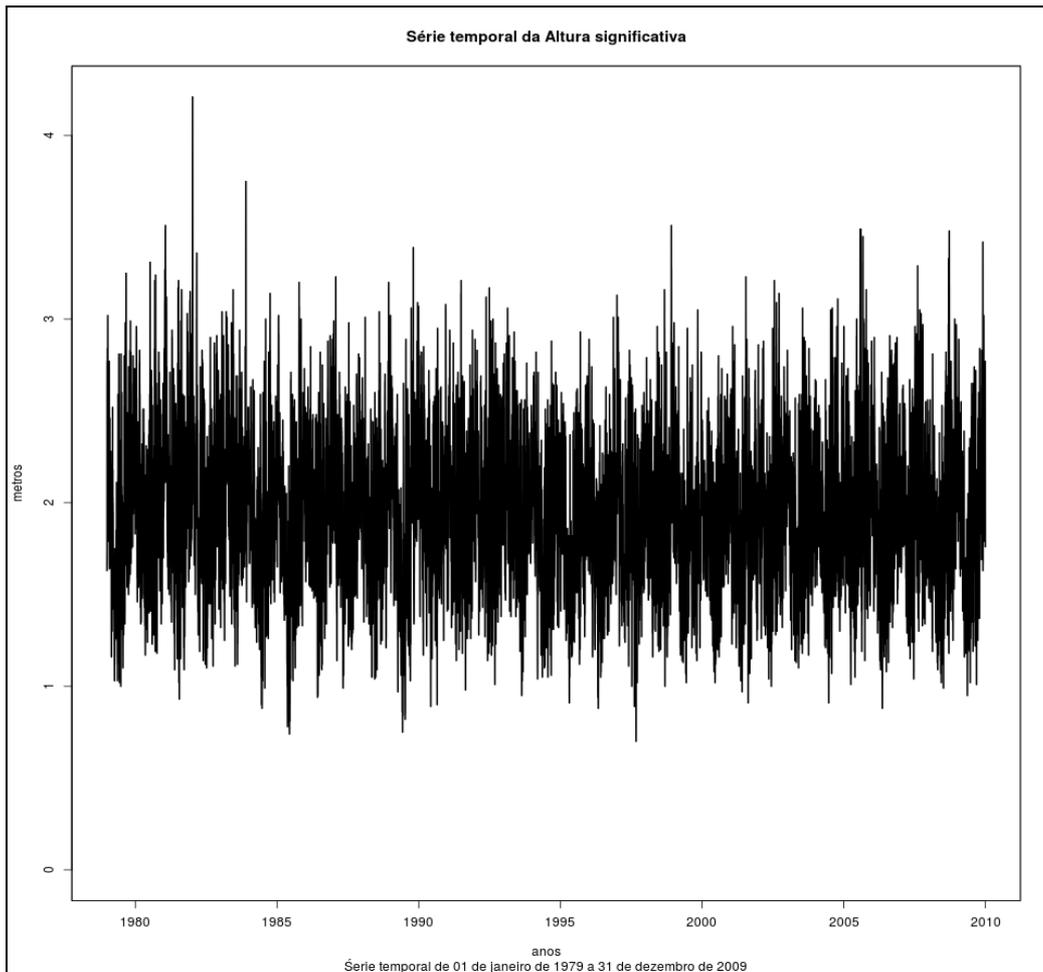


Figura 10. Série temporal das alturas de onda significativas.

Não se notam grandes variações da tendência das alturas de onda significativas ao longo dos 30 anos de análise. Entretanto, pode-se observar um certo padrão de variação que se repete a cada aproximadamente 5 anos. Além disso, em 1983 observa-se o maior valor de altura significativa de onda, que ultrapassa 4m.

4.1.3.2. O modelo ERA-40

O projeto de retro-análise (*hindcast*) ERA-40, desenvolvido pela agência europeia European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), também se constitui em importante ferramenta para a compreensão do clima de ondas, principalmente em regiões onde há uma escassez de dados instrumentais. Na Figura 11 pode-se visualizar a grade de pontos (pontos amarelos) disponível na costa

depin

brasileira, estando assinalados os principais portos (pontos azuis). Estes dados têm resolução espacial de 1,5º e temporal de 3h e referem-se à altura significativa, período e direção de pico. A base de dados disponível para este trabalho estende-se de 1957 a 2002.

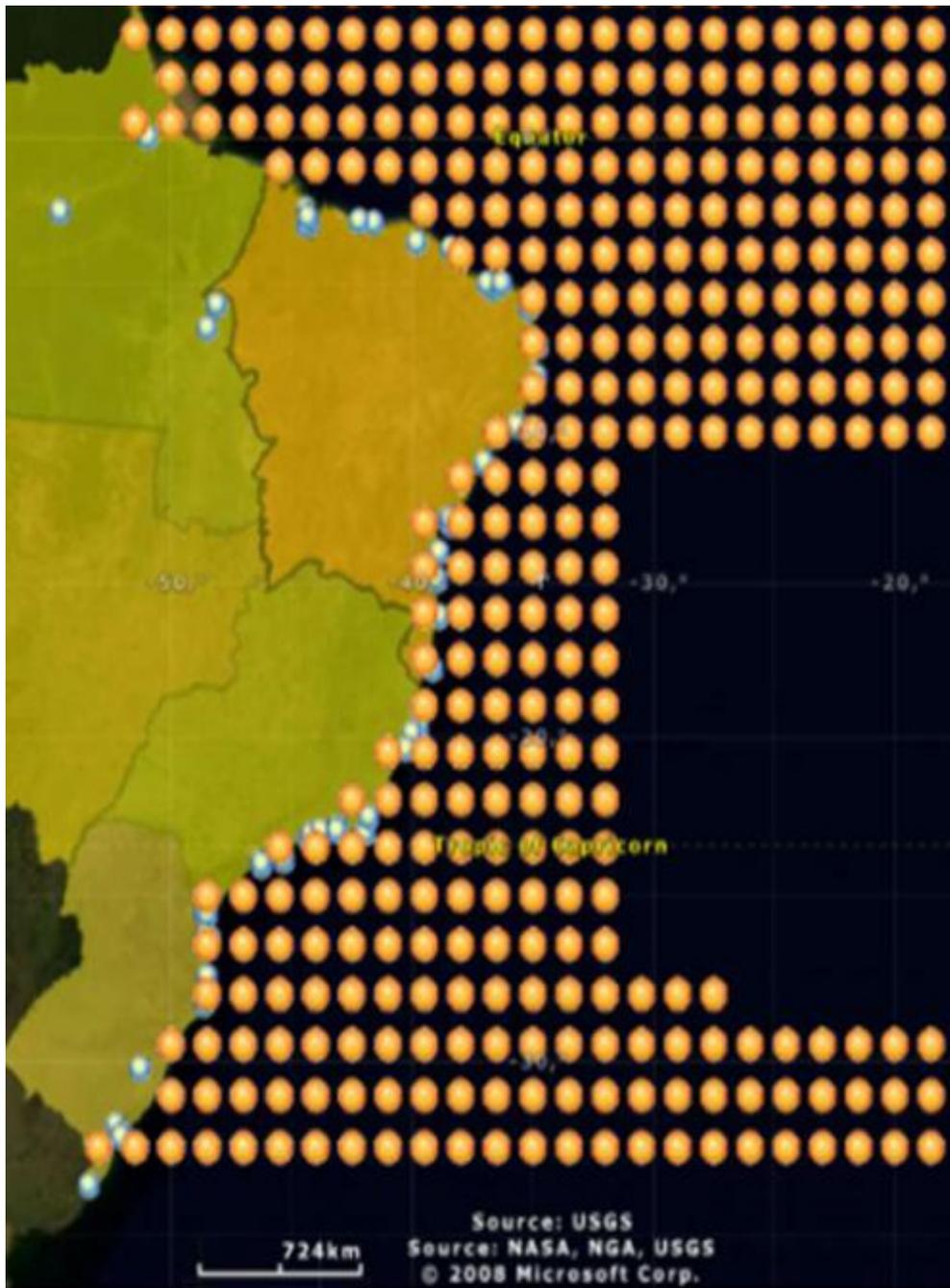


Figura 11. Grade de pontos do modelo ERA-40 na costa brasileira.

Handwritten signature

Os dados do projeto ERA 40 (ECMWF, 2002) são disponibilizados em formato GRIB, vantajoso em termos de armazenamento, porém apresentando dificuldades inerentes à visualização e processamento de dados. Portanto, para a análise, foi necessário transformá-los em outro formato mais conveniente para o processamento, utilizando um programa multi-linguagem (grib2ascii.csh), convertendo os arquivos em formato GRIB para formato NetCDF, e posteriormente para formato ASCII, extraindo-se a série temporal do ponto mais próximo ao porto de interesse. Este programa utiliza as facilidades do software CDO para converter os dados para NetCDF e, posteriormente, o software Ferret para a extração das séries temporais no ponto de interesse e transformação em formato ASCII. A concatenação dos softwares foi realizada por meio de linguagem de “shell” (csh).

Após a obtenção da série temporal para os pontos de interesse foi feita a análise da mesma relativa à qualidade e continuidade temporal. Estes dados serão utilizados para as análises de vulnerabilidade da infraestrutura portuária a serem apresentados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

5. Fatores de vulnerabilidade para infraestrutura portuária e adaptação

Medidas de enfrentamento dos riscos climáticos e não climáticos nas zonas costeiras têm sido adotadas em todo o mundo, em particular por meio de grandes obras de defesa concebidas e construídas em grandes áreas metropolitanas em regiões de planícies costeiras, como nos Países Baixos, Veneza, Hamburgo, Londres, São Petersburgo, etc.

