

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA NA COSTA DE FORTALEZA, CEARÁ

Analysis of sea level variability on the costal zone of Fortaleza, Ceará State

Carlos Augusto F. Schettini¹, Luís P. Maia², Eliane C. Truccolo³

RESUMO

O presente trabalho analisa a variabilidade do nível da água na costa de Fortaleza, CE, através de registros do nível da água e de ondas. O objetivo é avaliar estatisticamente as ocorrências de níveis positivos, acima do nível de referência de baixa mar de sizígia de solstício, e os efeitos de ondas que produzem anomalias negativas. As implicações dos resultados são relevantes para as operações portuárias locais. Dados de nível de água foram obtidos a partir do marégrafo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) instalado no píer do Porto do Mucuripe. Dados de altura máxima de onda foram obtidos a partir de observações realizadas ao largo do Porto do Pecém e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). Funções de densidade de probabilidade (FDP) foram determinadas para ondas e nível da água. A partir da FDP de nível de água foi calculado o número de horas por ano que o nível está acima do nível zero. Foi realizada a convolução das FDPs para obter a FDP conjunta, empregando a amplitude de onda negativa. Foi observado que níveis abaixo do nível zero ocorrem em menos de 0,5% do tempo, o que para um ano representa cerca de 15 dias.

Palavras-chaves: nível do mar, marés, ondas, probabilidade conjunta.

ABSTRACT

The present paper assesses the water level variability on the costal zone of Fortaleza, Ceará State, based on water level and wave records. The main goal is to evaluate statistically the occurrences of positive levels above the reference level of spring tide low water at solstice, and the effects of waves that may produce negative anomalies. The results are important to the local harbor activities. Water level records were obtained from a tide-gauge operated by Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) at the pier of Port of Mucuripe. Wave maximum height data were obtained from observations carried out offshore Port of Pecém and available by National Institute of Hydrographic Research (INPH). Probability density functions (PDF) were calculated for wave and water level. The number of hours per year that the water level is above the zero level was calculated from the water level PDF. Both density functions were convoluted to give a joint probability distribution, using the negative wave amplitude. Negative levels produced by spring tide low water and high wave height accounted for less than 0.5% of the time, what means nearly 15 days per year.

Key words: sea level, tides, waves, joint probability.

¹ Departamento de Oceanografia - Universidade Federal de Pernambuco - Docean/UFPE. Av. Prof. Moraes, 1235, Recife-PE, CEP: 50.670-901. Email: guto.schettini@gmail.com. Bolsa CNPq 306772/2010-8.

² Instituto de Ciências do Mar - Universidade Federal do Ceará - LABOMAR/UFC. Av. da Abolição, No 3207, Meireles, Fortaleza, CE, CEP 60165-081. Email: parente@labomar.ufc.br. Bolsa CNPq 306217/2007-4.

³ Programa de Pós-Graduação em Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGGeo/UFRGS. C.P. 15001, CEP 91509-900 Porto Alegre - RS. Email: nane.truccolo@gmail.com

INTRODUÇÃO

O nível da linha de costa varia em resposta a diversos fatores atuando em diversas escalas de espaço e tempo, porém gerando um sinal único. As escalas de tempo mais relevantes em processos costeiros atuais estão relacionadas com ondas de gravidade, marés, *seiches* e *tsunamis*. Todos estes fenômenos produzem perturbações no nível da água em forma de ondas. A escala de tempo é dimensionada pelo período da onda, e tanto o período como o tempo de recorrência (ou frequência) são relevantes.

Ondas de gravidade são perturbações da superfície do mar causadas pela ação do vento que, por meio do atrito, força seu retorno ao estado de equilíbrio e, por inércia, produz uma oscilação na superfície. As ondas geradas pelo vento são de natureza progressiva, podendo desde o ponto onde foram geradas. A escala de tempo associada com ondas de gravidade se encontra na faixa de 3 - 20 segundos. A escala espacial vertical de ondas é dada por sua altura, que é a distância entre o nível mínimo e máximo da perturbação. Ondas de gravidade podem ter altura que vária de alguns centímetros a dezenas de metros.

Marés são perturbações da superfície do mar causadas pela interação gravitacional do sistema Terra-Lua-Sol, juntamente com a rotação da Terra. As escalas de tempo das marés são principalmente entre 6 horas até 15 dias, sendo estas classificadas em astronômicas e meteorológicas. As primeiras são as descritas acima, enquanto que as segundas são produzidas pela ação do vento. Contudo, diferentemente das ondas de gravidade, as marés meteorológicas respondem em escalas de tempo maior, numa faixa de 2 a 4 dias. A escala espacial vertical varia nas faixas de centímetros até 15 metros (astronômicas), e de centímetros até alguns metros (meteorológicas).

