DIEGO LOURENÇO CARTACHO

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA CHUVA-MARÉ PARA A BACIA DO RIO
SANTO ANTÔNIO EM CARAGUATATUBA (SP)**

São Paulo

2013

DIEGO LOURENÇO CARTACHO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências, no âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica.

Orientador: Professor Titular da Escola Politécnica da USP Dr. Paolo Alfredini.

São Paulo

2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 28 de junho de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cartacho, Diego Lourenço

Análise probabilística chuva-maré para a Bacia do Rio Santo Antônio em Caraguatatuba (SP) / D.L. Cartacho. – versão corr. -- São Paulo, 2013.

116 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1. Hidráulica marítima 2. Nível do mar 3. Pluviometria I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II. t.

Aos meus pais e irmão,

pelo eterno incentivo e condução aos
caminhos da vida, com honestidade,
dedicação e respeito ao próximo.

AGRADECIMENTOS

“A gratidão é a virtude das almas nobres”

(Esopo¹)

Agradeço às pessoas e instituições que participaram, me incentivaram, me ajudaram nesse trabalho e, sobretudo, passaram pela minha vida construtivamente.

Começo pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, representada pelos queridos professores e orientadores Paolo Alfredini e Emilia Arasaki, que desde a época de iniciação científica, me conduziram na vida acadêmica e me mostraram o prazer de ser um pesquisador.

Expresso minha gratidão à Promon Engenharia² e a todos colegas de trabalho que me abriram as portas ao fascinante mundo da Engenharia, mostrando-me o real sentido de ser Engenheiro Civil, contribuindo para o desenvolvimento do país. Nessa instituição, agradeço especialmente ao Eng^o. Fideo Terayama, pelos ensinamentos e palavras sábias, ao Eng^o Rafael Sakai pela amizade, parceria e trocas de experiências, ao Eng^o Gustavo Guimarães pela paciência e mentoriação, além dos companheiros do departamento de Implantação e Hidráulica (IH) pelos aprendizados diários.

Finalizo esses breves e humildes agradecimentos, lembrando dos amigos Eduardo e Sandra Mancini, Paulo Vinicius, Felipe Castello que, há mais de 15 anos, participam de todos os momentos de minha vida.

Espero conseguir mensurar, com essas poucas palavras, a importância que essas pessoas têm em minha vida.

---

¹ Esopo foi um escritor da Grécia Antiga a quem são atribuídas várias fábulas populares. Em muitos de seus escritos, os animais falam e têm características humanas.

² Programa de Crédito Educativo aos funcionários.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Importância e justificativas	3
1.2	Descrição da área de pesquisa	7
1.2.1	Litoral Norte do Estado de São Paulo: Uma visão geográfica geral 7	
1.2.2	Caraguatatuba: Dados Gerais.....	8
1.2.3	Caraguatatuba: Recursos Hídricos	9
1.3	Risco Associado: Conceitos Básicos.....	12
2	OBJETIVOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Hidráulica Marítima.....	18
3.1.1	Marés Astronômicas.....	20
3.1.2	Marés Meteorológicas	25
3.1.3	Marés para o Litoral Norte do Estado de São Paulo	28
3.2	Meteorologia.....	28
3.3	Chuvas e Marés: uma abordagem estatística	29
3.3.1	Variáveis estatísticas analisadas.....	30
3.3.2	Processos de Bernoulli.....	30
3.3.3	Variáveis aleatórias dos Processos de Bernoulli.....	31

3.3.4	Tratamento matemático para as variáveis aleatórias geométricas dos Processos de Bernoulli	31
3.3.5	Tempo de Recorrência (R) e Período de Retorno (TR)	32
3.3.6	Risco Hidrológico (RH)	32
3.4	Metodologia probabilística para eventos conjugados chuva-maré	33
3.4.1	Compilação dos dados	34
3.4.2	Divisão dos dados em grupos de precipitações	35
3.4.3	Reorganização dos dados parametrizados pelas alturas de marés	36
3.4.4	Cálculo de probabilidades de ocorrência de eventos conjugados chuva-maré	36
3.4.5	Resultados em tabelas e gráficos	39
4	OBTENÇÃO DE DADOS	40
4.1	Dados de marés	40
4.1.1	Origem dos dados de marés	40
4.1.2	Metodologia para compatibilização dos níveis altimétricos de referência de marés	41
4.2	Dados de precipitações pluviométricas	46
4.2.1	Disponibilidade de postos pluviométricos em Caraguatatuba	47
4.2.2	Escolha do posto pluviométrico e sua abrangência temporal	48
5	ELABORAÇÃO DOS DADOS	50
5.1	Resultados pluviométricos	50

5.2	Resultados maregráficos.....	53
5.3	Resultados de eventos conjugados chuva-maré	58
5.3.1	Eventos conjugados: chuva x baixa-mar mínima diária.....	58
5.3.2	Eventos conjugados: chuva x nível médio diário	65
5.3.3	Eventos conjugados: chuva x preamar máxima diária	71
6	EVOLUÇÃO DOS EVENTOS CONJUGADOS AO LONGO DOS ANOS	77
7	DISCUSSÕES	80
7.1	Discussões dos resultados pluviométricos	81
7.2	Discussões dos resultados maregráficos	82
7.3	Discussões dos eventos conjugados chuva-maré.....	83
7.4	Discussões da evolução dos eventos conjugados ao longo dos anos 86	
7.5	Primeiras aplicações práticas: simulação no software Flo-2D.....	87
8	CONCLUSÕES.....	90
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
9.1	Maré meteorológica x maré astronômica	93
9.2	Inserção dos níveis de marés nas simulações matemáticas.....	93
9.3	Projetos de Engenharia	94
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

RESUMO

“Chovia desde o dia 16, aumentando a intensidade das chuvas a partir das 18 horas do dia 17. As primeiras barreiras começaram a ceder nas primeiras horas da manhã do dia 18 e, às 13 horas, mobilizou-se a totalidade da avalanche.”

(CRUZ, 1974)

A descrição do cenário catastrófico no Município de Caraguatatuba, no mês de Março de 1967, que resultou em um dos maiores desastres naturais ocorridos no Brasil³, fomenta a discussão sobre as probabilidades de ocorrência de eventos pluviométricos e/ou elevações do nível do mar nas Zonas Costeiras. Diante dessa realidade, surgiu essa Dissertação, que abordou aspectos hidrológicos, hidráulicos marítimos e, estatísticos, baseados em dados pretéritos de pluviômetros e marégrafos da região do Litoral Norte do Estado de São Paulo. Foram obtidos resultados práticos para futuros projetos de macro-drenagem, obras fluviais e marítimas, que associam a probabilidade de ocorrência conjugada de determinadas chuvas, com correspondentes elevações dos níveis de maré. Também foram realizados estudos da evolução desses eventos conjugados, ao longo de sessenta anos.

PALAVRAS-CHAVES: Hidráulica marítima, níveis de maré, precipitações pluviométricas.

---

³ De acordo com informações de Cruz (1974), 436 mortes foram registradas oficialmente, 400 casas destruídas, 3.000 desabrigados numa população total de 15.000 habitantes. Foram formados depósitos de 4m a 5m de altura no Rio Santo Antônio com blocos entre 30 t e 100 t.

ABSTRACT

“It was raining since March 16th, increasing the intensity of the rainfall at 6:00 pm on March 17th. The first slopes started to sag in the first hours of March 18th, at 1:00 pm, occurred all the debris-flow.”

(translated from CRUZ, 1974)

The catastrophic scenario of the city of Caraguatatuba, in March of 1967, previously described, resulted from one of the most serious natural disasters in Brazil. It fosters discussions about probabilities of rainfall events and /or rise in the sea level in coastal areas. Hence, this research is a consequence of this reality, which approached hydrological, hydraulic and statistical areas, based on past data of rainfall stations and tidal stations in the region of the North Coastal Zone of the State of São Paulo (Brazil). Practical results were used for future designs of macro-drainage, fluvial and maritime projects, that associate the probability of occurrence of certain types of rainfall coupled with their corresponding increase in tidal levels. There were also evaluated studies of the evolution of these events combined over sixty years.

Key-words: Maritime Hydraulics, tidal levels, rainfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Municípios do Litoral Norte do Estado de São Paulo (Brasil) e destacada a Bacia do Rio Santo Antônio (adaptado de IPT, 2001)	2
Figura 2.- Marcas dos deslizamentos na Serra do Mar logo após a Catástrofe de 1967 (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)	4
Figura 3.- Dimensão do volume de material transportado das encostas para a planície. Ao fundo, o Município de Caraguatatuba e a Foz do Rio Santo Antônio (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)	5
Figura 4.- Ponte do Rio Santo Antônio inteiramente ruída após o aumento da vazão líquida e sólida (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)	5
Figura 5.- Acesso ao Município de Caraguatatuba obstruído pelo deslizamento (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)	6
Figura 6.- Várzea do Rio Santo Antônio, após a Catástrofe de Março de 1967 (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba).....	6
Figura 7.- Várzea do Rio Santo Antônio completamente urbanizada em 2012 (GOOGLE BRASIL, 2012).....	7
Figura 8.- Evolução populacional do Município de Caraguatatuba de 1960 a 2012 (IBGE, 2012)	9
Figura 9.- Bacias hidrográficas do Litoral Norte do Estado de São Paulo, estações maregráficas e pluviométricas (adaptado de CBHLN, 2012)	11
Figura 10.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1959, com população aproximada de 9.697 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos).....	13
Figura 11.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1973, com população aproximada de 19.033 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos).....	14

Figura 12.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1994, com população aproximada de 60.960 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos).....	15
Figura 13.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1997, com população aproximada de 69.565 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos).....	16
Figura 14.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 2012, com população aproximada de 100.889 habitantes (GOOGLE BRASIL, 2012)	16
Figura 15.- Contexto da Hidráulica Marítima dentro da Engenharia Civil	19
Figura 16.- Derivação das forças geradoras da maré (ALFREDINI e ARASAKI, 2009)	21
Figura 17.- Maregrama previsto para o dia 20 de maio de 1947 no marégrafo de Torre Grande, Porto de Santos (adaptado de ALFREDINI e ARASAKI, 2009)	23
Figura 18.- Ilustração das forças geradoras de marés de sizígias. Posição relativa Terra-Sol-Lua (traduzido de COMET, 2012)	24
Figura 19.- Ilustração das forças geradoras de marés de quadratura. Posição relativa Terra-Sol-Lua (traduzido de COMET, 2012)	25
Figura 20.- Maré observada x Maré prevista x Maré meteorológica para Ubatuba em 1993 (Fonte: prof. Joseph Harari em comunicação pessoal ao Prof. Paolo Alfredini)	27
Figura 21.- Registro de marés do dia 23/06/82 a 24/06/82 da Base de Pesquisas de Ubatuba (MESQUITA,1997).....	28
Figura 22.- Relação entre os valores medidos de marés (Y) e os níveis de referência (local e IBGE)	42
Figura 23.- Relação entre zero da CODESP, zero do IBGE e NMM para o Porto de Santos.	43
Figura 24.- Localização dos postos pluviométricos de Caraguatatuba (flechas em vermelho), (adaptado de GOOGLE BRASIL, 2012)	48

Figura 25.- Gráfico das precipitações acumuladas anuais registradas no posto E2-046 (Caraguatatuba)	51
Figura 26.- Gráfico das precipitações médias mensais registradas no posto E2-046 (Caraguatatuba)	52
Figura 27.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados completa (1954 a 2005)	55
Figura 28.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados parcial (1954 a 1991)	56
Figura 29.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados parcial (1968 a 2005)	57
Figura 30.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x baixa-mar mínima diária)	64
Figura 31.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x nível médio diário de maré)	70
Figura 32.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x preamar máxima diária)	76
Figura 33. - Gráficos de ocorrências conjugadas chuva ($p > 0$ mm/dia) e preamares	78
Figura 34.- Gráficos de ocorrências conjugadas chuva ($p > 50$ mm/dia) e preamares	79
Figura 35.- Área de deposição do cone de dejeção de escorregamento de detritos sobre o Município de Caraguatatuba atualmente, em função de um evento semelhante ao de Março de 1967 (WITISKI, 2012)	88
Figura 36.- Profundidade de depósitos de escorregamento de detritos sobre o Município de Caraguatatuba atualmente, em função de um evento semelhante ao de Março de 1967 (WITISKI, 2012)	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.- Dados gerais atuais do Município de Caraguatatuba (Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAGUATATUBA, 2012)	9
Tabela 2.- Exemplo de compilação dos dados diários de maré e, precipitações pluviométricas, na Bacia do Santo Antônio, para o mês de Janeiro de 1954.....	34
Tabela 3.- Cálculo de probabilidade de eventos, para $P \geq 0$ mm/dia e Nível médio do mar, da região da Bacia do Santo Antônio/ Caraguatatuba	37
Tabela 4.- Cálculo de probabilidade de eventos, para $P \geq 75$ mm/dia e Nível médio do mar, da região da Bacia do Santo Antônio/ Caraguatatuba	39
Tabela 5.- Valores do NMM (B) de cada ano para o Porto de Santos e diferenças anuais com o zero do IBGE (H) (ALFREDINI, ARASAKI e AMARAL, 2008)	45
Tabela 6.-Exemplo de conversão de referências para dados de maré do dia 01/01/1954	46
Tabela 7.- Postos pluviométricos no Município de Caraguatatuba (ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005)	47
Tabela 8.- Informações gerais do posto pluviométrico E2-046 (ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005)	49
Tabela 9.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0$ mm/dia) x baixa-mar mínima diária.....	59
Tabela 10.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25$ mm/dia) x baixa-mar mínima diária	60
Tabela 11.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50$ mm/dia) x baixa-mar mínima diária.....	61
Tabela 12.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75$ mm/dia) x baixa-mar mínima diária.....	62

Tabela 13.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x baixa-mar mínima diária.....	63
Tabela 14.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x baixa-mares mínimas diárias	63
Tabela 15.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar.....	65
Tabela 16.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar	66
Tabela 17.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar	67
Tabela 18.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar	68
Tabela 19.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar	69
Tabela 20.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x nível médio diário da maré	71
Tabela 21.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária.....	71
Tabela 22.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária.....	72
Tabela 23.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária.....	73
Tabela 24.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária.....	74
Tabela 25.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária.....	75

Tabela 26.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x preamar máxima diária	75
Tabela 27.- Tendência de variação secular do nível do mar (1954 a 2005).....	82
Tabela 28.- Tendência de variação secular do nível do mar (1954 a 1991).....	83
Tabela 29.- Tendência de variação secular do nível do mar (1968 a 2005).....	83

LISTA DE SÍMBOLOS, VARIÁVEIS E ABREVIATURAS

B= altura do NMM utilizando o nível de referência da CODESP, para o Porto de Santos. Graduação em cm;

CODESP= Companhia Docas do Estado de São Paulo;

$E[R]$ =valor esperado da variável geométrica “Tempo de Recorrência”;

H= diferença altimétrica entre Nível Médio do Mar (NMM) e zero do IBGE para o Porto de Santos, e estendido para o Litoral Norte do Estado de São Paulo. Graduação em cm;

IBGE= Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

N_i = número de ordem decrescente do evento;

N = número de eventos anuais com tais características de precipitação e nível de maré;

NMM= Nível Médio do Mar;

T=altura de maré para diferentes marégrafos do Litoral Norte do Estado de São Paulo, utilizando como referência altimétrica o zero do IBGE em Imbituba- SC. Graduação em cm;

p = probabilidade de ocorrência de “sucesso” para a variável geométrica do processo de Bernoulli;

$P(\%)$ = probabilidade de ocorrência de certo evento conjugado chuva-maré;

r =número de eventos de “falhas” até a ocorrência do “sucesso”, para a variável geométrica do processo de Bernoulli;

R = tempo de recorrência;

RH= risco hidrológico;

TR= período de retorno;

X= altura do NMM utilizando o nível de referência local e desconhecido dos marégrafos do Litoral Norte do Estado de São Paulo. Graduação em cm;

Y= altura de maré para diferentes marégrafos do Litoral Norte do Estado de São Paulo, utilizando referências altimétricas locais e variáveis. Graduação em cm;

1 INTRODUÇÃO

A região do Litoral Norte do Estado de São Paulo (Figura 1), composta pelos Municípios de Caraguatatuba, São Sebastião, Ilhabela e Ubatuba apresenta-se como uma área de alto risco a inundações em sua Planície Costeira, causadas por eventos extremos de chuvas e/ou elevações dos níveis de maré. Esse risco se agrava quando associado ao valor agregado da região, como, por exemplo, o grande crescimento populacional e instalações de grandes empreendimentos, como da indústria petrolífera.