As infraestruturas portuárias desde a Antiguidade compõem a rede logística preferencial para o comércio internacional. Este aspecto torna a viabilidade de longo prazo dos portos como elemento chave para a sobrevivência econômica dos países. De fato, o desenvolvimento das infraestruturas portuárias é enormemente caro e seus fomentadores têm a expectativa de usá-las por um longo período, isto é por séculos. A elevação relativa do nível do mar é uma potencial ameaça à viabilidade dos portos,



exigindo, portanto, um cuidadoso planejamento, com pleno conhecimento sobre os potenciais impactos das mudanças no nível do mar.

Ações de adaptação para o enfrentamento dos impactos projetados da elevação do nível relativo do mar têm sido aplicadas para um país específico, para uma região, ou localmente. Assim, para compensar os impactos dos efeitos locais das mudanças climáticas, a adaptação implicitamente reconhece que certas mudanças no nível do mar e nas forçantes marítimas podem ocorrer. Mais do que isso, leva em consideração o risco desses impactos no planejamento das futuras infraestruturas e na análise de risco para a possível proteção das infraestruturas portuárias presentes e futuras. Os riscos adicionais impostos pelos impactos das mudanças climáticas devem ser levados em conta através de uma análise de risco para um local específico, em paralelo com outros fatores de risco, como os fatores não climáticos do risco, bem como as incertezas quanto às metodologias de estimativa das projeções dos níveis de maré e do clima de ondas.

Muitas áreas portuárias baixas, que naturalmente apresentavam riscos de serem inundadas regularmente, já foram protegidas por estruturas. Com a aceleração da elevação do nível do mar, originada pelas mudanças climáticas, haverá a necessidade de reforçar estas estruturas de defesa. Não reforçar estas estruturas ou não levar em consideração os riscos inerentes às mudanças do clima, incrementa a vulnerabilidade das infraestruturas portuárias.

A concepção de projeto para a determinação do período de recorrência relevante a ser aplicado, em função da vida útil do projeto e de seu risco associado de excedência durante a vida útil, abrange soluções de obras tais como:

- a. Em localidades com erosão aguda reversível, produzida por variações sazonais ou eventos extremos, em que não tenham ocorrido brechas nas proteções naturais, como terras úmidas, falésias e dunas, ou danos em obras de proteção costeiras:
 - Solução flexível de alimentação artificial de praia;



- Estabelecimento de restrições de ocupação do território, através de um alinhamento não edificável, que permita uma certa variabilidade natural da linha de costa devido a erosão aguda;
- b. Em localidades com erosão aguda não reversível, devido a evento raro ou extremo, tendo havido dano às proteções, exigindo reparo imediato:
- Solução flexível de alimentação artificial de praia e duna.
 - Soluções rígidas:
 - Revestimentos, muros de choque, ou diques.
 - Espigões e/ou quebra-mares de praia.
 - Solução híbrida flexível/rígida.
 - Soluções hidráulicas: comportas (Figura 41)



Figura 41. Comportas do Tâmesa e a Maaslanktering Barrier do Porto de Rotterdam. Fonte: WOODWORTH (2011).

- c. Em localidades com erosão crônica, a partir de assoreamento em áreas de navegação, a solução fundamental é a de restaurar o suprimento de areia através de:
- Solução flexível de alimentação artificial de areia.
 - Solução flexível de transposição de areia (*bypass*) na entrada do canal de acesso.
 - Soluções rígidas:

Alf

- Revestimentos, muros de choque, ou diques.
- Espigões e/ou quebra-mares de praia.
- Solução híbrida flexível/rígida.
- Soluções hidráulicas: comportas.

6. Infraestrutura portuária brasileira: carteira atual e futura em análise

Conforme indicado no Relatório 1, a avaliação da infraestrutura portuária frente à mudanças climáticas seria realizada para os portos de 5 localidades ao longo da costa brasileira, de maneira coincidente à análise da infraestrutura urbana e vulnerabilidade costeira, a saber: Mucuripe (Fortaleza), Recife, Salvador, Rio de Janeiro e Santos.

Após levantamento de dados e tendo em vista as informações maregráficas e de ondas disponíveis, o porto de Salvador foi retirado da análise e diversos outros foram acrescentados, resultando na seguinte lista para prospecção inicial:

- Belém
- Mucuripe (Fortaleza)
- Recife
- Maceió
- Malhado (Ilhéus)
- Barra do Riacho
- Tubarão
- Niterói
- Rio de Janeiro
- São Sebastião
- Santos
- Paranaguá
- Imbituba
- Rio Grande.

Além destes portos, também foi incluída a embocadura de Saquarema, perfazendo um total de 15 conjuntos de infraestruturas portuárias objeto de análise. Na Figura 12 estão assinaladas as localizações destas infraestruturas portuárias e para as quais a seguir apresentamos a carteira atual e futura, de forma a analisá-las à luz de cenários de mudanças climáticas.

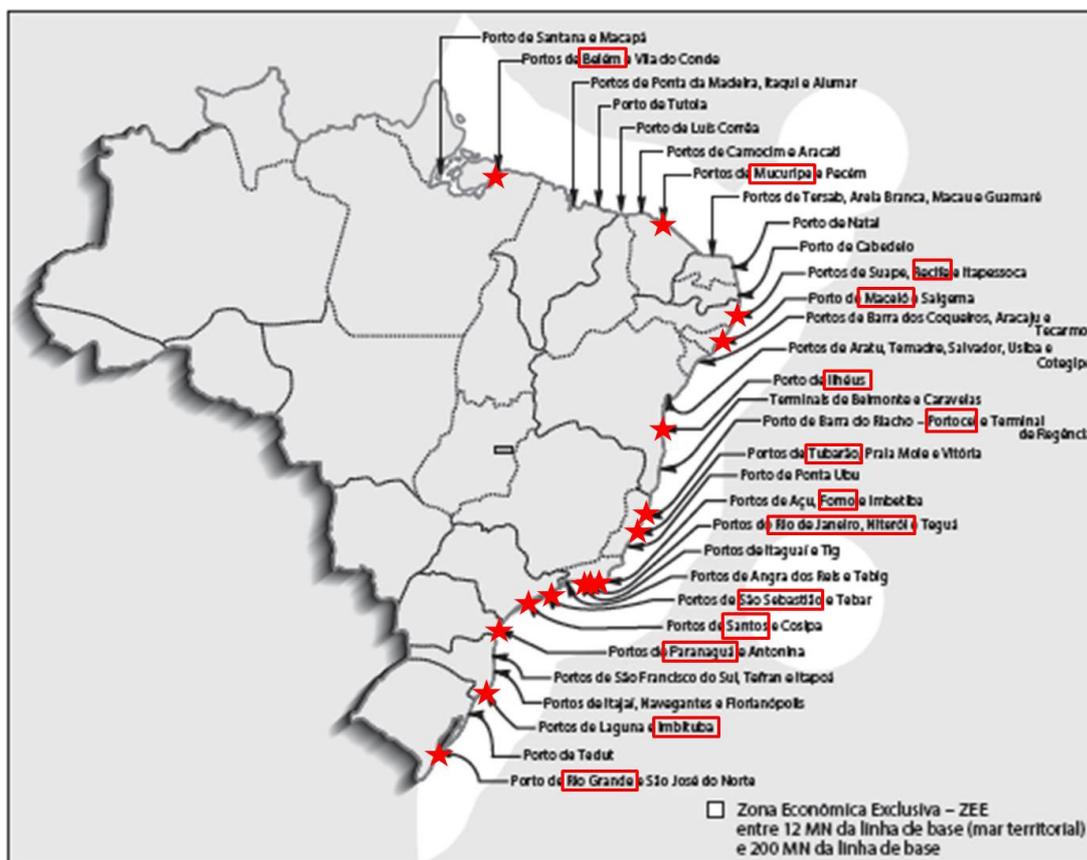


Figura 12. Localização dos portos selecionados.

De acordo com a Secretaria de Portos da Presidência da República (SEP, 2014), responsável pela formulação de políticas e pela execução de medidas, programas e projetos de apoio ao desenvolvimento da infraestrutura dos portos marítimos, com uma costa de 8,5 mil quilômetros navegáveis, o complexo portuário brasileiro movimentou, em 2013, 931 milhões de toneladas de carga bruta, apresentando um crescimento de 2,9% em relação a 2012. Sozinho, o setor portuário é responsável por mais de 90% das exportações do País. Dessa movimentação, 338 milhões de toneladas

Alf

- 3) Companhia Docas do Rio Grande do Norte (Codern)
 - Portos de Natal e Maceió, além do Terminal Salineiro de Areia Branca
 - *Porto delegado à Codern
- 4) Companhia Docas do Estado da Bahia (Codeba)
 - Portos de Salvador, Ilhéus e Aratu
- 5) Companhia Docas do Espírito Santo (Codesa)
 - Portos de Vitória e Barra do Riacho e Capuaba
- 6) Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ)
 - Portos do Rio de Janeiro, Niterói, Angra dos Reis e Itaguaí
- 7) Companhia Docas do Estado de São Paulo (Codesp)
 - Porto de Santos e Porto de Laguna.

A seguir, apresentamos a carteira atual e futura de cada um dos 15 Portos objeto deste estudo, a análise geral da carteira portuária e indicações quanto à exposição e vulnerabilidade atual.

6.1.1. Porto de Belém/PA.

O Porto de Belém é constituído pelas instalações portuárias terrestres na margem direita da Baía de Guajará, desde a extremidade sul do Mercado Ver-o-Peso até o Riacho Burrinhos, conforme Figuras 14 e 15. Foi inaugurado em 02/10/1909.