Seiches são perturbações da superfície do mar causadas pela oscilação natural de ambientes semi-restritos, como baías e enseadas, sendo alimentadas pela energia originada das próprias marés ou da ação do vento sobre a água. A escala de tempo dos *seiches* depende da profundidade e extensão do corpo aquoso, sendo normalmente da ordem de dezenas de minutos, com altura de até dezenas de centímetros.

Tsunamis são perturbações da superfície do mar causadas por atividade sísmica. São ondas que potencialmente trafegam por todos os oceanos em questão de horas, sendo observadas como ondas de período da ordem de dezenas de minutos. A altura dependerá da proximidade do sismo e da conformação da costa, que pode potencializar seus efeitos ou até mesmo anulá-los. Ondas de gravidade, *seiches* e

tsunamis que apresentam escala de tempo inferior a horas são denominadas de oscilações em frequência supra-mareal. Marés astronômicas em escalas de 6 a 25 horas constituem as oscilações em frequências mareais, e as marés meteorológicas, em escala de tempo de dias constituem as oscilações em frequência sub-mareais (Truccolo, 2005).

A presente análise objetiva fornecer uma avaliação da variabilidade do nível da água no Porto do Mucuripe produzida por ondas e marés. *Seiches*, por apresentarem um papel irrelevante devido à altura da maré regional, e *tsunamis*, por serem de natureza aleatória e de ocorrência rara, não foram avaliados. O conhecimento do regime das marés astronômicas é fundamental para operações de navegação em portos, pois determinam a coluna de água disponível para o tráfego marítimo em escala de horas, e podem ser previstas satisfatoriamente. Por outro lado, afetam a coluna d'água da ordem de metros em escala de segundos, e sua previsibilidade está associada com os padrões meteorológicos, previsíveis somente em uma escala de tempo de poucos dias. Contudo, efeitos de ondas conjugados com períodos de baixa-mar podem ser potencialmente prejudiciais à segurança da navegação em acesso a portos (Demirbilek & Sargent, 1999).

MATERIAL E MÉTODOS

A presente análise de nível da água foi realizada com dados de onda obtidos com um ondógrafo direcional instalado ao largo do Porto do Pecém, e dados de nível da água obtidos com um marégrafo instalado no cais do Porto do Mucuripe (Figura 1).

Os dados de onda foram obtidos através de um ondógrafo do tipo bóia, instalado nas coordenadas 03°29'31"S - 38°59'03"W, em uma área com 18 m de profundidade (INPH, 1998). O ondógrafo determina a altura das ondas a partir dos movimentos gerados pela bóia, que são registrados continuamente por períodos de 20 minutos, e transmitidos por rádio para uma base. Posteriormente os dados são reduzidos através de análise espectral para descritores como altura máxima, altura significativa, período e direção de ondas. Altura máxima é a altura máxima registrada em um período de 20 minutos. Altura significativa é definida como a altura média do terço superior. O período utilizado na presente análise consiste de dados coletados em intervalos de 3 horas, para o período de 13 de março a 31 de dezembro de 1997. A Figura 2 apresenta a série temporal de altura máxima (azul) e altura significativa (vermelho) de onda. Para o propósito de avaliação de níveis extremos foi empregados os dados de altura máxima.

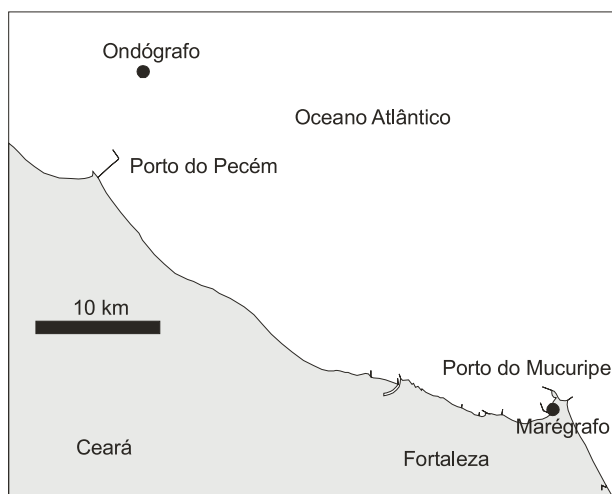
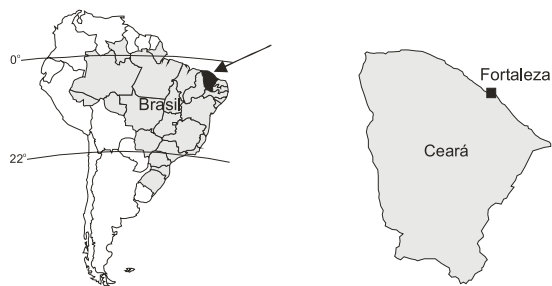