Diante das necessidades de estudos hidráulicos mais aprofundados nessa região, surgiu essa Dissertação, que está inserida em uma Rede Acadêmica, financiada pela CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) denominada Rede Litoral⁴, conforme ITA (2009). Esse grupo é composto pelas Instituições: USP-Universidade de São Paulo/Escola Politécnica, ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá e INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, além da participação internacional do Politecnico di Torino/Itália.

---

⁴ Título do projeto: Mudanças Climáticas Globais e impactos na zona costeira: modelos, indicadores, obras civis e fatores de mitigação/adaptação – REDE LITORAL NORTE SP (CAPES - Edital Ciências do Mar 09/2009).

Figura 1.- Municípios do Litoral Norte do Estado de São Paulo (Brasil) e destacada a Bacia do Rio Santo Antônio (adaptado de IPT, 2001)

1.1 Importância e justificativas

A Dissertação apresentada está inserida em uma área da Engenharia Civil, com interface entre a Hidráulica Marítima (níveis de marés) e a Hidrologia (precipitações pluviométricas). O principal objetivo foi avaliar os eventos de precipitações pluviométricas conjugadas aos níveis de maré, e obter resultados práticos aplicáveis a projetos fluviais e marítimos na Bacia do Rio Santo Antônio, localizada no Município de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo.

As áreas litorâneas estão sujeitas às ações severas do mar e/ou precipitações. A região do Litoral Norte do Estado de São Paulo é muito conhecida por suas chuvas orográficas, causadas pela umidade das frentes vindas do Oceano Atlântico que, quando encontram a proximidade da cadeia montanhosa da Serra do Mar, precipitam-se sobre as cidades costeiras. Essas localidades têm grande demanda de estudos no assunto, principalmente com histórico de ocorrências pretéritas de catástrofes no último século. Segundo Brigatti e Sant'Anna Neto (2008), o Litoral Norte do Estado de São Paulo, pelas suas próprias características naturais e pela recente dinâmica econômica, apresenta-se como uma área onde o desenvolvimento de estudos que visem a melhor compreensão dos fatores naturais e antrópicos torna-se extremamente importante.

Com a finalidade de ilustrar a magnitude da chamada Catástrofe de 1967, foram coletadas imagens de Caraguatatuba, logo após o evento de deslizamento das encostas. As fotografias da Figura 2 até a Figura 5 retratam a destruição causada pelas chuvas intensas⁵. A Figura 6 mostra as marcas da enchente do Rio Santo Antônio em Março de 1967, enquanto que comparativamente, a Figura 7 ressalta o maior valor agregado da mesma região atualmente. Evidencia-se que uma nova ocorrência de um evento similar ao de 1967 causaria perdas significativas à cidade de Caraguatatuba.

---

⁵ Segundo Cruz (1974) choveu quase todo dia no verão do episódio, sendo 541,2mm (20 dias de chuva) em janeiro e 268,6mm (14 dias) em fevereiro e todos os dias em março até o dia da Catástrofe, culminando em 115mm no dia 17 e 420mm no dia 18.

Nesse contexto regional enquadra-se este estudo, que pretende fornecer à Sociedade análises consistentes de dados históricos de níveis de maré e alturas de precipitações pluviométricas.

Figura 2.- Marcas dos deslizamentos na Serra do Mar logo após a Catástrofe de 1967
(Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)

**Figura 3.- Dimensão do volume de material transportado das encostas para a planície.
Ao fundo, o Município de Caraguatatuba e a Foz do Rio Santo Antônio (Fonte: acervo do
Arquivo Municipal de Caraguatatuba)**

**Figura 4.- Ponte do Rio Santo Antônio inteiramente ruída após o aumento da vazão
líquida e sólida (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)**

Figura 5.- Acesso ao Município de Caraguatatuba obstruído pelo deslizamento (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)

Figura 6.- Várzea do Rio Santo Antônio, após a Catástrofe de Março de 1967 (Fonte: acervo do Arquivo Municipal de Caraguatatuba)

Figura 7.- Várzea do Rio Santo Antônio completamente urbanizada em 2012 (GOOGLE BRASIL, 2012)

1.2 Descrição da área de pesquisa

Este item destina-se à explanação da região pesquisada, desde dados demográficos até a organização hidrográfica do Município de Caraguatatuba.

De acordo com IBGE (2012), o topônimo Caraguatatuba provém do tupi "carauatá-tyba" = abundância de gravatá (planta da família das bromeliáceas), ou "Curaá-guat-atybo" = enseada com altos e baixos.

Por essa antiga definição, nota-se a caracterização do município, desde os seus primórdios, ao relevo acidentado da Serra do Mar paulista. Baseado nesta característica do Litoral Norte do Estado de São Paulo é que esta Dissertação ganha fundamento.

1.2.1 Litoral Norte do Estado de São Paulo: Uma visão geográfica geral

A região do Litoral Norte do Estado de São Paulo distribui-se em sentido NE-SW, comprimida entre a Serra do Mar e o Oceano Atlântico, tendo como limites a Serra de Juqueriquerê e a Ilha de São Sebastião, na longitude aproximada do

meridiano 46° e a Serra de Parati no limite entre os Estados do Rio de Janeiro e São Paulo, na latitude do meridiano 44° 30'. É cruzada na latitude do Município de Ubatuba pelo Trópico de Capricórnio, portanto situando-se numa área de transição climática entre os sistemas atmosféricos intra e extratropicais, apresentando maior atuação dos sistemas tropicais e grande atividade.

Este trecho do litoral paulista apresenta-se muito recortado, com a presença de escarpas festonadas que, em muitos casos, terminam diretamente sobre o oceano. Desenvolvida em sua maior parte num pacote de sedimentos do Quaternário, a planície costeira, aliada às estruturas da Serra do Mar, é dominada por costas altas, intercaladas por pequenas planícies e enseadas, que formam praias de bolso frontais (BRIGATTI e SANT'ANNA NETO, 2008).

Com uma população estimada em 225.000 habitantes (FIBGE, 2001) e ocupando uma área de 1950 km², a região tem sofrido fortes pressões antrópicas, principalmente a partir da década de 1980, facilitadas pela conclusão da Rodovia BR-101. Assim, verificou-se um enorme incremento populacional, cristalizado num rápido processo de urbanização e modificação da paisagem natural (BRIGATTI e SANT'ANNA NETO, 2008).

1.2.2 Caraguatatuba: Dados Gerais

A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados gerais do Município de Caraguatatuba. Já a Figura 8 ilustra o gradiente populacional de 1960 a 2012, o qual foi demonstrado na sequência de imagens aéreas (Figura 10 a Figura 14).

O constante crescimento demográfico, aliado à infraestrutura de saneamento básico e taxa de urbanização, credenciam Caraguatatuba como o município mais importante do Litoral Norte do Estado de São Paulo.

Tabela 1.- Dados gerais atuais do Município de Caraguatatuba (Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAGUATATUBA, 2012)

Tipologia	Estância Balneária
População	100.889 hab.
Taxa de Urbanização	96,58%
Taxa de crescimento anual da população (média 2000/2010)	2,78%
Área	484 km ²
Altitude	2 m
Orla	40 km
Temperatura Climática	Tropical
Abastecimento de água	90%
Coleta de Esgoto	72%
Tratamento de Esgoto	100%

Figura 8.- Evolução populacional do Município de Caraguatatuba de 1960 a 2012 (IBGE, 2012)

1.2.3 Caraguatatuba: Recursos Hídricos

Ao analisarem-se os recursos hídricos de Caraguatatuba, observa-se um município com bacias hidrográficas relevantes no Litoral Norte do Estado de São Paulo, dentre as quais destacam-se a do Rio Juqueriquerê e a do Rio Santo Antônio, a qual será o foco dessa Dissertação.

Conforme consta no Plano de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte “A Bacia Hidrográfica do Litoral Norte foi definida como a “Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI – Litoral Norte” pela Lei Estadual no 9.034/94, de 27/12/1994, que dispôs sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos para o biênio 1994/95”. Também destaca-se neste documento que a Bacia Hidrográfica do Litoral Norte é dividida em trinta e quatro bacias, cuja localização é apresentada na Figura 9 (COMITÊ DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO LITORAL NORTE, 2009).

Figura 9.- Bacias hidrográficas do Litoral Norte do Estado de São Paulo, estações maregráficas e pluviométricas (adaptado de CBHLN, 2012)

1.3 Risco Associado: Conceitos Básicos

Diante dos fatos, dados citados, imagens e, sobretudo, por essa pesquisa, permear pelas ocorrências dos eventos de chuva e marés, nas quais a probabilidade rege as leis naturais, optou-se por aprofundar o entendimento dos conceitos associados a riscos. O risco é composto por três variáveis: probabilidades, valores e defesas. Diante do contexto dessa pesquisa, pode-se afirmar que os resultados atingidos referem-se à primeira variável (probabilidades), entretanto, ressalta-se o crescente valor agregado do Município de Caraguatatuba e, a fragilidade das defesas contra desastres naturais (ver cone de dejeção da Figura 12).

Castro *et al.* (2005) fizeram uma revisão bibliográfica na qual são citadas definições de autores nacionais e internacionais sobre os conceitos de risco e perigo natural. A primeira definição conceitua risco como “uma categoria de análise associada, *a priori*, às noções de incerteza, exposição ao perigo, perda e prejuízos materiais, econômicos e humanos em função de processos de ordem natural (tais como os processos exógenos e endógenos da Terra) e/ou daqueles associados ao trabalho e às relações humanas. Já Zuquette e Nakazawa (1998 *apud* CASTRO *et al.*, 2005) apontam que risco é uma “situação de perigo ou dano, ao homem e a suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processo geológico, induzido ou não”.

Conforme citado nas pesquisas de Castro *et al.* (2005), os trabalhos de Hewitt (1997), Cerri & Amaral (1998) e Cutter (2001) conceituam que a noção de perigo relaciona-se intrinsecamente com o processo/evento a ocorrer, enquanto o risco estará sendo definido, geralmente, a partir de uma escala ou hierarquia de probabilidades e de graus/níveis de aceitabilidade de ocorrência dos eventos perigosos, na tentativa de classificar áreas com níveis de risco (perdas/prejuízos/danos) maiores e menores.

Notam-se que as definições citadas acima têm em comum termos relacionados à possibilidades, probabilidades, incertezas, portanto, reforça a abordagem que eventos naturais devem ser tratados estatisticamente, associados a períodos de retornos. Além disso, outro conceito é obtido notando que os autores relacionam risco a perdas materiais, sociais, ambientais, etc. A sequência de

imagens aéreas (Figura 10 a Figura 14) mostra o desenvolvimento do Município de Caraguatatuba entre os anos de 1959 a 2012. Ressalta-se o aumento significativo do risco de perdas, conforme conceituado pelos autores acima. No item 3.3.6 estará definido o risco estatístico de eventos naturais.

Essa Dissertação, portanto, ganha importância ao calcularem-se as probabilidades de ocorrência de eventos naturais (chuva-maré), visando a aplicação prática de seus resultados em obras de Engenharia, a fim de mensurar os reais riscos de perdas. Enfim, a avaliação de como os eventos extremos estão se comportando ao longo dos anos, enquadra-se na definição que o risco é proporcional ao aumento do valor agregado da região, ou seja, à medida que o Município de Caraguatatuba se estabelece em zona suscetível a desastres, e recebe o aporte de investimentos, como da indústria petrolífera, o risco por definição, aumenta consideravelmente.

Figura 10.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1959, com população aproximada de 9.697 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos)

Figura 11.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1973, com população aproximada de 19.033 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos)

Figura 12.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1994, com população aproximada de 60.960 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos)

Figura 13.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 1997, com população aproximada de 69.565 habitantes (Fonte: base Aerolevantamentos)

Figura 14.- Fotografia aérea do Município de Caraguatatuba em 2012, com população aproximada de 100.889 habitantes (GOOGLE BRASIL, 2012)

2 OBJETIVOS

Este capítulo visa expor os objetivos desta Dissertação, lembrando do contexto em que a mesma está inserida. Todas as metodologias, pesquisas, dados, resultados e análises obtidas, devem ser enquadradas em um âmbito geral, no qual deve haver uma sinergia de conhecimento, que gere uma continuidade de pesquisas, que resultem em melhores entendimentos dos eventos naturais.

Cada objetivo descrito representa uma etapa construtiva do trabalho, agregando valor ao grande objetivo de se obter resultados úteis a futuros projetos de Engenharia.

- Obtenção de gráficos e tabelas de probabilidades de ocorrência de fenômenos que associam chuvas e marés. Para tanto foram percorridas as etapas abaixo;
  - Obtenção, tratamento e validação de dados de alturas de marés, para a região do Litoral Norte do Estado de São Paulo;
  - Obtenção e tratamento de dados de alturas pluviométricas, para a região do Litoral Norte do Estado de São Paulo;
  - Entendimento, aperfeiçoamento e aplicação da metodologia estatística, de ocorrência conjugada chuva-maré para a região de Caraguatatuba;
  - Revisão bibliográfica relacionada à hidrologia e hidráulica para a região do Litoral Norte do Estado de São Paulo;
- Estudo do comportamento dos eventos conjugados ao longo das últimas décadas, com o enfoque nas mudanças climáticas;
- Efetuar análises de tendências de elevações do nível médio do mar (NMM).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo visa cumprir o primeiro objetivo da Dissertação: efetuar uma revisão bibliográfica que contemple os principais assuntos envolvidos. Para tanto, buscaram-se publicações que formaram a base teórica de todo o trabalho e, principalmente, fortaleceram conceitos importantes para a obtenção dos resultados e conclusões.