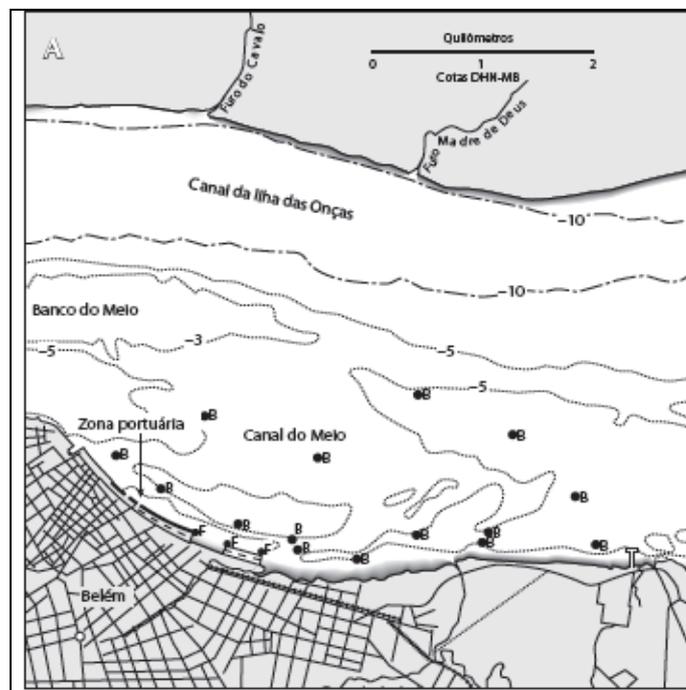


Figura 14. Instalações do Porto de Belém (Latitude: 01°28'00"S, Longitude: 48°27'00"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014)

Alfredini



Figura 15. Vista aérea do Porto de Belém.

A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

6.1.2. Porto de Mucuripe (Fortaleza/CE)

O Porto de Mucuripe situa-se na enseada homônima, tendo o abrigo do Molhe do Titã, que foi implantado entre 1939 e 1946, conforme ilustrado nas Figuras 16 e 17.

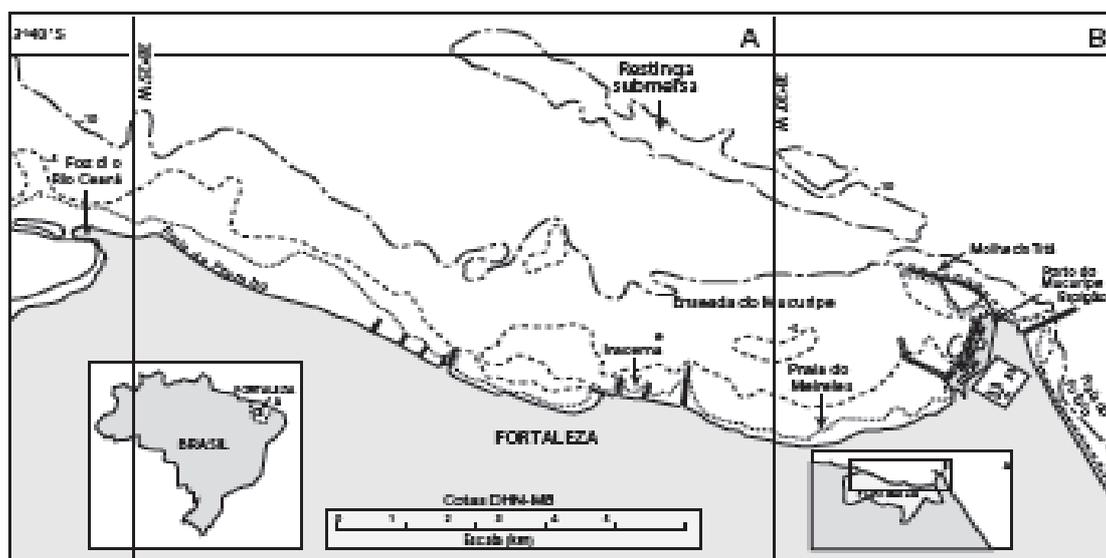


Figura 16. Instalações do Porto de Mucuripe (Latitude: 03°41'28"S, Longitude: 38°33'24"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

Alfredini



Figura 17. Vista aérea do Porto de Mucuripe.

A vulnerabilidade que será analisada para o Porto de Mucuripe refere-se à ação das ondas sobre o Molhe do Titã. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque as medições maregráficas disponíveis se estendem somente até 1968.

6.1.3. Porto de Recife/PE

O Porto do Recife situa-se na parte centro-leste da cidade de Recife, na confluência e às margens do estuário dos rios Capibaribe e Beberibe, conforme Figuras 18 e 19. Foi inaugurado em 12 de setembro de 1918.



Figura 18. Instalações do Porto de Recife (Latitude: 08°04'00"S, Longitude: 34°53'00"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).



Figura 19. Vista aérea do Porto de Recife.

A vulnerabilidade que será analisada para o Porto de Recife refere-se à maré, pela redução da borda livre do cais, e quanto à ação da onda sobre o Quebra-Mar do Banco do Inglês.

Alfredini

6.1.4. Porto de Maceió/AL

O Porto de Maceió situa-se na área leste da cidade de Maceió, entre as Praias de Pajuçara e Jaraguá, conforme Figuras 20 e 21. Foi inaugurado em 20/10/1940.

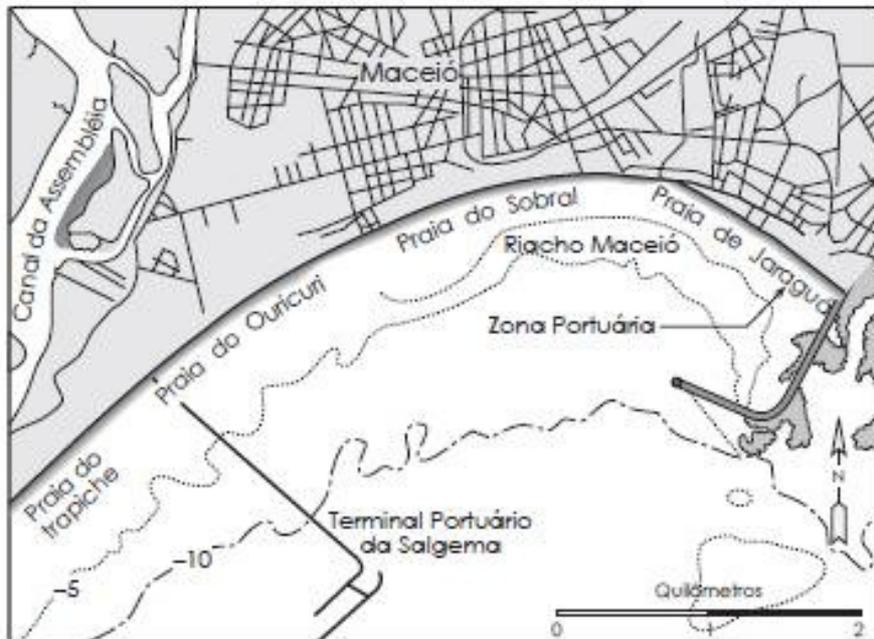


Figura 20. Instalações do Porto de Maceió (Latitude: 09°40'12"S, Longitude: 35°44'00"W). ALFREDINI & ARASAKI (2014).



Figura 21. Vista aérea do Porto de Maceió.

A vulnerabilidade que será analisada do Porto de Maceió refere-se à maré, pela redução da borda livre do cais, e quanto à ação da onda sobre o quebra-mar do Terminal Portuário da Salgema, atual BRASKEM.

6.1.5. Porto do Malhado (Ilhéus/BA)

O Porto do Malhado localiza-se na ponta homônima, Município de Ilhéus, conforme Figura 22. Iniciou sua operação em 31 de janeiro de 1971.

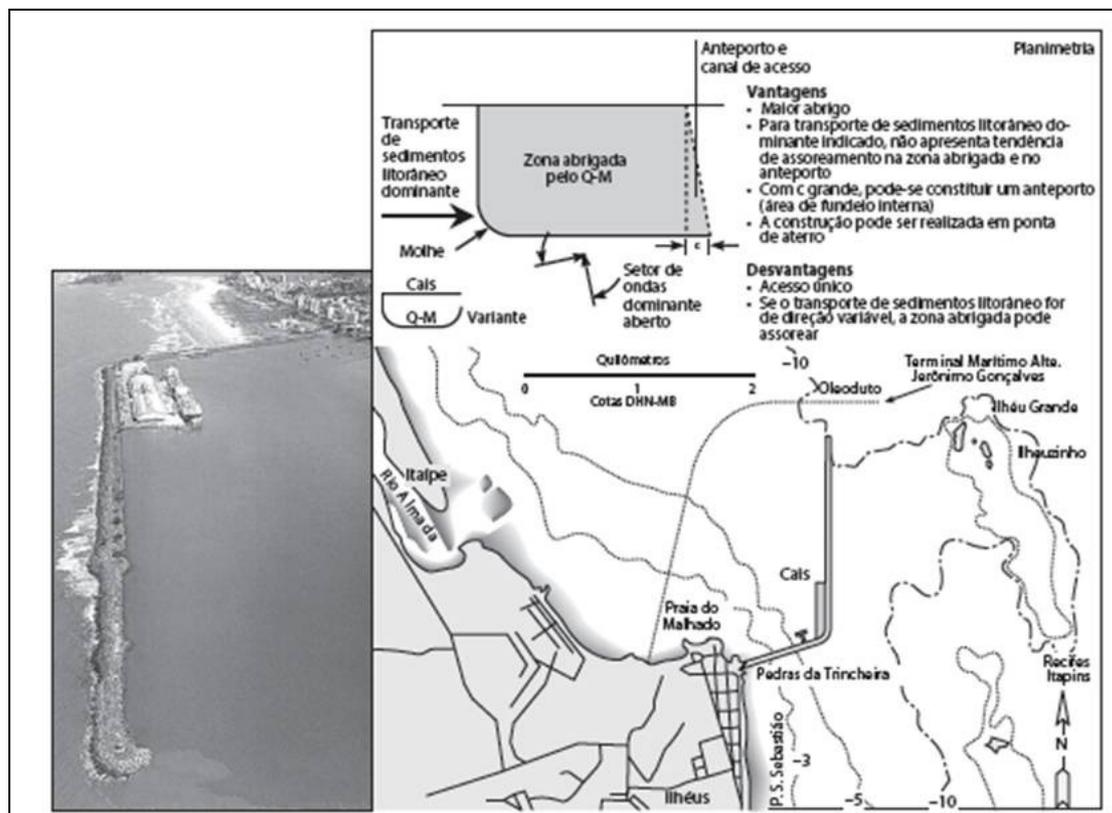


Figura 22. Instalações e vista aérea do Porto do Malhado. (Latitude: 14°47'00"S, Longitude: 39°01'48"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

A vulnerabilidade que será analisada do Porto do Malhado refere-se à ação das ondas sobre o molhe. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque as medições maregráficas disponíveis se estendem somente até 1963.