Figura 1 - Localização esquemática dos pontos de coleta de dados de ondas (ondógrafo) e nível da água (marégrafo).

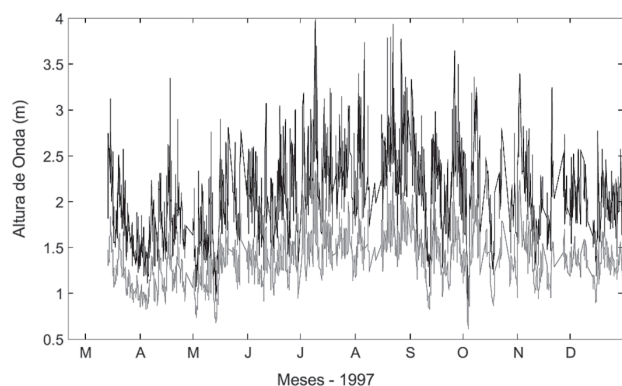


Figura 2 - Séries temporais de altura máxima (azul) e altura significativa (vermelho) de ondas ao largo do Porto de Pecém (fonte: INPH, 1998).

Os dados de nível de água foram obtidos através de um marégrafo instalado no cais do Porto do Mucuripe, operado pelo IBGE (2009), que determina a variação do nível da água em função do tempo através da pressão hidrostática exercida sobre um transdutor. O período utilizado na presente análise consiste de dados coletados em intervalos de 5 minutos, para o período entre 18 de abril de 2008 e 16 de fevereiro de 2009. A Figura 3 apresenta o registro

de nível da água para o período. O nível da água foi referenciado pelo mínimo nível observado no presente registro, similar nos meses de abril de 2008 e fevereiro de 2009. Os valores podem ser considerados próximos ao valor extremo equinocial entre março e abril.

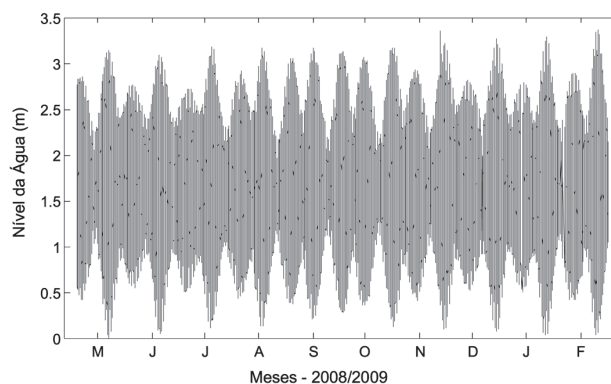


Figura 3 - Série temporal de nível da água registrado no Porto do Mucuripe (fonte: IBGE, 2009).

Os dados foram analisados em termos de distribuição de frequência, pela qual foram determinadas as funções de densidade de probabilidade (FDP) de ocorrência de uma dada altura máxima de onda e um dado nível de água, para 40 classes de altura e nível, respectivamente. A partir das FDPs foram obtidas as probabilidades acumuladas (P_{AC}), a partir da qual foi calculada a expectativa de horas acima de um dado nível (E_H), através da fórmula:

$$E_H = (1 - P_{AC})T \quad (1)$$

onde, T é um período de tempo, no caso, as horas de um ano. O resultado fornecido através da Equação 1 indica a expectativa de horas acima de nível apenas considerando as oscilações em frequências mareais e sub-mareais registradas pelo marégrafo, uma vez que oscilações em frequência supra-mareal relacionadas com ondas de gravidades são eliminadas do registro mareográfico por filtros mecânicos ou matemáticos.