3.1 Hidráulica Marítima

A Hidráulica Marítima é uma especialidade da Engenharia Civil, que aborda diversos conceitos relacionados aos mares e oceanos, e suas relações com o ambiente costeiro. Dentre essas relações destacam-se estudos de marés, ondas, correntes, processos litorâneos e estuarinos. A aplicação prática dos estudos ocorre nas obras marítimas (portos, quebra-mares, espigões, etc). A Figura 15 demonstra a organização teórica da Engenharia Civil. Diante das atribuições da Hidráulica Marítima, essa Dissertação permeou pelos conceitos da dinâmica das marés. Não foram explanados os fundamentos matemáticos e previsíveis das marés, e sim aspectos teóricos e conceituais, que explicassem seu caráter aleatório, considerando os efeitos astronômicos e meteorológicos.

Figura 15.- Contexto da Hidráulica Marítima dentro da Engenharia Civil

3.1.1 Marés Astronômicas

3.1.1.1 Conceitos Gerais

As marés astronômicas são fenômenos ondulatórios do nível d'água, caracterizados pela previsibilidade, devido às forças gravitacionais causadas pela posição relativa entre Terra, Sol e Lua (ver Figura 16). As oscilações regulares têm alturas variáveis e período básico de 12h:50min.

Os movimentos relativos Sol–Terra–Lua fazem com que as marés sejam movimentos harmônicos compostos que podem, conseqüentemente, ser decompostos em vários movimentos harmônicos simples (ver Figura 17), expressos por equações matemáticas (VIÉGAS, 2006).

Segundo Alfredini e Arasaki (2009), a força centrífuga do sistema Terra-Lua equilibra exatamente as forças de atração gravitacional entre os dois corpos no centro da Terra, de modo que o sistema como um todo mantém-se em equilíbrio. As forças centrífugas são de direção paralela à linha de união dos dois centros de massa (da Terra e da Lua) (ver Figura 16). Já a magnitude da força gravitacional exercida pela Lua sobre a Terra não é a mesma em todos os pontos da superfície da Terra, porque nem todos os pontos estão à mesma distância da Lua. Assim, pontos na Terra mais próximos da Lua experimentarão uma maior atração gravitacional lunar do que pontos do lado oposto da Terra. Além disso, a direção da atração gravitacional da Lua em todos os pontos estará voltada diretamente ao centro da Lua, e, portanto, exceto na linha de união dos centros da Terra e Lua, não estará exatamente paralela à direção das forças centrífugas. A resultante da composição das duas forças é conhecida como força geradora da maré, e, dependendo de sua posição na superfície da Terra com relação à Lua, pode estar dirigida rumo ao interior, paralelamente, ou para fora da superfície da Terra.

A relação vetorial de forças também ocorre com a interação Terra x Sol, entretanto, a força geradora de maré Lunar é cerca de 2,25 vezes maior do que a solar (devido à menor distância), mesmo o Sol tendo uma massa milhares de vezes maior (VIÉGAS, 2006).

- Preamar (PM) : maior cota que atinge o movimento oscilatória da água. Para os locais com marés semidiurnas ocorrem duas PMs em um dia lunar⁶, e apresentam pequenas diferenças entre si;
- Baixa-mar (BM): menor cota que atinge o movimento oscilatório da água. Para os locais com marés semidiurnas ocorrem duas BMs em um dia lunar, e apresentam pequenas diferenças entre si;
- Nível Médio (NM): valor médio em torno do qual a máre oscila. Caracterizado pela Equação (1), representa teoricamente o nível em que permaneceria o mar se não existissem as marés;

$$NM = \frac{(PM + BM)}{2} \quad (1)$$

- Amplitude de maré: segundo Alfredini e Arasaki (2009), na prática corrente no Brasil dá-se o nome de amplitude de maré ao desnível entre a preamar e baixa-mar, tecnicamente nomeada como altura da maré;
- Enchente: processo de subida do nível do mar. Período entre a baixa-mar e preamar;
- Vazante: processo de descida do nível do mar. Período entre a preamar e baixa-mar;
- Correntes de maré: movimento horizontal das águas do mar, causadas pelas enchentes e vazantes, portanto, é função da amplitude de maré.

---

⁶ Segundo Viégas (2006), o período de 1 dia lunar apresenta 24h e 50 minutos. Portanto, para marés semidiurnas o intervalo de tempo entre uma PM e a BM consecutiva é de um pouco mais de 6 horas, logo ocorrem duas PMs e duas BMs em um dia lunar. Já para as marés diurnas esse intervalo supera 12 horas, ocorrendo apenas uma PM e uma BM no dia lunar.

Figura 17.- Maregrama previsto para o dia 20 de maio de 1947 no marégrafo de Torre Grande, Porto de Santos (adaptado de ALFREDINI e ARASAKI, 2009)

3.1.1.2 Maré de Sízígia e Quadratura

Conforme descrito no item 3.1.1.1, as marés astronômicas resultam da interação entre Sol-Lua-Terra. Portanto, de acordo com a posição relativa entre os astros, as intensidades das forças geradoras de maré se alteram. Destas variações explicam-se as marés de sizígias e as marés de quadraturas.

As forças de atração da Lua e do Sol se somam duas vezes em cada lunação (intervalo de tempo entre duas conjunções ou oposições da Lua, cujo valor, em dias médios, é 29,530588 dias), por ocasião da Lua Nova e da Lua Cheia, produzindo marés de sizígia, com preamares (PMs) muito altas e baixa-mares (BMs) muito baixas. A Figura 18 ilustra resumidamente as relações de forças gravitacionais do sistema Terra-Sol-Lua e suas influências sobre as marés, ao ocorrer a coplanariedade entre os alinhamentos Terra-Lua e Terra-Sol. Nota-se o efeito

sobreposto das forças centrífugas lunares e solares, com destaque (em escala exagerada) para a maior influência da componente Lunar.

Já as marés de quadratura ocorrem quando as forças de atração do Sol e da Lua são ortogonais (duas vezes em cada lunação), por ocasião do quarto crescente e quarto minguante da Lua, com preamares (PMs) mais baixas e baixa-mares (BMs) mais altas. A Figura 19 ilustra resumidamente as relações de forças gravitacionais nas marés de quadratura.

Figura 18.- Ilustração das forças geradoras de marés de sizíguas. Posição relativa Terra-Sol-Lua (traduzido de COMET, 2012)

Figura 19.- Ilustração das forças geradoras de marés de quadratura. Posição relativa Terra-Sol-Lua (traduzido de COMET, 2012)

3.1.2 Marés Meteorológicas

Segundo Alfredini e Arasaki (2009), as condições meteorológicas podem alterar consideravelmente a altura e horário de uma determinada maré. O vento pode represar a maré, ou reduzi-la e as pressões atmosféricas também podem sobrelevar o nível (pressão baixa) ou rebaixá-lo (pressão alta). O efeito combinado de ventos contra a costa com baixas pressões corresponde às marés meteorológicas positivas, que constituem ameaça de inundação para as áreas costeiras mais baixas. O efeito oposto é conhecido como maré meteorológica negativa, sendo problemático em águas rasas para a navegação.

A Costa Sul e a Leste do Brasil, até o sul da Bahia, estão sujeitas aos efeitos meteorológicos em intensidade decrescente, em função da penetração de frentes frias pelo avanço do Anticiclone Polar Atlântico sobre o Anticiclone Tropical Atlântico. No contexto desta Dissertação, os eventos extremos mais adversos podem ser associados às marés meteorológicas positivas, juntamente com as chuvas orográficas causadas pelas frentes vindas do Oceano Atlântico ao encontrarem a Serra do Mar. O efeito combinado chuva intensa x maré meteorológica positiva é o cenário mais favorável à inundações associadas aos escorregamentos de detritos.

Na Baía e Estuário de Santos (SP), Litoral Centro do Estado de São Paulo, estes efeitos meteorológicos, popularmente conhecidos como ressacas, podem sobrelevar o nível médio do mar previsto astronomicamente de mais de 0,5 m, chegando a quase 1 m nas áreas mais confinadas e rasas dos estuários, bem como produzir rebaixamentos de ordem de grandeza ligeiramente menores.

A Figura 20 ilustra os conceitos discutidos, com um gráfico de marés para Ubatuba, em 1993. A análise inicia-se através da maré prevista. Conforme mencionado no item 3.1.1, a previsibilidade das marés astronômicas pode ser tratada através das análises harmônicas (Figura 17), podendo ser classificada, estatisticamente, como determinística. Através das constantes harmônicas, específicas para cada região, foi possível a elaboração do gráfico.

A partir do registro de dados do marégrafo de Ubatuba obteve-se a curva da maré observada, ou seja, os valores reais de marés da região. Esses valores são a resultante das marés meteorológicas com as marés astronômicas (previsíveis). Os valores da maré observada são muito relevantes para as pesquisas e projetos de Engenharia, pois representam as condições reais do comportamento do mar.

A maré meteorológica é causada pelas forçantes atmosféricas e têm caráter aleatório. É definida como a diferença entre a Maré Observada (Real) com a Maré Prevista (Teórica). Desprezar a componente meteorológica é inadequado às pesquisas, pois eliminam-se as condições reais do mar.

Os picos de Maré Meteorológica da Figura 20 representam os eventos extremos, tanto para preamares, quanto para baixa-mares. Esses eventos, quando associados às chuvas intensas, causam sérios danos às cidades costeiras.

Figura 20.- Maré observada x Maré prevista x Maré meteorológica para Ubatuba em 1993 (Fonte: prof. Joseph Harari em comunicação pessoal ao Prof. Paolo Alfredini)

3.1.3 Marés para o Litoral Norte do Estado de São Paulo

Conforme descrito nos itens 3.1.1 e 3.1.2, a dinâmica das marés foi considerada no seu todo como uma variável aleatória, devido às forçantes meteorológicas que, em casos extremos, alteram significativamente a previsibilidade da maré.

Segundo Mesquita (1997), os registros típicos do marégrafo de Ubatuba caracterizam as marés locais como semi-diurnas, conforme exemplificado pela Figura 21. Nota-se que no período de 23/06/82 a 24/06/82 ocorreram duas preamares e duas baixa-mares, diferentes entre si.

Figura 21.- Registro de marés do dia 23/06/82 a 24/06/82 da Base de Pesquisas de Ubatuba (MESQUITA,1997)

3.2 Meteorologia

A região do Litoral Norte do Estado de São Paulo situa-se em uma área com importantes atividades atmosféricas. A Serra do Mar atua como barreira aos fluxos atmosféricos provenientes do oceano e sua presença dota a região de uma complexa configuração no que se refere à pluviometria, como já foi notado por Conti (1975), tendo o efeito orográfico enorme participação nessa dinâmica.

Do ponto de vista climático o elemento que mais se destaca é o pluvial, com áreas que apresentam os maiores totais pluviométricos do Brasil (com média anual superior a 4000mm, chegando a 6000mm em anos extremos). Há também a presença de “ilhas de sombra de chuvas” proporcionadas principalmente pelo maciço da Ilha de São Sebastião, que atuam ao Norte do canal homônimo e sobre a região da Enseada de Caraguatatuba. Nestas áreas os totais pluviométricos são mais baixos (situando-se em torno de 1800mm). Do ponto de vista da atuação dos sistemas atmosféricos, a região é dominada pelas massas tropicais, mas por sua posição de transicionalidade climática, apresenta atuação constante dos sistemas frontais (frentes frias), sendo estes responsáveis, aliados às características morfológicas e altimétricas da Serra do Mar, pela maior parte dos eventos pluviais extremos (TAVARES, SANT’ANNA NETO e SANTORO, 2002).

Estas características climáticas, aliadas a uma forte declividade do relevo, à pequena extensão da planície costeira, às formas das bacias dos principais rios e à dinâmica oceânica, proporcionam à região uma enorme fragilidade, agravada pela ocupação irracional e a construção de inúmeras rodovias, com a presença de áreas irregularmente ocupadas e obras mal dimensionadas, ou realizadas sobre áreas suscetíveis a episódios extremos (SOUZA, 1998).

3.3 Chuvas e Marés: uma abordagem estatística

A pesquisa descrita nesta dissertação tratou, inicialmente, duas variáveis estatísticas: precipitações pluviométricas e níveis de maré. Embora os níveis de maré possam ser considerados determinísticos (previsíveis através das constantes harmônicas do local), foram considerados como estocásticos⁷, devido à consideração das componentes meteorológicas, aleatórias, nas medições dos marégrafos. Como foram estudados fenômenos conjugados chuva-maré, a metodologia descrita no item 3.4, separa os eventos em intervalos de chuva ($P > 0$

---

⁷ Segundo Naghettini e Pinto (2007), os processos hidrológicos são considerados estocásticos, ou governados por leis de probabilidades, por conterem componentes aleatórias as quais se superpõem a regularidades eventualmente explicitáveis.

mm/dia, $P > 25$ mm/dia, etc.), deixando apenas a variável “nível do mar” para ser analisada probabilisticamente.

O objetivo deste item é reforçar o conceito de “Período de Retorno” dos eventos conjugados chuva-maré, o qual se apresenta como principal parâmetro de dimensionamento nas obras de Engenharia. Para tanto, definições estatísticas serão abordadas, que conduzirão à definição deste termo.

3.3.1 Variáveis estatísticas analisadas

Conforme descrito anteriormente, a única variável direta a ser considerada estatisticamente foi o “nível de maré”, já que as precipitações pluviométricas foram isoladas por intervalos. Indiretamente, percebeu-se que o “Período de Retorno” está fortemente relacionado com o “Tempo de recorrência”, o qual também se enquadra com uma variável estatística, como descrita adiante.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), as variáveis aleatórias podem ser classificadas em discretas e contínuas, as quais estão associadas a modelos de distribuições distintos. Um conceito muito importante é que a variável aleatória “nível do mar” é considerada contínua, entretanto, a variável “Tempo de recorrência” é considerada discreta. É nessa segunda variável que se concentraram as definições a seguir.

3.3.2 Processos de Bernoulli

Quando algum evento apresenta apenas dois resultados possíveis e dicotômicos, ou seja, denominados “sucesso” ou “falha”, enquadra-se estatisticamente nos Processos de Bernoulli (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

No contexto desta Dissertação, o “Tempo de recorrência” é uma variável discreta, e associada à variável contínua “nível do mar”. Ao buscarem-se resultados probabilísticos de igualdade ou superação de certo nível de referência do mar, conceitualmente, atribuem-se apenas dois possíveis resultados distintos: (1) Nível do mar foi maior ou igual ao valor de referência (atribuído ao termo “sucesso”), ou (2) nível do mar menor do que o nível de referência (atribuído ao termo “falha”).

3.3.3 Variáveis aleatórias dos Processos de Bernoulli

Os processos de Bernoulli estão associados a três tipos de variáveis aleatórias discretas:

- i. Binomial: essa variável refere-se ao número de “sucessos” em N repetições diferentes;
- ii. Binomial negativa: Variável referenciada pelo número de repetições independentes necessárias para que certo número de “sucessos” ocorram;
- iii. Geométrica: quando a variável aleatória está associada ao número de repetições independentes necessárias para que um único “sucesso” ocorra.