6.1.6. Porto de Barra do Riacho (Aracruz/ES)

O Porto de Barra do Riacho situa-se no Município de Aracruz (ES), ao sul da foz do Rio Doce, conforme Figuras 23 e 24. O TUP da Fibria (PORTOCEL) iniciou sua operação em 1978.



Figura 23. Instalações do TUP PORTOCEL (Latitude: 19°49'24"S, Longitude: 40°04'20"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).



Figura 24. Vista aérea do Porto de Barra do Riacho.

A handwritten signature in blue ink, located in the bottom right corner of the page.

A vulnerabilidade que será analisada do Porto de Barra do Riacho refere-se à ação da onda sobre os molhes. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque não há medições maregráficas de longo período.

6.1.7. Porto de Tubarão (ES)

O Porto de Tubarão é um TUP operado pela VALE, situando-se na ponta homônima, na Baía do Espírito Santo, conforme Figura 25. O Píer I foi inaugurado em 1966.



Figura 26. Vista aérea do Porto de Tubarão (Latitude: 20°19'05"S, Longitude: 40°17'04"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

A vulnerabilidade que será analisada do Porto de Tubarão refere-se à ação das ondas sobre o molhe. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque não há medições maregráficas de longo período.

6.1.8. Embocadura de Saquarema (RJ)

O molhe da Barra Franca de Saquarema dá acesso à Lagoa homônima através da embocadura na Praia de Itaúna. Trata-se de obra utilizada pelos pescadores locais e pequenos barcos de lazer. Esta obra foi realizada em 2003 (Figura 27).



Figura 27. Visualização aérea da Embocadura de Saquarema.

A vulnerabilidade que será analisada em Saquarema refere-se à ação da onda sobre o molhe. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque não há medições maregráficas de longo período.

6.1.9. Porto de Niterói (RJ)

O Porto de Niterói situa-se na Baía de Guanabara, conforme Figuras 28 e 29. O porto foi inaugurado em 1927. A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

depin

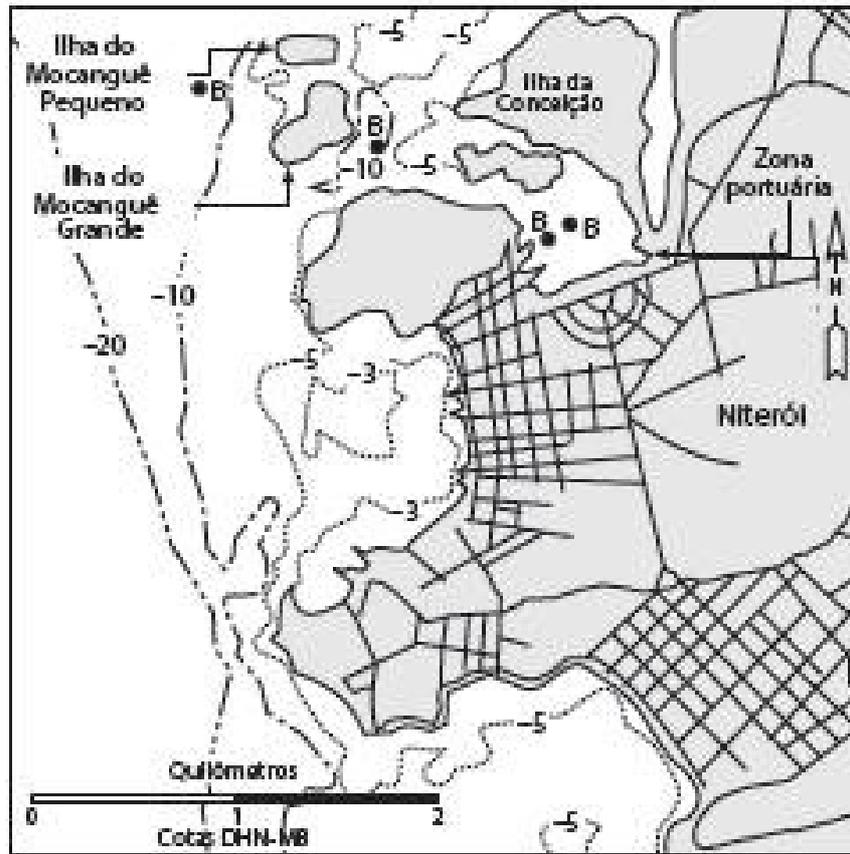


Figura 28. Instalações do Porto de Niterói (Latitude: 22°54'15"S, Longitude: 43°10'14"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

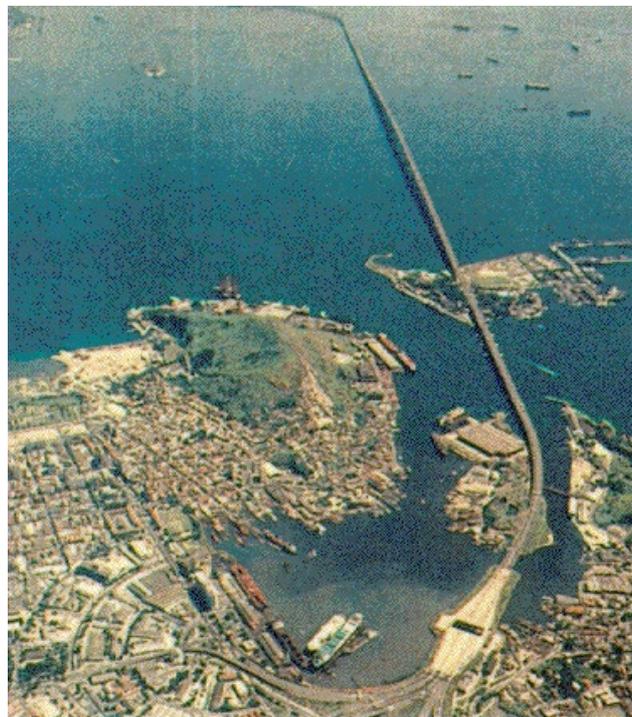


Figura 29. Vista aérea do Porto de Niterói.

Alfredini

6.1.10. Porto do Rio de Janeiro (RJ)

O Porto do Rio de Janeiro situa-se na costa oeste da Baía de Guanabara, conforme Figuras 30 e 31. A inauguração oficial ocorreu em 20/07/1910.

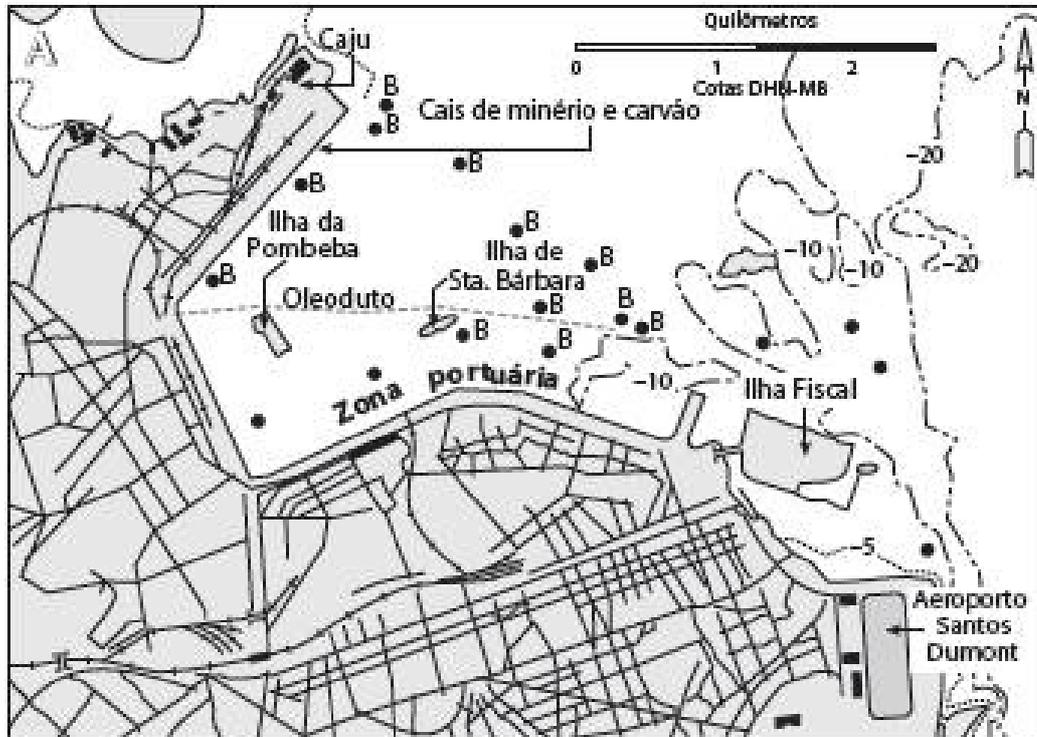


Figura 30. Instalações do Porto do Rio de Janeiro (Latitude: 22°54'23"S, Longitude: 43°10'21"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).