Contudo, os efeitos das oscilações em frequências supra-mareais podem ter um caráter limitante no calado dos navios em regiões costeiras desabrigadas, como na parte externa ao molhe do Porto do Mucuripe. Para avaliar o efeito de ondas de gravidade em conjunto com o nível de água foi adotado o conceito de probabilidade conjunta (Pugh, 1987; Tawn, 1990). O método é utilizado primeiramente para avaliar níveis extremos positivos, no caso da conjunção de

marés astronômicas e meteorológicas. No presente caso, o método visa à obtenção de probabilidades de extremos negativos, ou seja, períodos de baixamares de sizígias ocorrendo simultaneamente com ondas de grande altura. Embora de grande altura, e.g., 2 m, a oscilação é de alta frequência em relação às marés e induz ao rebaixamento oscilatório do nível da maré no equivalente a metade da altura. Em águas rasas as ondas de gravidade não são simétricas e a anomalia para baixo do nível médio é menor do que acima, ou a amplitude negativa é menor que a amplitude positiva (Dean & Dalrymple, 1991). Este efeito não será levado em consideração, o que torna a estimativa de excesso de nível mais conservadora. A determinação da função de probabilidade conjunta é calculada pela integral de convolução (Pugh, 1987):

$$D_o(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} D_T(\eta + y)D_W(y) dy \quad (2)$$

onde, $D_T(\eta)$ é a FDP do nível do mar em frequências mareais e sub-mareais, $D_W(y)$ é a FDP da amplitude negativa de onda, e $D_o(\eta)$ é a densidade de probabilidade conjugada dos efeitos de marés e ondas. A densidade de probabilidade é adimensional e seu produto com o número de horas do ano fornece o número esperado de horas para os níveis conjugados devido a marés e ondas. A integral $D_o(\eta)$ não é a unidade, e a interpretação do resultado deve ser considerada, no presente caso, como o número de horas em que o nível estará abaixo de determinado valor.

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta as distribuições de probabilidade e probabilidade acumulada para as séries temporais de altura máxima de onda (Figura 2) e de nível da água (Figura 3). A distribuição de probabilidade de altura máxima de onda apresenta padrão unimodal, centrado em altura de 2 m, chegando a valores extremos da ordem de 3,5 m e máximos de quase 4 m. A distribuição de probabilidade de nível da água apresenta padrão bimodal de energia equivalente, sendo centradas em torno de 1 e 2,5 m acima do nível mínimo observado.

A expectativa de excesso de nível da água em função somente das marés é apresentada na Figura 5. Esta figura é análoga à Figura 4-D, transposta para apresentar o nível na ordenada, e a abscissa é o produto da frequência acumulada pelo número de horas de um ano (8.760). A interpretação do gráfico indica

que em todo o período de um ano o nível estará acima de zero, sendo que o número de horas de excesso de nível diminui com o aumento do nível da água em função da distribuição de probabilidade (Figura 4-C). O excesso de nível de até 0,5 m ocorre em mais de 8.300 horas por ano (~97% do tempo), o excesso de nível de até 1,0 m ocorre em 6.600 horas por ano (~75% do tempo), e assim por diante. A Tabela I apresenta os valores detalhados para o número de horas de excesso de nível e seus respectivos percentuais.

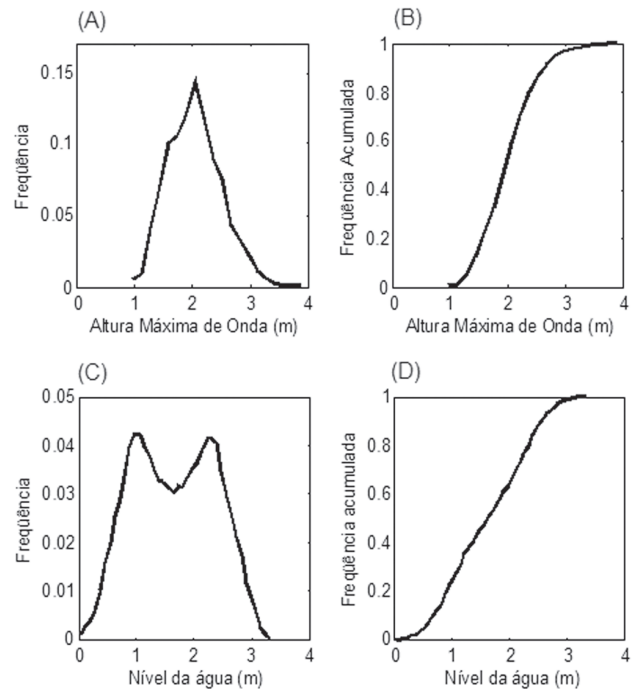


Figura 4 - Distribuição de probabilidade e probabilidade acumulada para o registro de ondas (A e B, respectivamente), e nível da água (C e D, respectivamente).