A variável em estudo (Tempo de recorrência) enquadra-se na definição de “variável aleatória geométrica”, e está associada à probabilidade de certo evento “nível de maré” superar, ou igualar o valor de referência, independentemente das ocorrências dos eventos anteriores.

3.3.4 Tratamento matemático para as variáveis aleatórias geométricas dos Processos de Bernoulli

As deduções matemáticas descritas adiante foram embasadas em Naghettini e Pinto (2007), porém contextualizadas com as denominações desta Dissertação.

Admite-se que a variável geométrica é o “Período de Recorrência (R)”, ou seja, o número de eventos (geralmente em anos), necessários para ocorrer a igualdade ou superação de certo nível da maré (“sucesso”). Suponha que foram precisos r anos para acontecer tal evento, logo $R=r$, ou seja, ocorreram $(r-1)$ anos de “falhas”, para se ter “sucesso” (R).

Portanto, a Equação (2) representa a função massa da distribuição geométrica, e a Equação (3) demonstra a função acumulada da mesma.

$$p_r(R) = p(1-p)^{r-1}, r = 1, 2, 3, \dots \longrightarrow 0 < p < 1 \quad (2)$$

$$P_r(R) = \sum_{i=0}^r p(1-p)^{i-1}, r = 1, 2, 3... \quad (3)$$

Logo, a Esperança da variável geométrica “Tempo de Recorrência” é dada pela Equação (4), ou seja, o inverso da probabilidade de ocorrência do evento nível de maré.

$$E(R) = \frac{1}{p} \quad (4)$$

3.3.5 Tempo de Recorrência (R) e Período de Retorno (TR)

Conforme explanado nos itens anteriores, o “Tempo de Recorrência” é uma variável geométrica que representa o tempo (geralmente em anos) entre a ocorrência de dois “sucessos” consecutivos, ou seja, a igualdade ou superação de certo nível do mar.

Conforme descrito por Naghettini e Pinto (2007), o “Período de Retorno” é considerado o valor esperado da variável “Tempo de Recorrência”. A partir da Equação (4), obtém-se a Equação (5):

$$TR = E(R) = \frac{1}{p} \quad (5)$$

Portanto, o “Período de Retorno” não refere-se a um tempo cronológico, e sim, ao tempo médio necessário para que certo nível de maré ocorra, em um ano qualquer, e é igual ao inverso da probabilidade de que tal evento de referência ocorra.

3.3.6 Risco Hidrológico (RH)

O conceito de Risco Hidrológico, abordado neste item, visa quantificar o conceito, já que no item 1.3 foram explanados apenas definições qualitativas.

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), o Risco Hidrológico é definido como a probabilidade de certo evento ser igualado, ou superado, pelo menos uma vez, em

um período de K anos. A Equação (6) demonstra matematicamente o Risco Hidrológico (RH).

$$RH = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^K \quad (6)$$

Para exemplificar, demonstra-se o clássico exemplo do risco de um certo nível de maré, estipulado para TR= 50 anos, ser superado ou igualado, pelo menos uma vez, em 50 anos de vida útil.

$$RH = 1 - \left(1 - \frac{1}{50}\right)^{50} = 63,59\%$$

Outra aplicação prática, refere-se a determinação de qual Período de Retorno (TR) deve-se adotar em um projeto, tendo a disposição de risco de 5%, para uma obra com vida útil de 50 anos.

$$TR = \frac{1}{1 - (1 - RH)^{\frac{1}{K}}} = \frac{1}{1 - (1 - 0,05)^{\frac{1}{50}}} \therefore TR = 976 \text{anos}$$

3.4 Metodologia probabilística para eventos conjugados chuva-maré

Após pesquisa, entendimento e aperfeiçoamento de conceitos importantes, associados à meteorologia e marés, optou-se por pesquisar a relação entre as marés e precipitações pluviométricas de forma conjugada. Diante dos evidentes eventos extremos de chuvas e, comportamentos aleatórios do nível do mar, fomentou-se a discussão se há uma interdependência das duas variáveis e, sobretudo, se a mesma está em evolução frente às mudanças climáticas.

A metodologia descrita neste item foi adaptada de Hidroconsult (1979), a qual realizou estudo semelhante para o Município de Cubatão, Litoral Centro do Estado de São Paulo. A obtenção dos dados, para aplicação da metodologia, é explanada no capítulo 4, e os resultados práticos, no capítulo 5.

3.4.1 Compilação dos dados

Diante do banco de dados de maré (item 4.1) e alturas pluviométricas (item 4.2), efetuou-se o primeiro procedimento para aplicação da metodologia: a compilação dos dados.

Os valores de marés e precipitações pluviométricas foram organizados de tal forma que possibilitaram relações diretas entre as chuvas diárias próximas à Bacia do Rio Santo Antônio e, os respectivos níveis de maré na região do Litoral Norte do Estado de São Paulo. A Tabela 2 exemplifica a forma de compilação dos dados obtidos para o mês de Janeiro de 1954.

Ao final da etapa 1, foram obtidos 9.361 dias com a relação entre chuva e marés (Preamar máxima diária, Baixa-mar mínima diária e Nível médio diário do mar).

Tabela 2.- Exemplo de compilação dos dados diários de maré e, precipitações pluviométricas, na Bacia do Santo Antônio, para o mês de Janeiro de 1954

Data	Altura da maré (ref. Altimétrica IBGE)			Precipitação (mm/dia)
	Baixa-mar mínima (cm)	Nível médio do Mar (cm)	Preamar máxima (cm)	
01/01/1954	-74,83	-26,96	15,17	0
02/01/1954	-78,83	-34,92	4,17	0
03/01/1954	-62,83	-13,13	20,17	16,7
04/01/1954	-54,83	12,50	60,17	14,5
05/01/1954	-85,83	-8,54	45,17	7,9
06/01/1954	-97,83	-19,50	25,17	3,2
07/01/1954	-75,83	-16,92	25,17	4,2
08/01/1954	-56,83	4,87	45,17	0
09/01/1954	-57,83	-3,83	29,17	0
10/01/1954	-67,83	-20,21	8,17	0
11/01/1954	-64,83	-19,54	4,17	0
12/01/1954	-44,83	-19,79	3,17	0
13/01/1954	-34,83	-11,83	27,17	0
14/01/1954	-31,83	-1,21	30,17	0
15/01/1954	-59,83	-11,08	35,17	0
16/01/1954	-64,83	-14,17	28,17	0
17/01/1954	-71,83	-15,29	28,17	0

18/01/1954	-64,83	0,00	44,17	0
19/01/1954	-77,83	-6,67	38,17	1,2
20/01/1954	-79,83	-12,67	36,17	0
21/01/1954	-62,83	-8,13	41,17	3,3
22/01/1954	-61,83	-7,00	37,17	2,5
23/01/1954	-61,83	-9,92	36,17	0
24/01/1954	-42,83	-6,00	30,17	0
25/01/1954	-39,83	-14,67	13,17	0
26/01/1954	-38,83	-11,25	13,17	0
27/01/1954	-26,83	-7,08	11,17	0
28/01/1954	-40,83	-18,46	-1,83	0
29/01/1954	-51,83	-21,83	2,17	0
30/01/1954	-48,83	-15,46	16,17	0
31/01/1954	-57,83	-6,38	36,17	0

3.4.2 Divisão dos dados em grupos de precipitações

A segunda etapa da metodologia consiste em dividir o banco de dados em grupos, baseando-se nas precipitações acumuladas diárias, conforme descrito abaixo.

- $P \geq 0$ mm/dia;
- $P \geq 25$ mm/dia;
- $P \geq 50$ mm/dia;
- $P \geq 75$ mm/dia;
- $P \geq 100$ mm/dia.

A divisão do banco de dados em grupos é uma etapa importante do processo, pois cada faixa pluviométrica representará uma curva probabilística de ocorrência do fenômeno chuva-maré, conforme se mostrará adiante.

3.4.3 Reorganização dos dados parametrizados pelas alturas de marés

Com o apoio de uma planilha de cálculo, efetuou-se a reorganização dos dados, após a separação dos dados em grupos de precipitações, conforme item 3.4.2, seguindo a orientação abaixo:

- Para cada intervalo de precipitação (conveniente separá-los em planilhas diferentes), reordenou-se a tabela de forma decrescente, utilizando como parâmetro os níveis de maré (marés maiores no topo da tabela). Essa Metodologia deverá ser aplicada, separadamente, para as Baixa-mares mínimas diárias, Níveis médios diários e Preamares máximas diárias;
- Atentar para o fato que os valores de chuvas devem sempre ser mantidos com as equivalências das marés diárias (conforme estabelecido no item 3.4.1);
- Para cada intervalo de precipitação, deverão ser escolhidos os maiores eventos anuais de maré (para as Baixa-mares deverão ser escolhidos os menores eventos anuais), pois o Período de Retorno (TR) será calculado em anos.

Como resultado dessa etapa tem-se diversas tabelas (uma para cada intervalo de precipitação), ordenadas de forma decrescente pelas marés (Baixa-mares mínimas diárias, Níveis médios diários e Preamares máximas diárias) com os valores extremos anuais. Ressalta-se que eventos (dias) devem se repetir em intervalos diferentes, por exemplo, o mesmo dia que chove mais que 100 mm ($P \geq 100$ mm/dia) chove mais que 75 mm ($P \geq 75$ mm/dia).

3.4.4 Cálculo de probabilidades de ocorrência de eventos conjugados chuva-maré

Nessa etapa, são calculadas as probabilidades de ocorrência de certo nível do mar, associado a uma faixa de precipitação pluviométrica. A Tabela 3 e a Tabela 4 servem para a exemplificação desta etapa.

Tabela 3.- Cálculo de probabilidade de eventos, para $P \geq 0$ mm/dia e Nível médio do mar, da região da Bacia do Santo Antônio/ Caraguatatuba

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
52,00	30/05/1988	26,2	2,86%	1
49,79	07/07/1989	0	5,71%	2
49,28	22/06/1990	0	8,57%	3
48,93	31/07/1980	4,1	11,43%	4
47,79	15/08/1999	0	14,29%	5
45,33	10/05/1956	3,5	17,14%	6
45,11	13/05/1959	1,6	20,00%	7
44,44	20/02/1995	63,5	22,86%	8
44,42	10/02/1966	0	25,71%	9
43,96	23/11/1970	0	28,57%	10
42,56	11/03/1987	17,8	31,43%	11
42,52	11/06/1993	19,4	34,29%	12
41,13	17/07/2000	3,7	37,14%	13
40,66	17/06/1971	6	40,00%	14
40,59	19/12/1994	15,2	42,86%	15
40,20	07/01/1996	21,8	45,71%	16
39,87	12/02/1998	22,3	48,57%	17
39,43	05/07/1991	0	51,43%	18
37,85	16/07/1992	2,1	54,29%	19
37,52	05/05/1963	0	57,14%	20
36,75	22/05/1978	5,3	60,00%	21
36,57	07/04/1979	13,5	62,86%	22
35,69	10/06/1983	3,2	65,71%	23
35,48	09/12/1982	2,3	68,57%	24
34,93	30/09/1981	1,8	71,43%	25
34,28	26/05/1958	8,8	74,29%	26
33,35	29/07/1955	0	77,14%	27
33,04	15/04/1986	0,5	80,00%	28
32,24	13/12/1972	16,5	82,86%	29
31,37	04/07/1965	0,8	85,71%	30
30,32	26/03/1997	1,1	88,57%	31
30,22	30/03/1964	20,6	91,43%	32
29,62	11/05/1954	1	94,29%	33
12,76	22/12/1977	35,9	97,14%	34

Os valores de precipitação pluviométrica da Tabela 3 fazem parte do grupo $P \geq 0$ mm/dia. Todos os dias, em que o posto pluviométrico marcou chuvas, entraram nesta planilha, entretanto somente os dias com maiores médias diárias de maré de cada ano foram utilizados para o cálculo probabilístico. Após o filtro dos dias extremos anuais, baseados nas marés, os dados foram ordenados de forma decrescente, novamente utilizado como parâmetro as marés e, posteriormente, calculadas as probabilidades de igualdade ou superação de tal evento.

O cálculo da probabilidade do evento ser igualado ou superado ($P(\%)$) é dado pela Equação (7).

$$P(\%) = \frac{N_i}{(N + 1)} \quad (7)$$

Onde:

N_i = número de ordem decrescente do evento;

N = número de eventos anuais com tais características de precipitação e nível de maré.

Analisando a Tabela 3, de todo o espaço amostral (9.361 dias), foram selecionados os 34 maiores níveis médios diários da maré, anuais, com precipitações maiores que 0 mm/dia.

Ressalta-se que a variável N diminui, conforme aumentam-se os intervalos de precipitações.

A Tabela 4 demonstra que, para o intervalo $P \geq 75$ mm/dia, o valor de N cai para 22 eventos, ou seja, torna-se mais improvável a ocorrência de um mesmo evento do nível do mar simultaneamente com uma precipitação elevada. Essa conclusão fica evidente com o nível médio do mar diário de 38,61 cm. Para o intervalo $P \geq 0$ mm/dia a probabilidade de ocorrência desse nível do mar está em torno de 52% e, para o intervalo $P \geq 75$ mm/dia, esse mesmo nível médio do mar tem a probabilidade de 4,35% de ocorrer, ou seja, certo nível de maré se torna mais

improvável de ocorrer conjugadamente com dias mais chuvosos (eventos mais extremos).

Tabela 4.- Cálculo de probabilidade de eventos, para $P \geq 75$ mm/dia e Nível médio do mar, da região da Bacia do Santo Antônio/ Caraguatatuba

Nível médio diário de maré (Máximo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
38,61	19/04/1990	100,9	4,35%	1
34,82	26/02/1971	183,8	8,70%	2
31,23	11/03/1995	91	13,04%	3
30,49	12/06/1989	80,9	17,39%	4
25,81	18/03/1981	117,7	21,74%	5
22,10	17/01/1992	120,2	26,09%	6
18,00	27/01/1966	98,3	30,43%	7
17,63	19/05/1978	190	34,78%	8
16,89	16/04/1980	80	39,13%	9
16,15	13/02/1983	93,7	43,48%	10
15,94	05/03/1993	80,6	47,83%	11
14,49	16/02/1959	110,7	52,17%	12
12,62	01/01/1956	75,3	56,52%	13
11,94	16/12/1958	98,8	60,87%	14
11,57	17/02/2000	99,8	65,22%	15
9,36	29/01/1979	80,2	69,57%	16
1,62	20/04/1965	75,7	73,91%	17
-1,59	17/01/1997	98,2	78,26%	18
-4,23	08/02/1963	101,2	82,61%	19
-7,73	25/03/1982	96,5	86,96%	20
-16,60	11/12/1999	82,5	91,30%	21
-17,61	14/12/1955	77,8	95,65%	22

3.4.5 Resultados em tabelas e gráficos

Após a aplicação das 4 etapas anteriores obtém-se resultados em forma de tabelas e gráficos, conforme serão mostrados no capítulo 5, após a explicação das fontes dos dados no capítulo 4.

4 OBTENÇÃO DE DADOS

Este capítulo apresenta como foram obtidos e tratados dados pretéritos de alturas de marés horárias (item 4.1) e alturas de precipitações pluviométricas diárias (item 4.2) na região do Litoral Norte do Estado de São Paulo. Assim, foi montado um banco de dados essencial à obtenção de resultados práticos de eventos conjugados chuva-maré.