Figura 31. Vista aérea do Porto do Rio de Janeiro.

A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

6.1.11. Porto de São Sebastião (SP)

O Porto de São Sebastião situa-se no Canal de São Sebastião, conforme Figuras 32 e 33. Sua inauguração data da década de 1940.

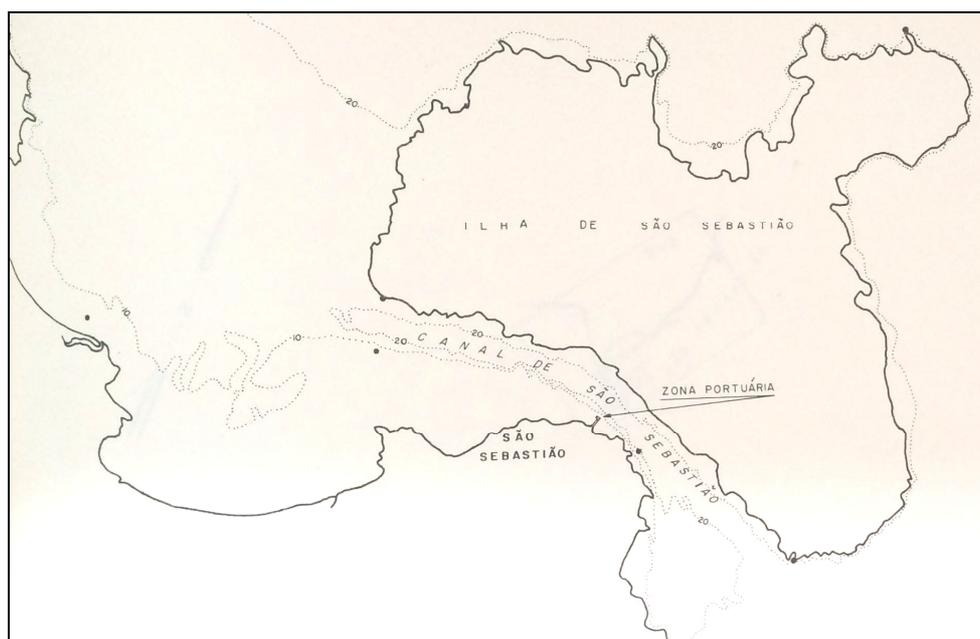


Figura 32. Localização do Porto de São Sebastião (Latitude: 23°58'40"S, Longitude: 45°14'10"W). Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).



Figura 33. Vista aérea do Porto de São Sebastião.

A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

6.1.12. Porto de Santos (SP)

O Porto de Santos situa-se no interior do Estuário homônimo, conforme Figura 34 e 35. O primeiro trecho de cais foi inaugurado em 02 de fevereiro de 1892.

A handwritten signature in blue ink, located in the bottom right corner of the page. The signature is cursive and appears to be the name of the author or reviewer.



Figura 34. Localização do Porto de Santos (Latitude: 23°57'05"S, Longitude: 46°24'00"W).



Figura 35. Vista aérea do Porto de Santos.

A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

6.1.13. Porto de Paranaguá (PR)

O Porto de Paranaguá situa-se na margem oeste da Baía homônima, conforme Figuras 36 e 37. A Inauguração do porto deu em 17 de março de 1933.

Alf

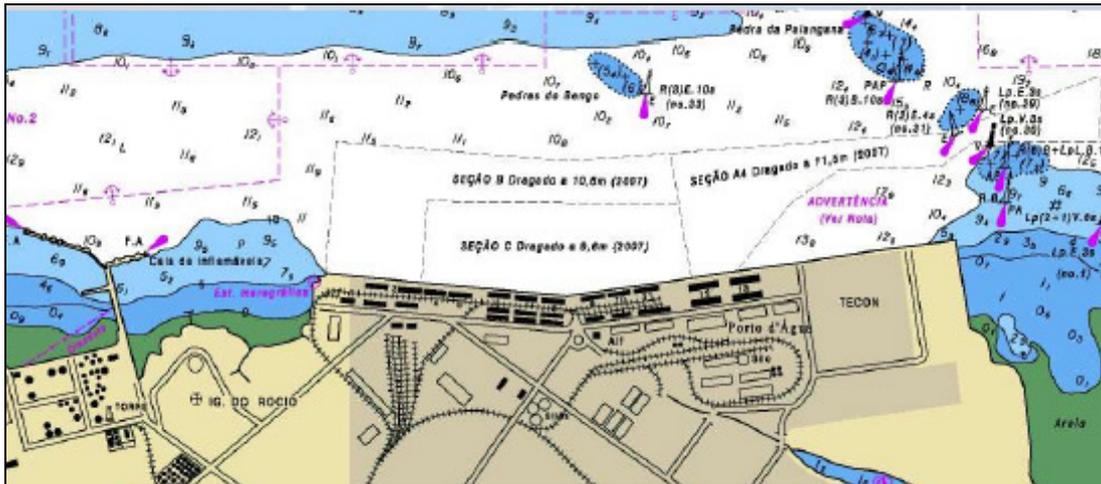


Figura 36. Instalações do Porto de Paranaguá (Latitude: 25°31'28"S, Longitude: 43°09'00"W).



Figura 37. Vista aérea do Porto de Paranaguá.

A vulnerabilidade principal é quanto à maré, pela redução da borda livre do cais. Este porto não tem obras de abrigo.

officir

6.1.14. Porto de Imbituba (SC)

O Porto de Imbituba está localizado numa enseada aberta, junto à Ponta homônima, conforme Figura 38. Seu molhe foi construído na década de 1970.



Figura 38. Vista aérea do Porto de Imbituba (Latitude: $28^{\circ}10'03''S$, Longitude: $48^{\circ}40'11''W$).

A vulnerabilidade que será analisada do Porto de Imbituba refere-se à ação da onda sobre o molhe. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque as medições maregráficas disponíveis se estendem somente até 1968.

6.1.15. Porto de Rio Grande (RS)

O Porto de Rio Grande está localizado à margem sul do Canal do Norte, que liga a Lagoa dos Patos ao Oceano, conforme Figuras 39 e 40. Sua inauguração data de 15 de novembro de 1915.





Figura 39. Molhes e instalações do Porto de Rio Grande (Latitude: 32°07'20"S, Longitude: 52°03'36"W).



Figura 40. Vista aérea do Porto de Rio Grande.

A vulnerabilidade que será analisada do Porto de Rio Grande refere-se à ação da onda sobre os molhes. Não será analisada a vulnerabilidade pela redução da borda livre do cais, porque não há medições maregráficas de longo período.

6.1.16. Síntese das características principais dos portos

Uma síntese das características principais dos portos estudados é apresentada na Tabela 2.

A handwritten signature in blue ink, located in the bottom right corner of the page. The signature is stylized and appears to be the name of the author or reviewer.

Tabela 2. Características dos portos estudados.

PORTO	LATITUDE LONGITUDE	MOLHE (M) QUEBRA MAR (Q) (extensão em metros)	EXTENSÃO DO CAIS (m)	BORDA LIVRE (m)
Belém (PA)	01°28'00"S 48°27'00"W	–	1.740	1,20
Mucuripe (CE)	03°41'28"S 38°33'24"W	1.910 (M)	1.116	-
Recife (PE)	08°04'00"S 34°53'00"W	1.149 (Q)	2.960	1,40
Maceió (AL)	09°40'12"S 35°44'00"W	1.600 (M) 450 (Q)	965	1,33
Malhado (BA)	14°47'00"S 39°01'48"W	2.260 (M)	432	–
Barra do Riacho (ES)	19°49'24"S 40°04'20"W	2.525 (M)	460	–
Tubarão (ES)	20°19'05"S 40°17'04"W	715 (M)	1.760	–
Niterói (RJ)	22°54'15"S 43°10'14"W	–	458	1,25
Rio de Janeiro (RJ)	22°54'23"S 43°10'21"W	–	8.821	1,20
São Sebastião (SP)	23°58'40"S 45°14'10"W	–	150	1,20
Santos (SP)	23°57'05"S 46°24'00"W	–	10.046	1,18 e 1,58
Paranaguá (PR)	25°31'28"S 43°09'00"W	–	3.985	1,60
Imbituba (SC)	28°10'03"S 48°40'11"W	1.000 (M)	570	–
Rio Grande (RS)	32°07'20"S 52°03'36"W	8.450 (M)	6.482	–

Dados e informações de contexto, adicionais à caracterização de cada instalação portuária em estudo são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Parte destes elementos de caracterização podem auxiliar a análise de vulnerabilidade e adaptação, cujos resultados são objetos do desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 3. Elementos de caracterização adicional das estruturas portuárias em estudo