Tabela I - Sumário de valores de número de horas por ano de excesso de nível para os dados níveis de referência, e os seus respectivos percentuais.

Nível	Número de horas/ ano	Frequência temporal (%)
0,5	8.335	95
1,0	6.623	75
1,5	4.748	54
2,0	3.072	35
2,5	1.054	12
3,0	81	1

O cruzamento das distribuições de densidade de probabilidade de nível da água e altura de ondas é apresentado na Figura 6, na forma de diagrama de cores e em bloco tri-dimensional. É notável a presença dos dois picos de energia relacionados com a distribuição de densidade de probabilidade do nível da água, indicado pelas duas manchas vermelhas.

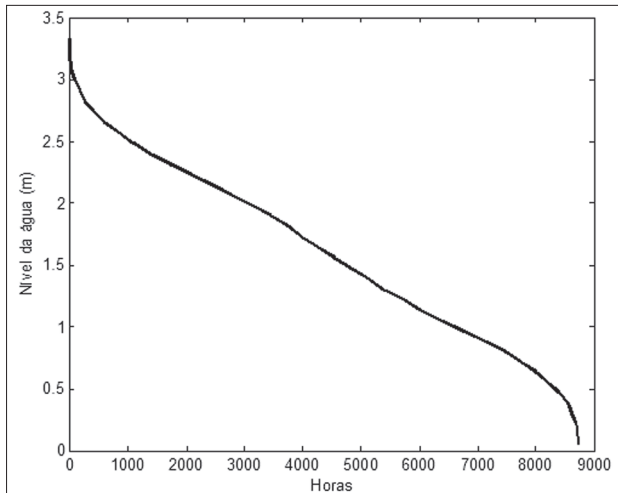


Figura 5 - Curva de expectativa de excesso de nível da água considerando apenas a probabilidade de oscilações em freqüências mareais e sub-mareais.

O resultado da convolução da matriz de densidade de probabilidade conjunta apresentada na Figura 6, cuja distribuição se apresenta muito variável em função do nível. Considerando agora o nível como probabilidade conjunta de maré e ondas, passam a existir probabilidades de ocorrências de níveis negativos, lembrando aqui que a análise foi realizada apenas com a amplitude negativa das ondas para obtenção de níveis extremos negativos. A função de densidade de probabilidade acumulada é apresentada na Figura 7, da mesma maneira que na Figura 5. A partir dessa função é possível estabelecer o número de horas por ano em que o nível, dado pela conjugação de efeitos de ondas e marés, fica abaixo do nível mínimo das marés observadas, representado pela área demarcada. No presente caso representa 346 horas por ano, ou 15 dias, ou menos de 0,5% do tempo.

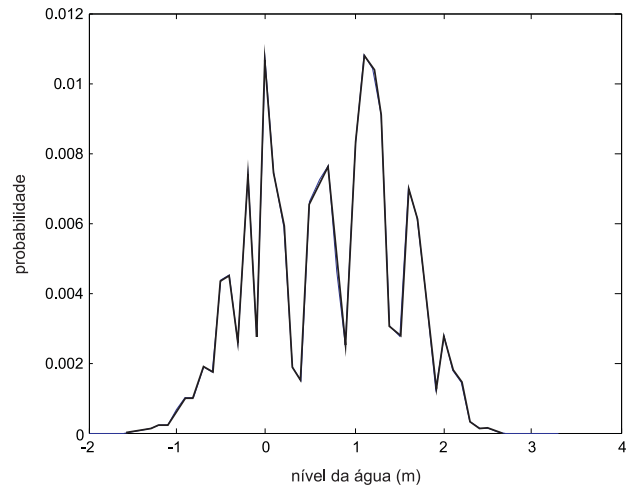


Figura 7 - Probabilidade conjunta de marés e ondas (amplitude negativa).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As dimensões de navios aumentaram drasticamente ao longo do século passado, e a tendência é que esta se mantenha por muito tempo. Somente no período de 1975 a 2005 a capacidade de transporte média de navios de contêineres mais que dobrou (Jung, 2007), o que vêm exigindo adequações da infra-estrutura portuária, e da capacidade de navegação nas vias de acesso. Assim, o entendimento das características da variabilidade do nível da água em diferentes escalas de tempo, independentes ou conjugadas, constitui ferramentas de gestão portuária.