4.1 Dados de marés

As alturas de marés foram obtidas de diferentes fontes, portanto exigiram trabalhos de caracterização dos mareógrafos (item 4.1.1), e metodologia de uniformização dos dados (item 4.1.2), para um mesmo nível de referência altimétrica (IBGE).

4.1.1 Origem dos dados de marés

Os dados de alturas de marés provêm de diferentes mareógrafos de diferentes instituições, conforme mostrado na Figura 9:

- Estação Maregráfica do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico) em Ubatuba;
- Estação Maregráfica do IOUSP (Instituto Oceanográfico da USP) em Ubatuba;
- Dados maregráficos do CTH (Centro Tecnológico de Hidráulica) da Praia de Martin de Sá em Caraguatatuba;
- Mareógrafo do Porto de São Sebastião do Departamento Hidroviário;
- Bóia do CEBIMAR (Centro de Biologia Marinha da Universidade de São Paulo) em São Sebastião.

A compilação das informações dos marégrafos originou um grande banco de dados, com valores horários de 1954 a 2005, com algumas falhas intermediárias. Esse banco é composto por mais de 225.000 leituras horários de alturas de maré.

4.1.2 Metodologia para compatibilização dos níveis altimétricos de referência de marés

Diante dos dados de marés, oriundos de locais e referências altimétricas diferentes da região do Litoral Norte do Estado São Paulo, foi necessário compatibilizar as alturas de marés para o mesmo nível de referência (referência do IBGE).

Segundo o relatório do IBGE (1990), até 1946, não existia no Brasil uma superfície de referência, a partir da qual fossem calculadas todas as altitudes no país, ou seja, não havia sido escolhido ainda o Datum Altimétrico Brasileiro. Somente depois que o IBGE deu início à sua Rede de Nivelamento de Precisão é que foi adotado o nível médio do mar referido ao marégrafo de Torres, RS, como o primeiro Datum Altimétrico Brasileiro. Em 1958, ele foi substituído pelo marégrafo de Imbituba, SC, que prevalece até hoje.

A Figura 22 representa as relações de variáveis dos níveis de referências para a região do Litoral Norte do Estado São Paulo. Notam-se que as alturas obtidas dos marégrafos do Litoral Norte são representadas pela variável Y, e seus níveis de referência, denominados zeros locais, são variáveis e desconhecidos. Para o prosseguimento dos estudos, foram efetuadas as relações de todos os valores medidos nos marégrafos (variável Y) para a referência do IBGE (variável T).

A conversão para o nível de referência do IBGE foi possível através da obtenção do nível médio do mar (NMM) dos marégrafos do Litoral Norte, representados pela variável X da Figura 22. Nota-se que a diferença entre o zero do IBGE e o NMM local foi denominado H. Portanto, a Equação (8) representa a relação geométrica das variáveis para os marégrafos do Litoral Norte do Estado São Paulo.

$$T = Y - X - H \quad (8)$$

Figura 22.- Relação entre os valores medidos de marés (Y) e os níveis de referência (local e IBGE)

Há uma indeterminação na Equação (8), pois o valor da variável H é uma incógnita, apesar da obtenção direta dos valores Y e X . A solução ocorreu através de uma analogia com o NMM do Litoral Centro do Estado de São Paulo (Porto de Santos), região mais próxima na qual se tem dados e relações mais precisos com o nível do IBGE, conforme mostrado em seguida.

A Figura 23 representa um esquema adaptado de Alfredini & Arasaki (2009), no qual são mostradas as relações entre o zero do IBGE, zero da CODESP (Cia. Docas do Estado de São Paulo⁸) e o NMM para a região do Porto de Santos. Nota-se que a diferença entre o zero do IBGE e o zero da CODESP é um valor fixo (152,6

⁸ Segundo Moreira (2009), em 1892 foi instituída a Companhia Docas de Santos – CDS, liderada por técnicos e empreendedores brasileiros que visavam organizar o Porto de Santos. Em novembro de 1980 terminou a concessão da CDS, e foi criada a CODESP. Iniciava-se em Santos o ciclo de sucessivas gestões portuárias.

cm) e independe das alterações dos NMM de cada ano. Portanto, obtém-se uma nova relação, representada pela Equação (9).

$$H = 152,6 - B \quad (9)$$

Os valores de Z são obtidos anualmente através do banco de dados do marégrafo de Santos e mostrados na Tabela 5.

Figura 23.- Relação entre zero da CODESP, zero do IBGE e NMM para o Porto de Santos.

A analogia mencionada anteriormente consiste na adoção da seguinte hipótese:

- O NMM do mar para a região do Porto de Santos (Litoral Centro do Estado de São Paulo) é igual ao NMM para a região do Litoral Norte do Estado de São Paulo, logo, as distâncias do NMM dessas regiões ao zero do IBGE (Variável H da Figura 22 e da Figura 23) são iguais.

A adoção da hipótese acima é uma metodologia consistente, para resolver a Equação (8) e possibilitar a utilização do banco de dados dos marégrafos do Litoral Norte, seguindo a mesma referência vertical (IBGE).

Diante da sistematização das variáveis expostas anteriormente, foi possível criar uma rotina de cálculo, para converter todos os valores dos marégrafos para a mesma referência do IBGE. A Tabela 6 é um exemplo de aplicação da teoria explanada para o dia 01/01/1954.

Tabela 5.- Valores do NMM (B) de cada ano para o Porto de Santos e diferenças anuais com o zero do IBGE (H) (ALFREDINI, ARASAKI e AMARAL, 2008)

Ano	NMM Variável (B) (cm)	Variável (H) (cm)	Ano	NMM Variável (B) (cm)	Variável (H) (cm)
1944	140,67	11,93	1976	142,67	9,93
1945	142,15	10,45	1977	135,85	16,75
1946	144,57	8,03	1978	145,07	7,53
1947	144,76	7,84	1979	149,69	2,91
1948	139,40	13,20	1980	151,71	0,89
1949	140,49	12,11	1981	147,87	4,73
1950	145,75	6,85	1982	149,77	2,83
1951	142,62	9,98	1983	152,62	-0,02
1952	150,29	2,31	1984	146,27	6,33
1953	138,65	13,95	1985	144,46	8,14
1954	140,67	11,93	1986	140,76	11,84
1955	138,91	13,69	1987	142,33	10,27
1956	148,42	4,18	1988	156,39	-3,79
1957	151,03	1,57	1989	155,50	-2,90
1958	146,59	6,01	1990	151,55	1,05
1959	150,61	1,99	1991	153,50	-0,90
1960	150,87	1,73	1992	143,50	9,10
1961	147,19	5,41	1993	157,00	-4,40
1962	144,05	8,55	1994	161,00	-8,40
1963	140,97	11,63	1995	168,00	-15,40
1964	138,76	13,84	1996	159,00	-6,40
1965	144,62	7,98	1997	156,00	-3,40
1966	142,94	9,66	1998	156,00	-3,40
1967	140,18	12,42	1999	147,00	5,60
1968	139,01	13,59	2000	155,00	-2,40
1969	146,87	5,73	2001	157,00	-4,40
1970	144,50	8,10	2002	149,00	3,60
1971	146,99	5,61	2003	156,00	-3,40
1972	145,19	7,41	2004	149,00	3,60
1973	150,25	2,35	2005	156,00	-3,40
1974	142,39	10,21	2006	157,00	-4,40
1975	136,61	15,99	2007	157,00	-4,40

Tabela 6.-Exemplo de conversão de referências para dados de maré do dia 01/01/1954

Data	Hora	Nível Maré Local (Y) (cm)	NMM Anual Local (X) (cm)	NMM anual para o porto de Santos (Z) (cm)	Dist. entre NMM de Santos e zero do IBGE (H) (cm)	Nível maré Corrigida (Ref. IBGE) $T=Y-X-H$ (cm)
01/01/1954	0:00	123	95,90	140,67	11,93	15,17
01/01/1954	1:00	117	95,90	140,67	11,93	9,17
01/01/1954	2:00	109	95,90	140,67	11,93	1,17
01/01/1954	3:00	96	95,90	140,67	11,93	-11,83
01/01/1954	4:00	83	95,90	140,67	11,93	-24,83
01/01/1954	5:00	71	95,90	140,67	11,93	-36,83
01/01/1954	6:00	65	95,90	140,67	11,93	-42,83
01/01/1954	7:00	71	95,90	140,67	11,93	-36,83
01/01/1954	8:00	81	95,90	140,67	11,93	-26,83
01/01/1954	9:00	88	95,90	140,67	11,93	-19,83
01/01/1954	10:00	94	95,90	140,67	11,93	-13,83
01/01/1954	11:00	98	95,90	140,67	11,93	-9,83
01/01/1954	12:00	102	95,90	140,67	11,93	-5,83
01/01/1954	13:00	97	95,90	140,67	11,93	-10,83
01/01/1954	14:00	86	95,90	140,67	11,93	-21,83
01/01/1954	15:00	65	95,90	140,67	11,93	-42,83
01/01/1954	16:00	54	95,90	140,67	11,93	-53,83
01/01/1954	17:00	40	95,90	140,67	11,93	-67,83
01/01/1954	18:00	36	95,90	140,67	11,93	-71,83
01/01/1954	19:00	33	95,90	140,67	11,93	-74,83
01/01/1954	20:00	74	95,90	140,67	11,93	-33,83
01/01/1954	21:00	72	95,90	140,67	11,93	-35,83
01/01/1954	22:00	89	95,90	140,67	11,93	-18,83
01/01/1954	23:00	97	95,90	140,67	11,93	-10,83

4.2 Dados de precipitações pluviométricas

Assim como os dados de maré, foi necessária a composição de um banco de valores de alturas de precipitações pluviométricas no Município de Caraguatatuba. Para tanto, foram realizadas buscas sobre disponibilidades de dados no site da ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2005). Este item mostrará detalhes sobre a

obtenção das precipitações, como localização dos postos disponíveis, anos de coletas, e o processo de escolha do posto mais representativo do local.

4.2.1 Disponibilidade de postos pluviométricos em Caraguatatuba

A busca realizada em ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2005) originou a Tabela 7, a qual mostra os postos pluviométricos disponíveis na região de Caraguatatuba.

Tabela 7.- Postos pluviométricos no Município de Caraguatatuba (ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005)

Município	Prefixo	Nome do Posto	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)
Caraguatatuba	E2-042	Caraguatatuba (DER)	20	-23°35′	-45°27′
Caraguatatuba	E2-043	Bairro do Rio d'Ouro	200	-23°37′	-45°26′
Caraguatatuba	E2-046	Caraguatatuba	20	-23°38′	-45°26′

De acordo com as informações contidas na Tabela 7, efetuou-se um posicionamento relativo dos postos, utilizando a ferramenta de imagens de satélite da GOOGLE BRASIL (2012). A Figura 24 representa esquematicamente a posição dos postos pluviométricos e do Município de Caraguatatuba.

Figura 24.- Localização dos postos pluviométricos de Caraguatatuba (flechas em vermelho), (adaptado de GOOGLE BRASIL, 2012)

4.2.2 Escolha do posto pluviométrico e sua abrangência temporal

O critério de escolha entre os três postos mencionados na Tabela 7 foi a maior quantidade de dados disponíveis. Dentre esses, o posto E2-046 apresenta a mais consistente série histórica, contendo dados de 1943 a 2010, totalizando 24.603 valores diários de alturas pluviométricas.

A Tabela 8 representa as informações gerais do posto E2-046, que está situado mais próximo da cidade de Caraguatatuba, com altitude de 20 m.

Tabela 8.- Informações gerais do posto pluviométrico E2-046 (ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005)

Dados da Estação	
Código	02345051
Nome	CARAGUATATUBA
Código Adicional	E2-046R
Bacia	ATLÂNTICO, TRECHO SUDESTE (8)
Sub-bacia	RIOS ITAPANHAÚ, ITANHAÉM E .... (80)
Rio	-
Estado	SÃO PAULO
Município	CARAGUATATUBA
Responsável	FCTH/DAEE-SP
Operadora	FCTH/DAEE-SP
Latitude	-23:38:0
Longitude	-45:26:0
Altitude (m)	20
Área de Drenagem (km2)	-

5 ELABORAÇÃO DOS DADOS

Este capítulo destina-se à apresentação da elaboração dos dados da Dissertação. Foram mostrados gráficos e tabelas obtidos através dos dados explanados no capítulo 4. Para tanto, foram organizados três itens: resultados pluviométricos, resultados maregráficos e, resultados de eventos conjugados chuva-maré. Os dois primeiros, referem-se apenas à manipulação dos dados (pluviométricos e maregráficos) isoladamente e, o terceiro, analisados conjugadamente.

O principal objetivo da Dissertação foi atingido na conclusão deste capítulo. A partir dos resultados mostrados adiante, serão realizadas discussões no capítulo 7, que levarão às conclusões do capítulo 8.

5.1 Resultados pluviométricos

A primeira etapa da apresentação dos resultados práticos consiste em caracterizar a pluviometria do Município de Caraguatatuba, de acordo com os dados do posto E2-46, conforme demonstrado no item 4.2.

Iniciaram-se as análises produzindo o gráfico da Figura 25, o qual representa as precipitações acumuladas anuais de todo o período coletado (1943 a 2010).

Após a caracterização anual da pluviometria efetuaram-se estudos mensais, que possibilitem o entendimento sazonal das chuvas na região. O gráfico da Figura 26 ilustra os valores médios mensais da série histórica.

Figura 25.- Gráfico das precipitações acumuladas anuais registradas no posto E2-046 (Caraguatatuba)

Figura 26.- Gráfico das precipitações médias mensais registradas no posto E2-046 (Caraguatatuba)

5.2 Resultados maregráficos

Após a caracterização pluviométrica da região de Caraguatatuba (item 5.1) efetuou-se a análise maregráfica dos dados explanados no item 4.1. O principal objetivo deste item é entender o comportamento das marés ao longo de 50 anos de dados (1954 a 2005) e subsidiar as discussões de como essa variável deve ser tratada em projetos de Engenharia.

Iniciou-se esta etapa produzindo o gráfico da Figura 27. Para cada mês da série histórica de medições de marés, foram escolhidos os seguintes níveis, os quais geraram três séries de pontos:

- Baixa-mar mínima mensal;
- Nível médio mensal;
- Preamar máxima mensal.

Para cada série, foi realizado um ajuste linear de tendência, representado pelas equações (10), (11), (12), respectivamente para preamares máximas mensais, nível médio do mar mensal e baixa-mar mínima mensal.

$$Y = 0,0345X + 63,082 \quad (10)$$

$$Y = 0,0203X - 10,413 \quad (11)$$

$$Y = 0,0041X - 91,998 \quad (12)$$

O mesmo procedimento foi repetido duas vezes, entretanto, separando o banco de dados em intervalos de anos.