PORTOS	UF	Localização		Situação		Dimensão				Meio Físico onde está instalada a infraestrutura	Vida da estrutura (anos)	Capacidade logística por ano	
		Latitude	Longitude	Organizado	TUP	Área Ocupada (ha ²)	Hinterland	Comprimento de cais acostável (m)	Borda livre de projeto (m)		Início de operação	Navios atracados em 2013	Carga movimentada (MTPA)
Belém	PA	01°28'00"S	48°27'00"W	X			PA, AM, AP	1.740	1,20	ambiente urbano	1909	1.124	0,568
Mucuripe (Fortaleza)	CE	03°41'28"S	38°33'24"W	X			CE, PI, MA, RN, PE e PB	1.116	n.a.	ambiente urbano	1953	568	5,161
Recife	PE	08°04'00"S	34°53'00"W	X			PE	2.960	1,40	ambiente urbano	1918	458	1,708
Maceió	AL	09°40'12"S	35°44'00"W	X	X		AL	965	1,33	empreendimento isolado	1940	336 (PO) 82 (TUP)	2,582 (PO) 1,024 (TUP)
Malhado (Ilhéus)	BA	14°47'00"S	39°01'48"W	X			BA e MG	432	n.a.	empreendimento isolado	1971	83	0,396
Barra do Riacho	ES	19°49'24"S	40°04'20"W		X			460	n.a.	região industrial	1978	859	8,585
Tubarão/Praia Mole	ES	20°19'05"S	40°17'04"W		X			1.760	n.a.	região industrial	1966	818	110,480
Niterói	RJ	22°54'15"S	43°10'14"W	X		271	RJ	458	1,25	ambiente urbano	1927	601	0,236
Rio de Janeiro	RJ	22°54'23"S	43°10'21"W	X			RJ	8.821	1,20	ambiente urbano	1910	1138	8,859
São Sebastião	SP	23°58'40"S	45°14'10"W	X			SP, GO	150	1,20	ambiente urbano	1963	121	0,655
Santos	SP	23°57'05"S	46°24'00"W	X		77.000	SP, MG, GO, MS e MT	10.046	1,18 a 1,58	ambiente urbano	1892	5166	99,808
Paranaguá	PR	25°31'28"S	43°09'00"W	X			PR, SP, SC, RS, MS, MT, RO, Paraguai	3.985	1,60	ambiente urbano	1933	2.075	41,912
Imbituba	SC	28°10'03"S	48°40'11"W	X		15.550	SC, RS e PR	570	n.a.	empreendimento isolado	1970	213	2,492
Rio Grande	RS	32°07'20"S	52°03'36"W	X			RS, SC, Uruguai, Argentina	6.482	n.a.	empreendimento isolado	1915	2.860	20,534

Nota: "n.a.": não se aplica

Tabela 4. Elementos adicionais de caracterização e contexto das instalações portuárias em estudo

PORTOS	UF	Obra (s) de abrigo Molhe (M); Molhes (Ms); Quebra-mar (QM)	PDZ			Exposição atual a fenômenos climáticos ou ambientais que serão estudados	
			Existe	Data	Obras / Projeção de crescimento	Fenômeno	Impactos
Belém	PA	n.a.	Sim	-	Instalações de acostagem, armazenagem e sistemas de transferências cais retroárea no Terminal de Outeiro para fazer frente ao aumento expressivo da demanda pela movimentação de granéis vegetais na região	elevação da maré	redução da borda livre do cais
Mucuripe (Fortaleza)	CE	M	Sim	Set/2010	A única obra prevista para o porto descrita no PDZ é a Construção do Cais/Retroárea e Terminal de Passageiros o restante são apenas obras sugeridas com base nos estudos de demanda.	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Recife	PE	Ms e QM	Não	-	-	elevação da maré e ondas	redução da borda livre do cais/ maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Maceió	AL	M	Não	-	-	elevação da maré e ondas	redução da borda livre do cais/ maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Malhado (Ilhéus)	BA	M	Não	-	-	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Barra do Riacho	ES	Ms	Sim	2001	Não há obras previstas para o porto descritas no PDZ, apenas obras sugeridas com base nos estudos de demanda.	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Tubarão/Praia Mole	ES	Ms	Não	-	-	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Niterói	RJ	n.a.	Não	-	-	elevação da maré	redução da borda livre do cais
Rio de Janeiro	RJ	n.a.	Sim	Set/2009	Capacidade operacional estimada a partir da extensão de cais, com possível adequação das instalações em terra e serviços de dragagem (em curso). Capacidade: 16 milhões T/ano, passível de ampliação até 24 milhões T/ano (obras de cais). É premissa do PDZ a finalização das obras em curso para regularização e aumento de capacidade dos acessos rodoviários e ferroviários, assim como para aprofundamento e ampliação das vias de acesso marítimo.	elevação da maré	redução da borda livre do cais
São Sebastião	SP	n.a.	Sim	Ago/2009	Está prevista a construção de um sistema viário local (perimetral portuária), separado em ambos os lados por canteiros verdes arborizados e ciclovia no canteiro central. Para adequação da dársena já existente no aterro da área portuária ao Sul do local onde está prevista a realocação do embarque da balsa, será efetuada a construção dos muros de encosta para atracação de embarcações, tendo profundidade de 3 m, o que permitirá a entrada e saída das embarcações das autoridades portuárias e marítimas, sem interferência das demais embarcações. Ainda nesta linha, está sendo prevista a estruturação do Núcleo das Autoridades e Agentes Portuários com as devidas edificações de retaguarda para: Marinha do Brasil, Polícia Federal, Receita Federal, Polícia Marítima, ANVISA e Órgãos Ambientais (federal e estadual). Os escritórios estarão posicionados em local estratégico com acesso direto a dársena privativa.	elevação da maré	redução da borda livre do cais
Santos	SP	n.a.	Sim	Março/2006	Prevê-se a ampliação a partir da ocupação da área Barnabé-Bagres com diversas novas instalações portuárias	elevação da maré	redução da borda livre do cais
Paranaguá	PR	n.a.	Sim	Julho/2012	Não há obras previstas para o porto descritas no PDZ.	elevação da maré	redução da borda livre do cais
Imbituba	SC	Ms	Sim	Dez/2005	Não há obras previstas para o porto descritas no PDZ..	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa
Rio Grande	RS	Ms	não	-	-	ondas	maior manutenção dos maciços das obras de defesa

7. Exposição e vulnerabilidade atual e futura das infraestruturas portuárias: ensaios a partir da projeção da série histórica de marés

Como vimos no capítulo anterior, as infraestruturas portuárias brasileiras já estão expostas a impactos devidos a fenômenos costeiros naturais, ou a fenômenos relacionados ao clima, a extremos climáticos ou à variabilidade climática, tais como: redução de borda livre do cais, por aumento de maré (portos de Belém, Recife, Maceió, Niterói, Rio de Janeiro, São Sebastião, Santos e Paranaguá), e ação de ondas sobre o molhe ou quebra-mar (portos de Mucuripe, Recife, Maceió, Ilhéus, Barra do Riacho, Tubarão, Saquarema, Imbituba e Rio Grande). Uma síntese desta exposição é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Elementos de exposição e impactos atuais sobre a infraestrutura portuária

ESTRUTURAS EXPOSTAS	Ambientes naturais	Obras de abrigo nos portos		Obras portuárias e operações náuticas	Canais de acesso externos pelo transporte litorâneo	Maiores regiões metropolitanas portuárias
FENÔMENOS CLIMÁTICOS E NÃO CLIMÁTICOS	Aumento do nível do mar Aumento do assoreamento nos canais estuarinos	Aumento da severidade das ondas		Aumento da maré	Desmatamento, obras de infraestrutura, aterramentos	Inundações
IMPACTOS	Afogamento de manguezais	Danos à edificação	Galgamento	Perda de bordas livres de cais	Maior assoreamento Erosão de canais	Interferência no sistema viário de acesso aos portos
PORTOS						
Belém	x			x		x
Mucuripe (Fortaleza)		x	x		X	
Recife	x	x	x	x	X	x
Maceió		x	x	x	x	x
Malhado (Ilhéus)		x	x		x	
Barra do Riacho		x	x		x	
Tubarão		x	x		x	
Niterói				x		
Rio de Janeiro				x		x
Saquarema		x	x		x	
São Sebastião				x		
Santos	x			x	x	x
Paranaguá	x			x	x	
Imbituba			x		x	
Rio Grande.			x		x	

Ocorre, que é esperado que as mudanças climáticas em curso intensifiquem fenômenos climáticos, como eventos meteorológicos ou climáticos extremos, e

portanto, a exposição dos sistemas humanos e naturais ao risco de impactos climáticos também se viu aumentada.

Entretanto, a magnitude e a intensidade dos impactos por sobre as infraestruturas costeiras, objeto deste estudo, não se deverão apenas aos fatores climáticos, mas também, senão principalmente, a fatores não climáticos que determinam, de um lado, maior ou menor exposição aos impactos, e, de outro, maior ou menor capacidade de enfrentamento, adaptação e resiliência.

Por exemplo, um dos fenômenos mais esperados para o ambiente costeiro, diretamente relacionado ao aquecimento global, se refere à elevação no nível médio relativo do mar. O risco de elevação de um metro do nível do mar, fenômeno à que está exposta toda a costa brasileira, coloca, para todas as infraestruturas costeiras, humanas e naturais, e aqui em particular às infraestruturas portuárias, a questão de como se comportarão frente ao fenômeno.

Para estimar adequadamente as condições de ondas extremas para o projeto são necessárias informações em longos períodos. Os dados de ondas devem ser analisados usando diferentes parâmetros e diferentes métodos estatísticos. Normalmente, diferentes distribuições estatísticas são testadas, como Weibull, Gumbel, Exponencial e Log-Normal, sendo que frequentemente a primeira oferece o melhor ajuste aos dados de ondas (Figura 42).