A análise de expectativa (Figura 8) de excesso de nível da água acima do nível zero de baixa-mar de sizígia equinocial mostrou que em mais de 95% do tempo o nível está 0,5 m acima. Por outro lado, a análise da probabilidade conjugada de nível da água

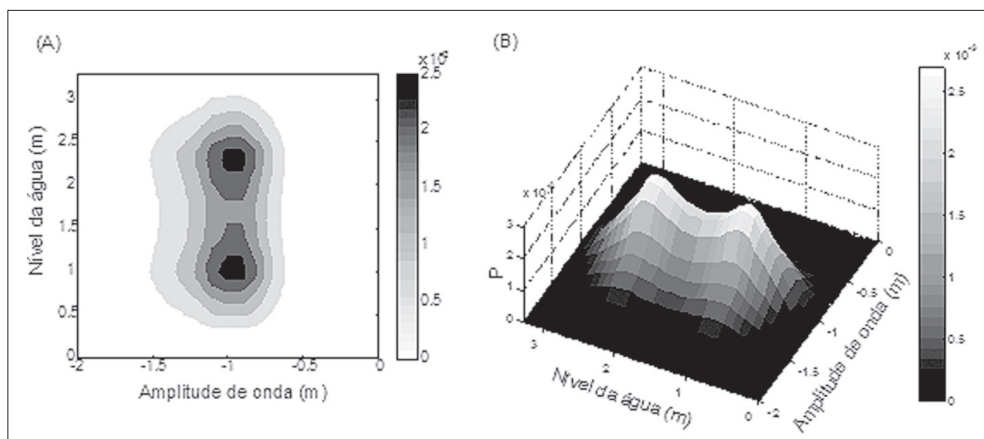


Figura 6 - Distribuição de probabilidade conjugada de nível da água (ordenada) e altura máxima de onda (abscissa), indicada pela escala de cores, em projeção plana (A) e em perspectiva (B).

e ondas mostrou que condições críticas de níveis negativos ocorrem em menos de 0,5% do tempo. Contudo, tais valores devem ser compreendidos como parâmetros estatísticos, e o efetivo controle operacional deve-se basear em observações diretas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dean, R.G. & Dalrymple, R.A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific, New York, 1991.

Demirbilek, Z. & Sargent, F. *Deep-draft coastal navigation entrance channel practice*. US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Technical Note I-63, 1999.

IBGE http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm, 2009

INPH. *Monitoramento ambiental da área marítima adjacente a Pecém - CE: medições de ondas*. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, Relatório INPH 078/98, Rio de Janeiro, 1998.

Jung, B.M.. Trend of containership size growth and port industry market structure change. www.plnuri.or.kr/board/downnum.asp (consultado em 18 de março de 2009).

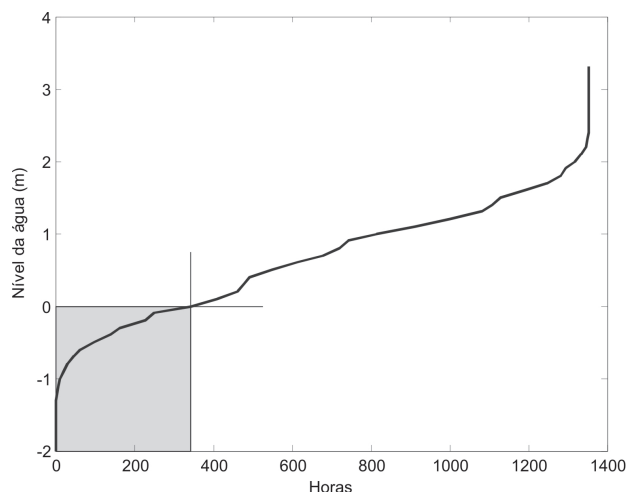


Figura 8 - Curva de expectativa de níveis mínimos conjugados de maré e ondas.

Pugh, D.T. *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley & Sons, 472 p., New York, 1987.

Tawn, J.A.. Estimating probabilities of extreme sea-levels. *Appl. Stat.*, v.41, n.1, p.77-93, 1990.

Truccolo, E.C. *Dinâmica de estuários em frequência mareal e sub-mareal*. Monografia de Qualificação de Doutorado, PPGGeo/UFRGS, 65 p., Porto Alegre, 2005.