A Figura 28 representa o gráfico de tendências no nível do mar para os anos de 1954 a 1991 (primeiros 37 anos da série). As equações (13), (14) e (15) caracterizam, respectivamente, as preamares máximas mensais, nível médio do mar mensal e baixa-mar mínima mensal deste período.

$$Y = 0,0316X + 63,66 \quad (13)$$

$$Y = 0,0189X - 10,235 \quad (14)$$

$$Y = 0,0111X - 93,035 \quad (15)$$

A Figura 29 representa o gráfico de tendências no nível do mar para os anos de 1968 a 2005 (últimos 37 anos da série). As equações (16), (17) e (18) caracterizam, respectivamente, as preamares máximas mensais, nível médio do mar mensal e baixa-mar mínima mensal deste período.

$$Y = 0,0469X + 57,53 \quad (16)$$

$$Y = 0,0237X - 11,878 \quad (17)$$

$$Y = -0,0007X - 89,80 \quad (18)$$

Segundo Alfredini e Arasaki (2009), a Lua demora 18,61⁹ anos para completar uma órbita completa em torno da Terra. Devido a isso, foram escolhidos intervalos de 37 anos para as análises de tendência de variação no nível do mar, pois garantem-se, assim, dois ciclos Lunares completos de maré.

As equações de ajustes lineares serão utilizadas nas discussões do item 7, para tendências de elevações seculares das marés.

---

⁹ Período de 18 anos e 2/3: ciclo dos nodos ascendentes lunares, com cruzamentos sucessivos da eclíptica (ALFREDINI E ARASAKI, 2009).

Figura 27.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados completa (1954 a 2005)

Figura 28.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados parcial (1954 a 1991)

Figura 29.- Gráfico de tendência de elevação do nível do mar para a série de dados parcial (1968 a 2005)

5.3 Resultados de eventos conjugados chuva-maré

A terceira etapa da apresentação dos resultados consiste em caracterizarem-se os eventos conjugadamente, chuva e maré, de acordo com a teoria demonstrada no item 3.4. Esse item foi dividido em três grupos:

- Chuva x baixa-mar mínima diária (item 5.3.1);
- Chuva x nível médio diário do mar (item 5.3.2);
- Chuva x preamar máxima diária (item 5.3.3).

5.3.1 Eventos conjugados: chuva x baixa-mar mínima diária

A análise probabilística de eventos conjugados chuva-maré foi realizada para cada intervalo de precipitação, conforme explicado no item 3.4.2.

As Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 mostram as probabilidades de ocorrência de baixa-mares mínimas diárias com os diversos intervalos de precipitações. A partir das tabelas foi produzido o gráfico da Figura 30, que representa as curvas probabilísticas desses eventos de chuva com baixa-mar mínima diária. A Tabela 14 é o resultado final desse grupo de dados, baseado no gráfico, em função do período de retorno (associado à probabilidade de ocorrência do evento, conforme descrito matematicamente no item 3.3).

Tabela 9.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0\text{mm/dia}$) x baixa-mar mínima diária

Nível mínimo diário de maré (Mínimo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de ser igual ou inferior P (%)	Nº de ordem
-125,9	28/01/1995	33	2,86%	1
-117,50	28/01/1998	0	5,71%	2
-114,67	30/05/1986	0	8,57%	3
-113,68	26/09/1999	0	11,43%	4
-113,37	14/08/1988	0	14,29%	5
-112,11	02/06/1992	0	17,14%	6
-111,15	10/07/1991	0	20,00%	7
-110,18	07/08/1971	0	22,86%	8
-109,80	17/08/1989	0	25,71%	9
-108,84	26/07/1965	0	28,57%	10
-107,83	09/10/1954	1,2	31,43%	11
-107,14	30/01/1987	16,9	34,29%	12
-106,35	20/08/1963	0	37,14%	13
-106,24	08/08/1964	0	40,00%	14
-105,51	07/02/1955	0	42,86%	15
-104,45	21/07/1978	0	45,71%	16
-104,19	17/08/1993	0	48,57%	17
-103,78	14/10/1977	18	51,43%	18
-101,52	03/04/1981	0	54,29%	19
-101,30	25/02/1979	0	57,14%	20
-100,77	18/10/1982	0	60,00%	21
-100,21	14/09/1970	6,2	62,86%	22
-99,13	04/09/1956	0	65,71%	23
-99,10	14/09/1958	6,7	68,57%	24
-99,10	03/07/2000	0	71,43%	25
-98,29	21/06/1966	0	74,29%	26
-97,64	29/01/1983	0	77,14%	27
-97,43	08/08/1990	0	80,00%	28
-96,76	22/12/1972	6,7	82,86%	29
-96,45	30/06/1980	0	85,71%	30
-95,72	10/02/1997	0	88,57%	31
-95,22	21/06/1959	0	91,43%	32
-88,09	21/01/1996	22	94,29%	33
-80,16	31/12/1994	9,9	97,14%	34

Tabela 10.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25\text{mm/dia}$) x baixa-mar mínima diária

Nível mínimo diário de maré (Mínimo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de ser igual ou inferior P (%)	Nº de ordem
-125,9	28/01/1995	33	2,86%	1
-98,14	28/01/1987	31,2	5,71%	2
-95,29	04/04/1966	100,2	8,57%	3
-91,78	11/12/1977	31,7	11,43%	4
-90,83	03/02/1954	30,5	14,29%	5
-90,76	23/12/1972	25,5	17,14%	6
-90,67	02/12/1986	30,3	20,00%	7
-88,45	08/10/1980	45,6	22,86%	8
-86,84	10/12/1965	37,6	25,71%	9
-86,45	11/01/1978	139,6	28,57%	10
-85,10	18/02/2000	50,7	31,43%	11
-82,35	03/11/1963	38,2	34,29%	12
-82,22	15/09/1959	50	37,14%	13
-80,57	14/12/1955	77,8	40,00%	14
-80,24	09/10/1964	28,5	42,86%	15
-80,18	25/03/1971	47,5	45,71%	16
-80,13	01/10/1956	26,6	48,57%	17
-80,11	13/10/1992	29	51,43%	18
-79,68	25/12/1999	39,8	54,29%	19
-79,09	20/01/1996	40	57,14%	20
-78,77	25/03/1982	96,5	60,00%	21
-76,52	07/02/1981	29,8	62,86%	22
-75,80	31/07/1989	44,2	65,71%	23
-75,10	26/11/1958	36,5	68,57%	24
-74,43	20/08/1990	47,5	71,43%	25
-72,72	10/01/1997	40	74,29%	26
-72,15	16/01/1991	43,5	77,14%	27
-69,37	26/10/1988	31,8	80,00%	28
-69,19	06/03/1993	100	82,86%	29
-67,64	14/01/1983	75,5	85,71%	30
-66,30	29/01/1979	80,2	88,57%	31
-59,50	05/01/1998	26,8	91,43%	32
-57,16	28/01/1994	26,8	94,29%	33
-50,21	09/10/1970	42	97,14%	34

Tabela 11.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50\text{mm}/\text{dia}$) x baixa-mar mínima diária

Nível mínimo diário de maré (Mínimo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de ser igual ou Inferior P (%)	Nº de ordem
-95,29	04/04/1966	100,2	3,33%	1
-86,45	11/01/1978	139,6	6,67%	2
-86,45	17/03/1980	67,3	10,00%	3
-85,83	31/03/1954	62,2	13,33%	4
-85,10	18/02/2000	50,7	16,67%	5
-82,22	15/09/1959	50	20,00%	6
-80,57	14/12/1955	77,8	23,33%	7
-78,77	25/03/1982	96,5	26,67%	8
-76,35	08/02/1963	101,2	30,00%	9
-73,68	17/01/1999	57,4	33,33%	10
-69,19	06/03/1993	100	36,67%	11
-68,52	07/12/1981	63,2	40,00%	12
-68,37	16/02/1988	55,8	43,33%	13
-67,64	14/01/1983	75,5	46,67%	14
-67,10	20/04/1958	90,3	50,00%	15
-66,67	07/11/1986	61,7	53,33%	16
-66,30	29/01/1979	80,2	56,67%	17
-66,24	01/05/1964	67,8	60,00%	18
-65,14	25/01/1987	60	63,33%	19
-63,84	20/01/1965	59,2	66,67%	20
-61,43	08/04/1990	64,5	70,00%	21
-60,11	09/10/1992	62,8	73,33%	22
-53,72	29/12/1997	56,4	76,67%	23
-52,9	04/01/1995	56,4	80,00%	24
-52,50	10/01/1998	60,3	83,33%	25
-47,13	13/06/1956	69,3	86,67%	26
-37,15	07/10/1991	55,6	90,00%	27
-26,80	26/08/1989	80,9	93,33%	28
-19,09	12/01/1996	73,5	96,67%	29

Tabela 12.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75\text{mm}/\text{dia}$) x baixa-mar mínima diária

Nível mínimo diário de maré (Mínimo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de ser igual ou inferior P (%)	Nº de ordem
-95,29	04/04/1966	100,2	4,35%	1
-86,45	11/01/1978	139,6	8,70%	2
-80,57	14/12/1955	77,8	13,04%	3
-78,77	25/03/1982	96,5	17,39%	4
-76,35	08/02/1963	101,2	21,74%	5
-70,68	11/12/1999	82,5	26,09%	6
-69,19	06/03/1993	100	30,43%	7
-67,64	14/01/1983	75,5	34,78%	8
-67,10	20/04/1958	90,3	39,13%	9
-66,30	29/01/1979	80,2	43,48%	10
-64,45	28/02/1980	77,5	47,83%	11
-64,10	17/02/2000	99,8	52,17%	12
-62,52	06/02/1981	155,9	56,52%	13
-60,18	26/02/1971	183,8	60,87%	14
-51,43	22/03/1990	120,7	65,22%	15
-46,13	01/01/1956	75,3	69,57%	16
-42,11	17/01/1992	120,2	73,91%	17
-36,84	20/04/1965	75,7	78,26%	18
-26,80	26/08/1989	80,9	82,61%	19
-25,72	17/01/1997	98,2	86,96%	20
-18,22	17/02/1959	170,5	91,30%	21
-5,9	11/03/1995	91	95,65%	22

Tabela 13.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x baixa-mar mínima diária

Nível mínimo diário de maré (Mínimo Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de ser igual ou Inferior P (%)	Nº de ordem
-95,29	04/04/1966	100,2	9,09%	1
-86,45	11/01/1978	139,6	18,18%	2
-76,35	08/02/1963	101,2	27,27%	3
-69,19	06/03/1993	100	36,36%	4
-66,30	14/03/1979	100	45,45%	5
-62,52	06/02/1981	155,9	54,55%	6
-60,18	26/02/1971	183,8	63,64%	7
-51,43	22/03/1990	120,7	72,73%	8
-42,11	17/01/1992	120,2	81,82%	9
1,78	16/02/1959	110,7	90,91%	10

Tabela 14.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x baixa-mares mínimas diárias

Precipitação (mm/dia)	Período de Retorno (TR)-Anos							Baixa-mar mínima diária (cm)-IBGE
	2	5	10	20	50	75	100	
>0	-103,11	-111,49	-116,64	-119,58	-121,44	-121,86	-122,07	
>25	-80,47	-87,96	-99,15	-108,10	-114,80	-116,44	-117,29	
>50	-67,12	-81,66	-88,42	-91,09	-92,22	-92,41	-92,49	
>75	-64,04	-75,05	-85,26	-93,84	-100,47	-102,11	-102,96	
>100	-63,17	-85,04	-94,33	-96,26	-95,89	-95,62	-95,45	

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA CHUVA DIÁRIA X BAIXA-MAR MÍNIMA DIÁRIA

Figura 30.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x baixa-mar mínima diária)

5.3.2 Eventos conjugados: chuva x nível médio diário

As Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 mostram as probabilidades de ocorrência de níveis médio diários com os diversos intervalos de precipitações. A partir das tabelas foi produzido o gráfico da Figura 31, que representa as curvas probabilísticas desses eventos de chuva com nível médio diário do mar. A Tabela 20 é o resultado final desse grupo de dados, baseado no gráfico, em função do período de retorno.

Tabela 15.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
52,00	30/05/1988	26,2	2,86%	1
49,79	07/07/1989	0	5,71%	2
49,28	22/06/1990	0	8,57%	3
48,93	31/07/1980	4,1	11,43%	4
47,79	15/08/1999	0	14,29%	5
45,33	10/05/1956	3,5	17,14%	6
45,11	13/05/1959	1,6	20,00%	7
44,44	20/02/1995	63,5	22,86%	8
44,42	10/02/1966	0	25,71%	9
43,96	23/11/1970	0	28,57%	10
42,56	11/03/1987	17,8	31,43%	11
42,52	11/06/1993	19,4	34,29%	12
41,13	17/07/2000	3,7	37,14%	13
40,66	17/06/1971	6	40,00%	14
40,59	19/12/1994	15,2	42,86%	15
40,20	07/01/1996	21,8	45,71%	16
39,87	12/02/1998	22,3	48,57%	17
39,43	05/07/1991	0	51,43%	18
37,85	16/07/1992	2,1	54,29%	19
37,52	05/05/1963	0	57,14%	20
36,75	22/05/1978	5,3	60,00%	21
36,57	07/04/1979	13,5	62,86%	22
35,69	10/06/1983	3,2	65,71%	23
35,48	09/12/1982	2,3	68,57%	24
34,93	30/09/1981	1,8	71,43%	25
34,28	26/05/1958	8,8	74,29%	26

33,35	29/07/1955	0	77,14%	27
33,04	15/04/1986	0,5	80,00%	28
32,24	13/12/1972	16,5	82,86%	29
31,37	04/07/1965	0,8	85,71%	30
30,32	26/03/1997	1,1	88,57%	31
30,22	30/03/1964	20,6	91,43%	32
29,62	11/05/1954	1	94,29%	33
12,76	22/12/1977	35,9	97,14%	34

Tabela 16.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
44,44	20/02/1995	63,5	2,86%	1
42,19	10/03/1987	27,5	5,71%	2
39,99	11/06/1989	30	8,57%	3
38,61	19/04/1990	100,9	11,43%	4
37,85	16/02/1991	45,9	14,29%	5
37,77	22/02/1993	35,4	17,14%	6
36,49	18/06/1971	39,8	20,00%	7
33,40	06/06/1983	31	22,86%	8
33,00	28/01/1994	26,8	25,71%	9
32,26	19/02/1980	25,4	28,57%	10
32,15	14/04/1958	56,1	31,43%	11
31,36	05/04/1979	26,7	34,29%	12
30,62	22/11/1970	32,8	37,14%	13
28,08	13/02/1998	57,8	40,00%	14
26,93	22/01/1981	50,9	42,86%	15
26,53	13/09/1959	66	45,71%	16
26,05	02/04/1978	30,4	48,57%	17
24,45	15/03/1997	58,4	51,43%	18
24,13	11/01/1966	31,9	54,29%	19
23,91	29/04/1965	73,6	57,14%	20
23,38	03/09/1964	26	60,00%	21
23,07	07/01/1999	35,7	62,86%	22
23,02	03/12/1982	44,3	65,71%	23
23,00	16/04/1986	30,5	68,57%	24
22,53	30/03/2000	29,2	71,43%	25

22,10	17/01/1992	120,2	74,29%	26
21,08	27/11/1956	73,5	77,14%	27
18,99	19/01/1996	30	80,00%	28
12,76	22/12/1977	35,9	82,86%	29
12,74	04/04/1955	36,5	85,71%	30
7,50	14/05/1954	27,5	88,57%	31
6,44	06/02/1963	28,4	91,43%	32
-25,01	23/12/1972	25,5	94,29%	33