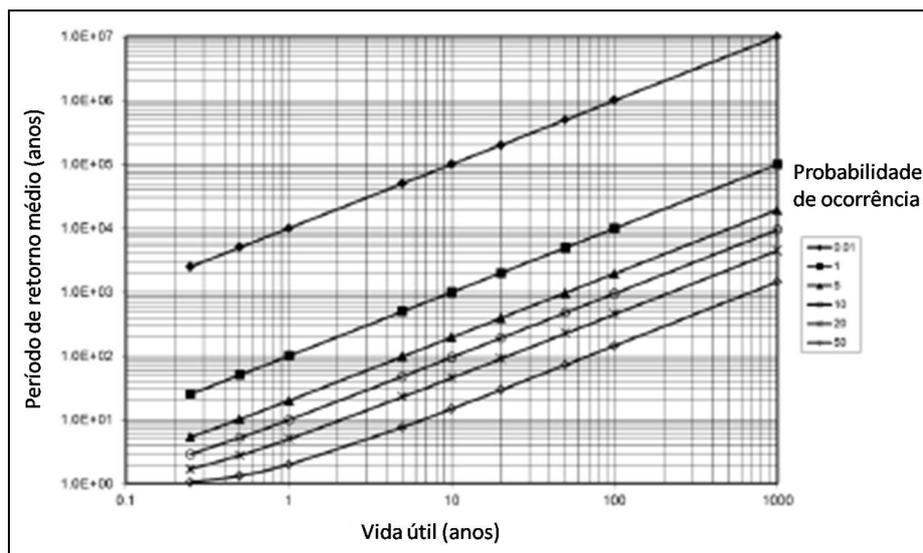


Figura 42. Probabilidade de ocorrência para um dado período de retorno e vida útil.

Com base nas informações maregráficas de médias anuais, obtidas nas longas séries, ajustaram-se tendências lineares quanto à elevação da maré no período de 1950 a 1990, conforme assinalado na coluna esquerda da Figura 42. As séries descontinuadas ao final da década de 1960 não foram consideradas, tendo servido para verificar que é efetivamente a partir da década de 1970 que se observa sensível incremento na tendência de elevação do nível do mar.

Com referência a estes ajustes, podem ser identificados três tipos principais de faixas de tendências históricas de elevação:

- **Alta:** para os portos de Recife, Rio de Janeiro e Cananeia, com 65,6 e 42,5 e 37,5 cm/século. Por proximidade, estas tendências foram adotadas, respectivamente, para os portos de Maceió e Niterói, sendo adotada, por proximidade, a tendência de Cananeia para o Porto de Paranaguá;
- **Moderada:** para os portos de Belém, Santos: com 36,5 e 35,3 cm/século. Baixa para o Porto de São Sebastião: com 23,2 cm/século. Adotou-se, por proximidade, a tendência de Ubatuba para o Porto de São Sebastião.

Uma vez estimadas as tendências históricas de elevação da maré, estabeleceram-se as datas marco de 2015, 2030 e 2050, visando projetar as elevações futuras com base na pretérita, bem como nos critérios apresentados anteriormente. Este critério foi

Assinatura

seguido para cada trecho ao longo do horizonte temporal da análise: 1990 a 2015, 2015 a 2030 e 2030 a 2050.

Fundamentalmente, tomou-se o critério PIANC, do Reino Unido e Costa Oeste norte-americana, somente para Seattle e Newport (valores mais baixos do que San Francisco e Los Angeles), como referência, e interpolou-se, para cada período, as tendências projetadas na Tabela 6.

A partir dos resultados da Tabela 6, compararam-se quais as tendências mais próximas aos valores históricos da costa brasileira, mantendo-se as tendências históricas se fossem mais altas. Pode-se verificar que a recomendação do Reino Unido foi a que mais se aproximou das tendências históricas da Costa Brasileira.

As taxas projetadas para os portos de Recife (e Maceió), Rio de Janeiro (e Niterói) e Santos foram assinalados nos gráficos referentes aos três portos citados, bem como as respectivas elevações cumulativas a partir de 1950, assinalando-se nas linhas horizontais, consolidando os resultados apresentados na Figura 43.

O Porto de Paranaguá segue a tendência de elevação alta, resultando em elevações a partir de 1950 de: 25 cm (2015), 33 cm (2030) e 50 cm (2050).

O Porto de Belém segue a tendência de elevação moderada, resultando em elevações a partir de 1950 de: 24 cm (2015), 31 cm (2030) e 47 cm (2050).

O Porto de São Sebastião segue a tendência de elevação moderada, resultando em elevações a partir de 1950 de: 16 cm (2015), 22 cm (2030) e 36 cm (2050).

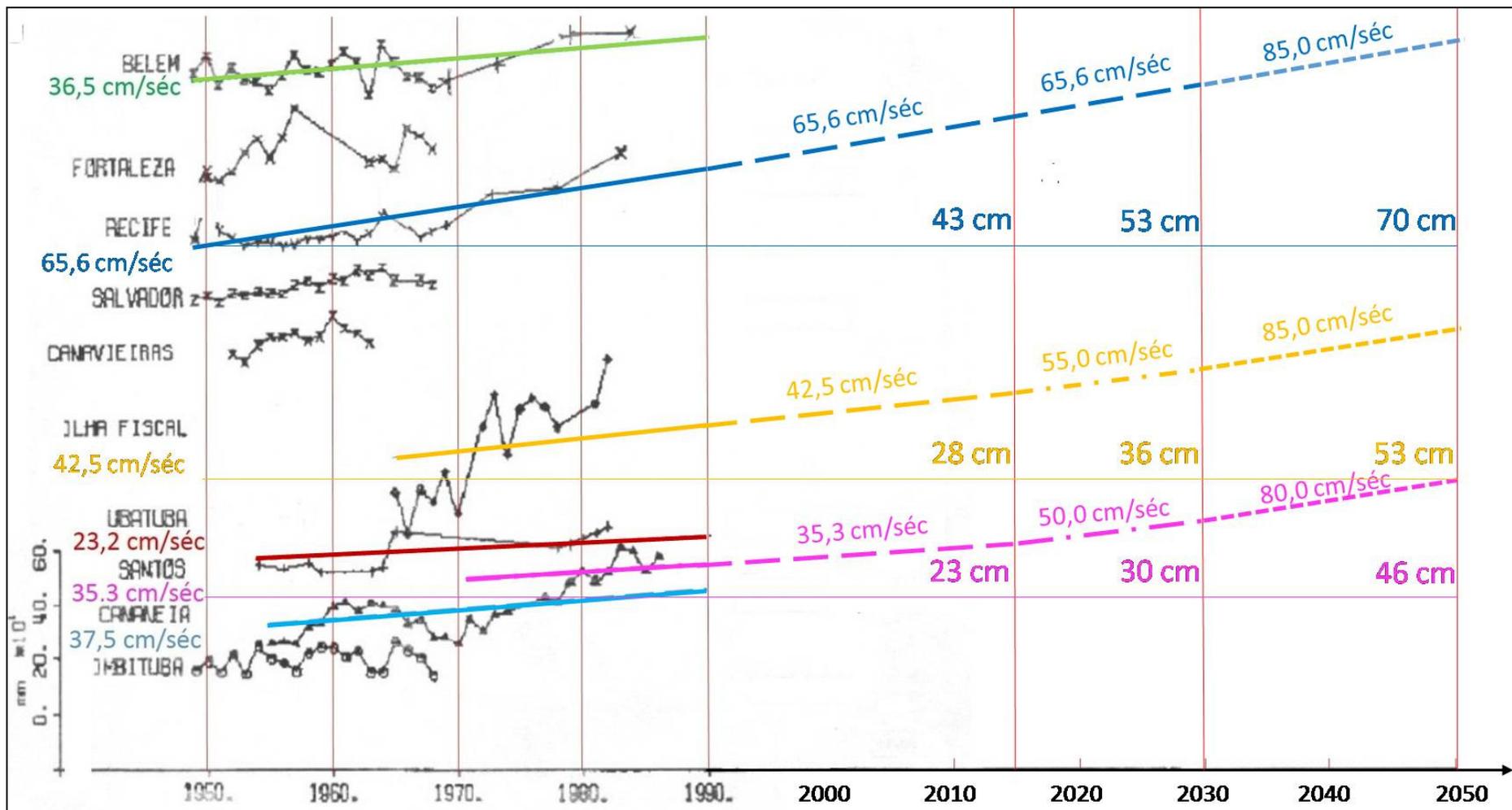


Figura 43. Tendências históricas de longo período nos portos brasileiros e projeções até o ano 2050.

Handwritten signature

Tabela 6. Taxa cumulativa de elevação do nível médio do mar a partir de interpolações nos critérios PIANC (2014b).

Taxa cumulativa elevação NMM (cm/século)	1990-2015			2015-2030			2030-2050		
	Reino Unido	Costa W USA	PIANC	Reino Unido	Costa W USA	PIANC	Reino Unido	Costa W USA	PIANC
Baixa	25,0			40,0	4,0	20,0	70,0	28,5	40,0
Moderada	35,0			50,0	22,6		80,0	52,0	
Alta	40,0			55,0	41,3	40,0	85,0	75,5	80,0

8. Necessidades de análise e desdobramentos do estudo

Com base nos ajustes das séries dos modelos de clima de ondas WWIII e ERA-40, serão avaliadas as tendências quanto ao aumento das ondas com relação às ondas de projeto informadas para os molhes e quebra-mares. Assim, é possível estimar a faixa de dano nestes maciços ao longo de suas vidas úteis, conforme sumarizado na Figura 44.

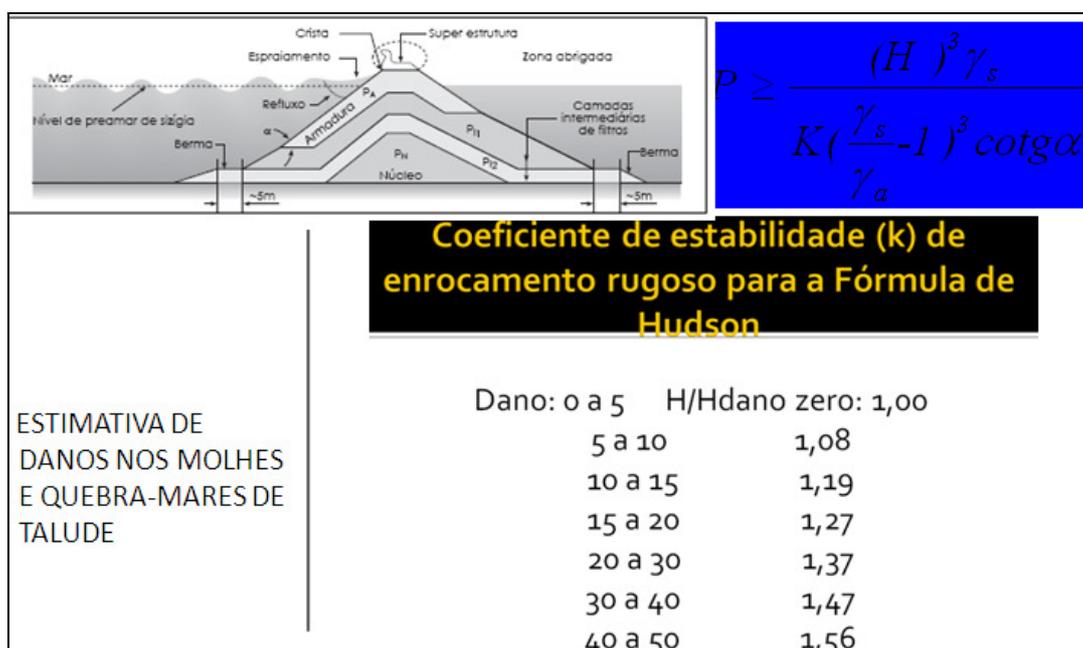


Figura 44. Estimativa de danos a partir do coeficiente de estabilidade da Fórmula de Hudson. Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

Também é possível avaliar o galgamento dos maciços pela onda de projeto, seguindo o critério ABNT (1995) de superação somente durante 20% da vida útil. Situações extremas podem conduzir a danos sérios a estes maciços, como ocorreu no molhe do Terminal de Barcaças da Siderúrgica de Tubarão em junho de 2006 (Figura 45), no desgaste do Molhe de Imbituba (Figura 46) ou no colapso do Molhe da Barra de Saquarema entre 2003 e 2005 (Figura 47).

Alfredini



Figura 45. Colapso do enrocamento do molhe de abrigo do Terminal de Barcaças da Siderúrgica de Tubarão em junho de 2006.



Figura 46. Violento galgamento do Molhe de Imbituba por ocasião da ressaca de 10/08/2005.

Alfieri



Figura 47. Colapso do enrocamento do molhe de Saquarema entre 2003 e 2005.

Para ampliar a capacidade de compreensão e enfrentamento das mudanças projetadas da maré, e com base nos resultados obtidos por este estudo até aqui, recortes de análise se fazem necessários, conforme apresentado a seguir.

- a. Estimativa da perda de borda livre dos cais a partir do levantamento de dados dos projetos das estruturas e da data de sua implantação, conforme ilustrado na Figura 48, não considerando variações de maré significativas anteriormente a 1950.

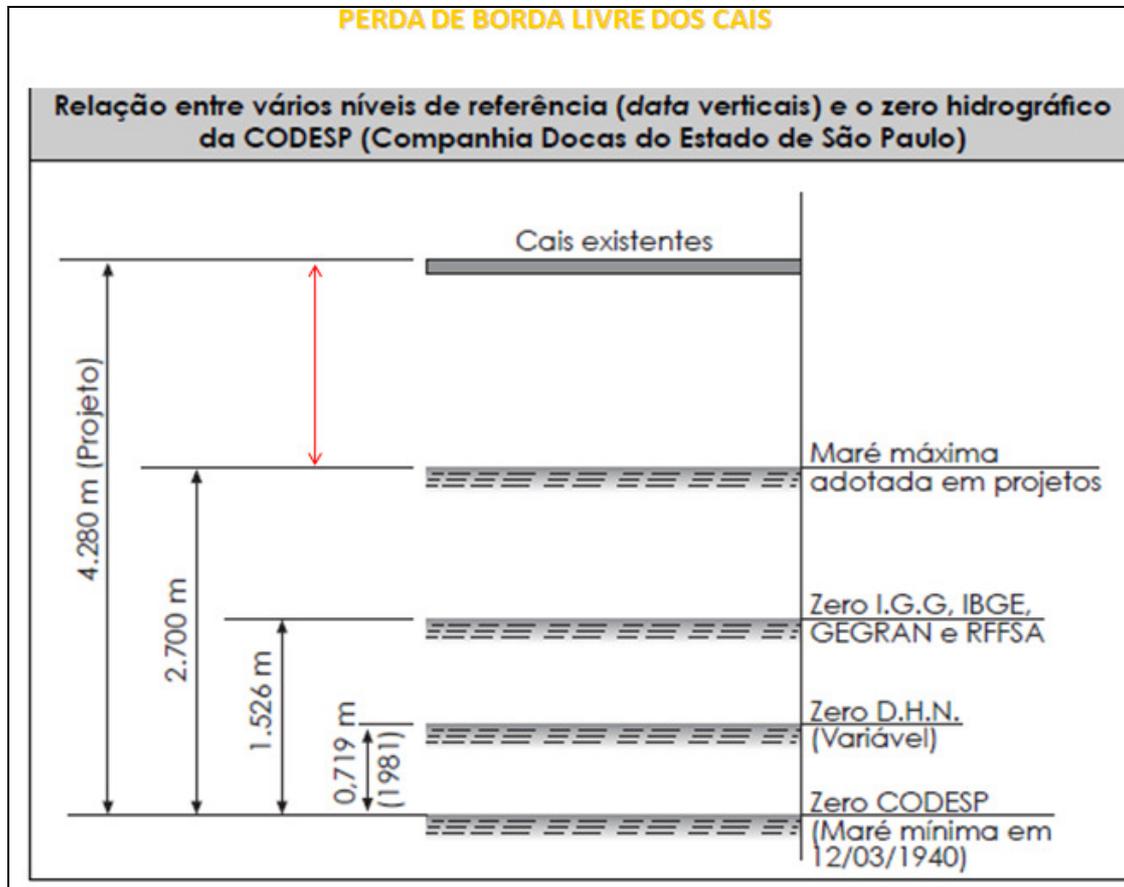


Figura 48. Borda livre dos cais do Porto de Santos.
Fonte: ALFREDINI & ARASAKI (2014).

- b. Estimativa da redução da borda livre dos molhes e quebra-mares, seguindo o mesmo procedimento do item anterior.
- c. Necessidade de alteração de largura dos canais de acesso externos dos portos. Tendo em vista a recomendação PIANC (2014a) para a dimensão de largura de canais de acesso externos em portos, alturas de ondas prevalecentes superiores a 1,0 m exigem um aumento de largura. Assim, serão avaliadas as tendências para o clima de ondas nos diferentes portos.

Alfredini

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. *Ações em estruturas portuárias marítimas ou fluviais – Procedimento*. NBR 9782, Rio de Janeiro.
- ALENCAR, J. C. M., 1990. Datum altimétrico brasileiro. *Caderno de Geociências* n.º 5. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro.
- ALFREDINI, P. & ARASAKI, E., 2014. *Engenharia Portuária*. Editora Edgard Blücher, 1308 p. São Paulo.
- BRASIL/MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES/DNPVN, 1968. *Portos do Brasil*. Rio de Janeiro.
- FEMAR – Fundação de Estudos do Mar, 2000. *Catálogo de estações maregráficas brasileiras*. Rio de Janeiro.
- FRANCO, A. S.; KJERFVE, B.; NEVES, C. F., 2009. A análise de registros de maré extremamente longos. *Revista Pesquisa Naval*, n. 19, p. 187-196, Estado-Maior da Armada. Serviço de Documentação da Marinha. Brasília.
- FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO / INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA – IME, 2005. *Levantamento da infra-estrutura portuária e do emprego de recursos tecnológicos nos portos brasileiros*. Convênio MT-FRF 009/2004. Rio de Janeiro.
- MESQUITA, A. R., 2009. Considerações sobre as Variações do Nível do Mar do Litoral do Brasil no Século XX. *Afro-America Gloss News* Edição 13(1).
- NEVES, C. F., 2005. O nível médio do mar: uma realidade física ou um critério de Engenharia? *Vetor: Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, V.15(2) p. 19-33. Editora da Fundação Universidade do Rio Grande. Rio Grande (RS).
- NICHOLLS, R. J; HANSON, S.; HERWEIJER, C.; PATMORE, N.; HALLEGATTE, S.; CORFEE-MORLOT, J.; CHÂTEAU, J.; MUIR-WOOD, R., 2008. *Ranking Port Cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: Exposure estimates*. OECD Environment Working Papers, n. 1, OECD Publishing.
- NOAA.WAVEWATCH III Model. College Park (MD, USA): 2014. Disponível em: <<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>>. Acesso em: 05 jul. 2014.
- PIANC, 2014a. *Harbour approach channels – Design guidelines*. Report n. 121. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Brussels.

PIANC, 2014b. *Countries in transition (CIT): Coastal erosion mitigation guidelines*. Report n. 123. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Brussels.

PIUMBINI, P.P., 2009. *Clima de ondas de gravidade e estado de agitação marítima em ambientes marinhos no Espírito Santo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), mestrado em Engenharia Ambiental, Vitória (ES) 108p.

SECRETARIA ESPECIAL DE PORTOS, SEP. Portos do Brasil. Disponível em <http://portosdobrasil.gov.br>. Acesso em 04 DEZ 2014.

WOODWORTH, P. L., 2011. *Measuring long term mean and extreme sea level rise*. Presentation of National Oceanography Centre of the Natural Environment Research Council. Liverpool.



Wilson Carneiro de S. Junior
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Professor Associado