Tabela 17.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
44,44	20/02/1995	63,5	3,13%	1
38,61	19/04/1990	100,9	6,25%	2
36,33	06/02/1988	68,8	9,38%	3
34,82	26/02/1971	183,8	12,50%	4
32,15	14/04/1958	56,1	15,63%	5
30,49	12/06/1989	80,9	18,75%	6
29,27	06/05/1991	56,2	21,88%	7
28,08	13/02/1998	57,8	25,00%	8
26,93	22/01/1981	50,9	28,13%	9
26,53	13/09/1959	66	31,25%	10
24,45	15/03/1997	58,4	34,38%	11
23,91	29/04/1965	73,6	37,50%	12
22,80	31/03/1980	57,1	40,63%	13
22,67	07/03/1966	52,2	43,75%	14
22,10	17/01/1992	120,2	46,88%	15
21,08	27/11/1956	73,5	50,00%	16
19,61	02/03/1979	70,6	53,13%	17
18,48	16/05/1987	61,5	56,25%	18
17,63	19/05/1978	190	59,38%	19
17,61	22/04/1983	56,6	62,50%	20
15,94	05/03/1993	80,6	65,63%	21
15,15	29/03/2000	65,2	68,75%	22
9,87	12/01/1996	73,5	71,88%	23
5,11	07/02/1963	57,8	75,00%	24
4,58	02/03/1986	50,6	78,13%	25

3,81	09/03/1982	50,3	81,25%	26
2,98	10/04/1999	70,2	84,38%	27
-6,55	31/03/1955	58,4	87,50%	28
-7,73	25/03/1982	96,5	90,63%	29
-19,49	01/05/1964	67,8	93,75%	30
-27,75	31/03/1954	62,2	96,88%	31

Tabela 18.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
38,61	19/04/1990	100,9	4,35%	1
34,82	26/02/1971	183,8	8,70%	2
31,23	11/03/1995	91	13,04%	3
30,49	12/06/1989	80,9	17,39%	4
25,81	18/03/1981	117,7	21,74%	5
22,10	17/01/1992	120,2	26,09%	6
18,00	27/01/1966	98,3	30,43%	7
17,63	19/05/1978	190	34,78%	8
16,89	16/04/1980	80	39,13%	9
16,15	13/02/1983	93,7	43,48%	10
15,94	05/03/1993	80,6	47,83%	11
14,49	16/02/1959	110,7	52,17%	12
12,62	01/01/1956	75,3	56,52%	13
11,94	16/12/1958	98,8	60,87%	14
11,57	17/02/2000	99,8	65,22%	15
9,36	29/01/1979	80,2	69,57%	16
1,62	20/04/1965	75,7	73,91%	17
-1,59	17/01/1997	98,2	78,26%	18
-4,23	08/02/1963	101,2	82,61%	19
-7,73	25/03/1982	96,5	86,96%	20
-16,60	11/12/1999	82,5	91,30%	21
-17,61	14/12/1955	77,8	95,65%	22

Tabela 19.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x nível médio diário do mar

Nível médio diário de maré (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
38,61	19/04/1990	100,9	8,33%	1
34,82	26/02/1971	183,8	16,67%	2
25,81	18/03/1981	117,7	25,00%	3
22,10	17/01/1992	120,2	33,33%	4
17,63	19/05/1978	190	41,67%	5
14,49	16/02/1959	110,7	50,00%	6
9,94	06/03/1993	100	58,33%	7
-4,01	14/03/1979	100	66,67%	8
-4,23	08/02/1963	101,2	75,00%	9
-4,23	08/02/1963	101,2	83,33%	10
-24,71	04/04/1966	100,2	91,67%	11

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA CHUVA DIÁRIA X MARÉ MÉDIA DIÁRIA

Figura 31.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x nível médio diário de maré)

Tabela 20.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x nível médio diário da maré

Precipitação (mm/dia)	Período de Retorno (TR)-Anos							Nível médio diário da Maré (cm)-IBGE
	2	5	10	20	50	75	100	
>0	38,56	46,11	49,18	50,28	50,69	50,75	50,77	
>25	25,74	37,86	43,82	45,75	46,27	46,30	46,31	
>50	20,69	30,33	36,77	40,81	43,49	44,11	44,42	
>75	14,89	25,62	33,54	39,13	43,13	44,08	44,57	
>100	11,95	31,64	37,71	39,81	40,59	40,71	40,76	

5.3.3 Eventos conjugados: chuva x preamar máxima diária

As Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 mostram as probabilidades de ocorrência de preamares máximas diárias com os diversos intervalos de precipitações. A partir das tabelas foi produzido o gráfico da Figura 32, que representa as curvas probabilísticas desses eventos de chuva com preamar máxima diária. A Tabela 26 é o resultado final desse grupo de dados, baseado no gráfico, em função do período de retorno.

Tabela 21.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 0$ mm/dia) x preamar máxima diária

Preamar máxima diária (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
115,20	17/09/1989	0	2,86%	1
112,57	22/06/1990	0	5,71%	2
109,81	01/08/1993	0	8,57%	3
107,71	07/03/1966	52,2	11,43%	4
106,32	31/05/1999	0	14,29%	5
102,63	03/04/1988	15,2	17,14%	6
99,87	10/05/1956	3,5	20,00%	7
99,23	20/09/1982	0,7	22,86%	8
98,48	30/09/1981	1,8	25,71%	9
97,36	10/06/1983	3,2	28,57%	10
96,55	31/07/1980	4,1	31,43%	11
95,91	07/01/1996	21,8	34,29%	12
95,85	12/07/1991	0	37,14%	13
93,15	19/02/1995	31	40,00%	14

92,89	02/08/1992	0	42,86%	15
92,84	11/01/1994	0	45,71%	16
92,50	12/02/1998	22,3	48,57%	17
91,70	23/04/1979	6,7	51,43%	18
91,55	08/04/1978	2,2	54,29%	19
90,86	12/03/1987	0	57,14%	20
89,82	25/02/1971	1,2	60,00%	21
87,78	03/08/1959	0	62,86%	22
85,76	30/03/1964	20,6	65,71%	23
84,28	26/03/1997	1,1	68,57%	24
82,90	18/06/2000	0	71,43%	25
82,90	02/04/1958	13,7	74,29%	26
82,16	19/03/1965	7,4	77,14%	27
81,43	03/07/1955	2,3	80,00%	28
81,22	13/10/1977	14,6	82,86%	29
78,65	05/05/1963	0	85,71%	30
78,3	28/03/1986	0	88,57%	31
74,17	01/05/1954	0	91,43%	32
73,24	08/12/1972	0	94,29%	33
69,79	23/11/1970	0	97,14%	34

Tabela 22.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 25\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária

Preamar máxima diária (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
107,71	07/03/1966	52,2	2,86%	1
100,63	30/05/1988	26,2	5,71%	2
95,81	22/02/1993	35,4	8,57%	3
93,15	19/02/1995	31	11,43%	4
92,85	16/02/1991	45,9	14,29%	5
87,57	30/12/1990	27,9	17,14%	6
84,91	19/01/1996	30	20,00%	7
84,84	28/01/1994	26,8	22,86%	8
83,20	27/09/1989	34,3	25,71%	9
82,89	17/01/1992	120,2	28,57%	10
81,90	17/02/2000	99,8	31,43%	11
80,50	13/02/1998	57,8	34,29%	12
79,82	26/02/1971	183,8	37,14%	13

77,90	08/03/1958	36,7	40,00%	14
77,55	19/02/1980	25,4	42,86%	15
76,86	10/03/1987	27,5	45,71%	16
75,76	03/09/1964	26	48,57%	17
74,36	06/06/1983	31	51,43%	18
74,23	03/12/1982	44,3	54,29%	19
74,16	27/09/1965	40,1	57,14%	20
71,48	22/01/1981	50,9	60,00%	21
69,79	22/11/1970	32,8	62,86%	22
69,17	14/09/1954	44,3	65,71%	23
68,87	28/01/1956	26,4	68,57%	24
68,32	15/04/1999	45,9	71,43%	25
67,78	17/10/1959	38,4	74,29%	26
67,55	19/05/1978	190	77,14%	27
62,70	02/03/1979	70,6	80,00%	28
59,28	29/12/1997	56,4	82,86%	29
58,3	08/03/1986	36,7	85,71%	30
54,49	04/04/1955	36,5	88,57%	31
53,65	07/02/1963	57,8	91,43%	32
49,22	24/11/1977	31,6	94,29%	33
17,24	04/12/1972	35,6	97,14%	34

Tabela 23.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 50\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária

Preamar máxima diária (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
107,71	07/03/1966	52,2	3,33%	1
87,63	06/02/1988	68,8	6,67%	2
82,89	17/01/1992	120,2	10,00%	3
82,57	19/04/1990	100,9	13,33%	4
81,90	17/02/2000	99,8	16,67%	5
81,15	20/02/1995	63,5	20,00%	6
80,81	05/03/1993	80,6	23,33%	7
80,50	13/02/1998	57,8	26,67%	8
77,85	07/10/1991	55,6	30,00%	9
71,48	22/01/1981	50,9	33,33%	10
67,55	19/05/1978	190	36,67%	11

67,36	22/04/1983	56,6	40,00%	12
66,78	13/09/1959	66	43,33%	13
64,23	09/03/1982	50,3	46,67%	14
63,16	30/04/1965	59	50,00%	15
62,70	29/01/1979	80,2	53,33%	16
62,32	17/01/1999	57,4	56,67%	17
61,55	16/04/1980	80	60,00%	18
59,28	29/12/1997	56,4	63,33%	19
53,65	07/02/1963	57,8	66,67%	20
52,86	16/05/1987	61,5	70,00%	21
51,90	25/11/1958	65,5	73,33%	22
51,3	07/03/1986	57,1	76,67%	23
50,87	01/01/1956	75,3	80,00%	24
49,20	26/08/1989	80,9	83,33%	25
43,49	31/03/1955	58,4	86,67%	26
35,91	12/01/1996	73,5	90,00%	27
18,17	31/03/1954	62,2	93,33%	28
12,76	01/05/1964	67,8	96,67%	29

Tabela 24.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 75\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária

Preamar máxima diária (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
82,89	17/01/1992	120,2	4,35%	1
82,57	19/04/1990	100,9	8,70%	2
81,90	17/02/2000	99,8	13,04%	3
80,81	05/03/1993	80,6	17,39%	4
79,82	26/02/1971	183,8	21,74%	5
70,48	18/03/1981	117,7	26,09%	6
67,55	19/05/1978	190	30,43%	7
67,15	11/03/1995	91	34,78%	8
66,36	13/02/1983	93,7	39,13%	9
62,70	29/01/1979	80,2	43,48%	10
61,55	16/04/1980	80	47,83%	11
57,20	12/06/1989	80,9	52,17%	12
52,23	25/03/1982	96,5	56,52%	13
50,87	01/01/1956	75,3	60,87%	14

50,71	27/01/1966	98,3	65,22%	15
44,65	08/02/1963	101,2	69,57%	16
43,16	20/04/1965	75,7	73,91%	17
41,90	16/12/1958	98,8	78,26%	18
35,43	14/12/1955	77,8	82,61%	19
25,32	11/12/1999	82,5	86,96%	20
24,78	17/02/1959	170,5	91,30%	21
24,28	17/01/1997	98,2	95,65%	22

Tabela 25.- Tabela probabilística de eventos conjugados chuva ($P > 100\text{mm}/\text{dia}$) x preamar máxima diária

Preamar máxima diária (Máxima Anual) Referência IBGE (cm)	Dia	Altura chuva (mm)	Probabilidade de Igualdade ou superação P (%)	Nº de ordem
82,89	17/01/1992	120,2	9,09%	1
82,57	19/04/1990	100,9	18,18%	2
80,81	06/03/1993	100	27,27%	3
79,82	26/02/1971	183,8	36,36%	4
70,48	18/03/1981	117,7	45,45%	5
67,55	19/05/1978	190	54,55%	6
52,70	14/03/1979	100	63,64%	7
44,65	08/02/1963	101,2	72,73%	8
31,71	04/04/1966	100,2	81,82%	9
24,78	16/02/1959	110,7	90,91%	10

Tabela 26.- Resultados probabilísticos de ocorrência simultânea de precipitações diárias x preamar máxima diária

Precipitação (mm/dia)	Período de Retorno (TR)-Anos							Preamar máxima diária (cm)-IBGE
	2	5	10	20	50	75	100	
>0	91,50	101,35	108,28	113,12	116,56	117,38	117,80	
>25	74,41	87,63	96,52	101,38	104,29	104,93	105,25	
>50	63,68	80,71	90,26	95,27	98,21	98,84	99,16	
>75	58,44	77,22	82,18	84,03	84,85	85,00	85,07	
>100	69,26	82,24	82,85	83,54	84,28	84,49	84,60	

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA CHUVA DIÁRIA X PREAMAR MÁXIMA DIÁRIA

Figura 32.- Gráfico de probabilidades de ocorrências conjugadas (precipitação diária x preamar máxima diária)

6 EVOLUÇÃO DOS EVENTOS CONJUGADOS AO LONGO DOS ANOS

Após aplicação da metodologia baseada em Hidroconsult (1979) e apresentada no item 3.4, decidiu-se por aprofundar esta pesquisa, analisando como os eventos conjugados de chuva-maré, estão se comportando ao longo das últimas décadas. Para tanto, dividiu-se o banco de dados, descrito no item 4, em dois períodos:

- De 1954 a 1980;
- De 1981 a 2000.

Para cada intervalo citado acima aplicou-se a metodologia probabilística do item 3.4, porém utilizando os dados de preamares máximas diárias, ao invés das mensais, e restringindo-se a apenas dois grupos de precipitações:

- $P > 0$ mm/dia;
- $P > 50$ mm/dia.

O gráfico da Figura 33 representa as curvas probabilísticas de ocorrência de chuvas ($P > 0$ mm/dia) e preamares máximas diárias para cada período. Já o gráfico da Figura 34 representa as curvas de precipitações ($P > 50$ mm/dia) com as preamares para os mesmos períodos. Esses resultados gráficos serão discutidos no item 7.

Probabilidade de ocorrência simultânea de preamares e chuvas ($p > 0 \text{ mm/dia}$)

Figura 33. - Gráficos de ocorrências conjugadas chuva ($p > 0 \text{ mm/dia}$) e preamares

Probabilidade de ocorrência simultânea de preamares e chuvas ($p > 50\text{mm}/\text{dia}$)

Figura 34.- Gráficos de ocorrências conjugadas chuva ($p > 50\text{ mm}/\text{dia}$) e preamares

7 DISCUSSÕES

“É provável que o improvável aconteça”

(Aristóteles)

Através da frase criada por Aristóteles, nota-se perfeitamente onde pretende-se chegar essa Dissertação. Ao analisarem-se os dados e fatos pretéritos, tanto de chuvas, quanto marés e, sobretudo, conjugando-os, nota-se que deve-se aprender muito com o passado e com o monitoramento da natureza. Os eventos extremos sempre ocorreram e, inexoravelmente, ocorrerão novamente. O que deve-se mudar é a forma com que a Sociedade enfrenta essas situações. A Engenharia deve trabalhar a favor da natureza, entendendo como ela atua, seus limites, sua força, e não, simplesmente, negligenciando fatos e dados, como vem ocorrendo.

A notícia abaixo retrata a situação típica dos desastres naturais no Brasil:

O Rio de Janeiro viveu nesta quarta-feira (12/01/2011) um dos dias mais trágicos de sua história. As chuvas intensas que castigaram a região serrana do Estado deixaram mais de 250 pessoas mortas, segundo informações da secretaria de Saúde e Defesa Civil. O número de mortos em Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo superam as chuvas que castigaram o Rio em abril de 2010 e mataram mais de 250 pessoas. O Governo Federal anunciou que vai liberar mais de R\$ 780 milhões para os municípios afetados no Estado do Rio e de São Paulo.

Com mais de 130 mortes, Teresópolis enfrenta sua maior tragédia. Segundo o coronel Flávio Castro, da Defesa Civil, o número de desabrigados passa de 900 e já são mais de 1.200 desalojados no município.

(Record-RJ, 2011)

Nota-se que ocorreu um evento de grande magnitude em 2011 no Estado do Rio de Janeiro. Diante desses incidentes, tratados como “acasos” pela Sociedade, que as pesquisas e monitoramentos da natureza ganham força.

Dentro do contexto desta Dissertação, que tratou dados reais e estatísticos, iniciam-se as discussões dos resultados apresentados no capítulo 5, que serão abordadas na mesma sequência que foram tratados:

- Discussões dos resultados pluviométricos (baseados no item 5.1);
- Discussões dos resultados maregráficos (baseados no item 5.2);
- Discussões dos eventos conjugados chuva-maré (baseados no item 5.3);
- Discussões da evolução dos eventos conjugados ao longo dos anos (baseados no capítulo 6).
- Primeiras aplicações práticas: simulação no software Flo-2D

7.1 Discussões dos resultados pluviométricos

Os resultados pluviométricos servem como ferramenta para a caracterização climática da região de Caraguatatuba.

Através do gráfico da Figura 25, o qual representa as precipitações acumuladas anuais de todo o período coletado (1943 a 2010), nota-se que, em média, o total acumulado anual situa-se em torno de 1700 mm. Esse resultado obtido é coerente com o descrito por Tavares *et al.* (2002) no item 3.2 (1800 mm/ano), pois atribui-se esse baixo índice, à “ilha de sombra de chuvas” causada pela barreira natural da Ilha de São Sebastião (ver posição relativa entre a ilha e o posto E2-046 na Figura 9). Através do gráfico da Figura 26 evidencia-se que o período chuvoso ocorre nos meses de Outubro a Março, e período seco de Abril a Setembro.

Os eventos extremos de escorregamentos de detritos, como ocorreu na catástrofe de 1967 são iniciados através de chuvas muito intensas. Conforme descrito por Cruz (1974), no dia 17 de Março de 1967 choveu 115 mm e no dia 18 de Março, choveu 420 mm, totalizando 535 mm em apenas dois dias. Ao compararem-se os valores citados com os gráficos obtidos da Figura 25 e Figura 26, percebe-se a magnitude daquele evento. O ano de 1967 teve um total acumulado de

2141,2 mm, ou seja, nos dois dias anteriores à catástrofe, choveu aproximadamente 25 % de todo o ano. Já para a análise mensal, a precipitação média de Março é 209,24 mm. Portanto, nos dias 18 e 19 de Março de 1967 a precipitação superou o dobro da média daquele mês. Evidentemente que eventos extremos como esse descrito são raros de ocorrerem, porém, não são impossíveis (alusão à frase de Aristóteles).

Entende-se que o principal macro objetivo da pesquisa acadêmica é mostrar, cientificamente, à Sociedade e ao poder público, os reais riscos de certos eventos.

7.2 Discussões dos resultados maregráficos

A análise dos resultados maregráficos iniciou-se com a produção do gráfico da Figura 27, o qual ilustra a tendência mensal da evolução dos níveis do mar, da série completa: 1954 a 2005. A partir dos coeficientes angulares dos ajustes lineares da nuvem de pontos obteve-se a Tabela 27, com os resultados seculares da análise. Nota-se que para todo o período, a tendência de elevação do nível médio do mar é 24,36 cm em 100 anos.

Tabela 27.- Tendência de variação secular do nível do mar (1954 a 2005)

Série	Coeficiente angular da reta (mensal)	Tendência de variação secular do nível do mar (cm/ século)
Baixa-mar mínima	0,0041	4,92
Nível médio do mar	0,0203	24,36
Preamar máxima	0,0345	41,40

A fim de analisar-se como o nível do mar está se comportando nos últimos anos, optou-se por dividir o banco de dados em dois intervalos, desde que os mesmos compreendam no mínimo dois ciclos Lunar completo (37 anos). A Tabela 28 ilustra que o nível médio do mar, no período de 1954 a 1991 tem a tendência de elevação de 22,68 cm em 100 anos. Já a Tabela 29, que compreende o período de 1968 a 2005, apresenta uma tendência de elevação do nível médio do mar de 28,44 cm por século.

Percebe-se que em todas as análises, há a tendência de elevação do nível médio do mar. Para o período mais recente (1968 a 2005) a tendência de elevação é maior do que para o período mais distante (1954 a 1991).

Tabela 28.- Tendência de variação secular do nível do mar (1954 a 1991)

Série	Coeficiente angular da reta (mensal)	Tendência de variação secular do nível do mar (cm/ século)
Baixa-mar mínima	0,0111	13,32
Nível médio do mar	0,0189	22,68
Preamar máxima	0,0316	37,92

Tabela 29.- Tendência de variação secular do nível do mar (1968 a 2005)

Série	Coeficiente angular da reta (mensal)	Tendência de variação secular do nível do mar (cm/ século)
Baixa-mar mínima	-0,0007	-0,84
Nível médio do mar	0,0237	28,44
Preamar máxima	0,0469	56,28

7.3 Discussões dos eventos conjugados chuva-maré

Os eventos extremos geralmente estão associados às ocorrências de chuvas intensas e aos altos níveis de maré, que dificultam o escoamento do sistema de drenagem aos pontos mais baixos (mar). De acordo com Brigatti e Sant'anna Neto (2008), no que tange à ocorrência de enchentes e inundações, o Litoral Norte paulista apresenta características ímpares, proporcionadas principalmente por seus aspectos físicos e formas de uso do solo. A ocupação de áreas marginais aos rios e suas desembocaduras, aliadas a uma dinâmica atmosférica peculiar e às oscilações das marés, comumente ocasionam sérios prejuízos sócioambientais. A inter-relação oceano-atmosfera-continente é extremamente complexa e acarreta à região uma enorme fragilidade em relação aos eventos naturais. No caso específico dos

episódios relacionados a enchentes e inundações muitos aspectos devem ser considerados, quais sejam:

- Os fatores meteorológicos: principalmente os relacionados às passagens de frentes frias pela região e às variações de seus elementos, principalmente os ventos, a pluviosidade e a pressão atmosférica;
- A dinâmica costeira: suas relações com os eventos meteorológicos, correntes e processos deposicionais que influem diretamente nos índices de descarga dos rios, além da dinâmica das marés, notadamente os episódios de marés de sizígia;
- O uso do solo e as influências antrópicas: modificam a vazão e a superfície de absorção ao longo da costa;

Os resultados apresentados no item 5.3 representam o cumprimento do principal objetivo desta Dissertação. As Tabela 14, Tabela 20 e Tabela 26 mostram os resultados práticos da análise chuva-maré. Utilizaram-se os valores conjugados de chuva- nível médio diário (Tabela 20) para as discussões a seguir.

Ao iniciar um projeto de Engenharia na região, tanto na área fluvial da Bacia do Santo Antônio, quanto na parte marítima, pode-se considerar os resultados de nível médio do mar com as seguintes interpretações:

- Para um projeto, com período de retorno (TR) de 50 anos, normalmente utilizados em obras definitivas, assume-se a probabilidade de 2%, em média, de tal evento ser superado ou igualado, conforme demonstrado no item 3.3.5 através da Equação (5);
- De acordo com a Tabela 20, nota-se que para TR de 50 anos e, qualquer precipitação diária ($P > 0$ mm/dia), deve-se considerar o Nível médio do mar em 50,69 cm;
- À medida que desejam-se adotar dias mais chuvosos, com o mesmo período de retorno (50 anos), os níveis de marés a serem considerados são menos conservadores. Esse fato é devido à menor probabilidade

de ocorrerem níveis de marés altas conjugadamente com dias muito chuvosos;

- Para evidenciar a relação probabilística chuva-maré efetuou-se o seguinte exercício: Para uma obra marítima (ex. implantação de um píer) com elevação média diária do mar de 40 cm, tem-se as seguintes interpretações:
  - Evento: qualquer chuva ($P > 0$ mm/dia) e, NMM de 40 cm, tem-se um período de retorno aproximado de 4 anos, ou seja, 25 %, em média, de probabilidade desse evento ser superado ou igualado a cada ano;
  - Evento: ($P > 50$ mm/dia) e, NMM de 40 cm, tem-se um período de retorno aproximado de 20 anos, ou seja, 5 %, em média, de probabilidade desse evento ser superado ou igualado a cada ano;
  - Evento: ($P > 75$ mm/dia) e, NMM de 40 cm, tem-se um período de retorno aproximado de 22 anos, ou seja, 4,5 %, em média, de probabilidade desse evento ser superado ou igualado a cada ano;
  - Nota-se, com os três cenários descritos acima, que conforme conjuga-se o mesmo NMM (40 cm) com dias mais chuvosos, a probabilidade dos eventos ocorrerem diminuem, ou seja, torna-se mais improvável a ocorrência dos eventos extremos.
- Um conceito importante, obtido da leitura da Tabela 20, mostra que o nível do mar tende a ser constante nos períodos de retorno maiores (50, 75 e 100 anos), para cada faixa de precipitação.
- Todas as discussões e interpretações feitas podem também, ser estendidas às baixa-mares e preamares diárias, dependendo da natureza do projeto. Exemplo, para canais de navegação, as preamares e baixa-mares são muito importantes para análise de

calado das embarcações, assim como as velocidades de correntes de marés que são função das amplitudes (ver conceito de amplitude no item 3.1.1).

A catástrofe de corrida de detritos, exemplificada pelo evento de Março de 1967 e, descrita no item 1.1, é essencialmente causada por chuvas intensas, ou seja, grandes volumes precipitados em curtos períodos de tempo, fatores topográficos e geomorfológicos. Os elevados níveis de marés agravam o cenário de escoamento fluvial, pois causam uma barreira natural na descarga, gerando um remanso à montante do rio. Esse processo, aliado ao grande volume de sólido e líquido vindo das encostas causam o alargamento e transbordamento da várzea do rio, conforme mostrado na Figura 6.

7.4 Discussões da evolução dos eventos conjugados ao longo dos anos

O entendimento de como os eventos chuva-maré estão evoluindo ao longo dos anos é importante para as avaliações e críticas de como os parâmetros de projetos podem estar obsoletos e, como devem ser alterados para futuras obras. O capítulo 6 teve o principal objetivo motivar essas discussões.

O gráfico da Figura 33 ilustra os eventos conjugados de preamares diárias com qualquer precipitação ($P > 0$ mm/dia), para dois períodos distintos: 1954 a 1980 e 1981 a 2000. Nota-se que as duas curvas estão praticamente sobrepostas, levando a conclusão que, para qualquer precipitação, não há indícios que os eventos extremos de preamares estão ocorrendo mais frequentemente recentemente.

A Figura 34 ilustra cenários mais extremos, com os mesmos intervalos de anos (1954 a 1980 e 1981 a 2000), entretanto, utilizando apenas os dias mais chuvosos ($P > 50$ mm/dia). Nota-se um descolamento importante das duas curvas, sugerindo que nos anos mais recentes (1981 a 2000), os maiores níveis de preamares diárias são mais prováveis de ocorrerem do que nos anos mais distantes (1954 a 1980).

Essas conclusões estão inseridas dentro da temática das mudanças climáticas, baseadas em dados reais e medidos, o que reforça a credibilidade dos

resultados. Esses resultados devem motivar pesquisas relacionadas à aplicação prática dos dados. Com a evidente evolução dos níveis de marés e precipitações, a validade dos parâmetros de projetos devem ser revistas, como correntes de marés, transporte de sedimentos, cotas de implantação de portos e obras de defesas, demandas por dragagens, etc.

7.5 Primeiras aplicações práticas: simulação no software Flo-2D

Esse item apresenta alguns resultados iniciais obtidos de Witiski (2012), a partir da simulação com o programa computacional FLO-2D ¹⁰. Os resultados apresentados a seguir foram baseados na descrição Hidrogeológica (SAKAI e ALFREDINI, 2012), qualitativa e quantitativa, feita por Cruz, (1974), do dia da Catástrofe de Março de 1967. O objetivo dessa aplicação foi reproduzir o evento com as informações dispostas atualmente.

A Figura 35 ilustra a área afetada por um evento similar ao da Catástrofe de 1967. Nota-se o impacto que causaria o depósito de detritos no Município de Caraguatatuba, consideravelmente urbanizado atualmente.

---

¹⁰ O programa computacional FLO-2D, é um modelo bidimensional desenvolvido para simular eventos de cheia, para diversos tipos de aplicação, sendo a modelagem de eventos do tipo debris-flow uma das especificidades atendidas pelo modelo. Faz parte dos modelos hidráulicos aprovados pela FEMA (Federal Emergency Management Agency ou Agência Federal de Gerenciamento de Emergência, em tradução livre) para este tipo de estudo.

Figura 35.- Área de deposição do cone de dejeção de escorregamento de detritos sobre o Município de Caraguatatuba atualmente, em função de um evento semelhante ao de Março de 1967 (WITISKI, 2012)

A Figura 36 demonstra, após a aplicação do modelo, as profundidades dos depósitos de detritos (água mais sedimentos). Percebe-se um agravamento dos depósitos próximo à Serra do Mar.

Figura 36.- Profundidade de depósitos de escorregamento de detritos sobre o Município de Caraguatatuba atualmente, em função de um evento semelhante ao de Março de 1967 (WITISKI, 2012)

8 CONCLUSÕES

As regiões costeiras do Brasil vêm sofrendo, constantemente, com eventos extremos, por chuvas intensas, ações severas do mar (ondas, marés, correntes, transporte de sedimentos, etc) e eventos conjugados de chuvas e altos níveis de marés. O Litoral Norte do Estado de São Paulo, especificamente o Município de Caraguatatuba já passou por situações de eventos de grandes magnitudes, como a Catástrofe de Março de 1967. O cenário destruidor dos eventos pretéritos deve servir como incentivo para pesquisas e projetos futuros.

A pesquisa dos fenômenos naturais deve-se iniciar com uma coleta contínua de dados. Entende-se como primordial que qualquer tipo de análise esteja fundamentada em coletas, armazenamentos e tratamentos dos dados das variáveis naturais (níveis de marés, alturas pluviométricas, ondas, correntes, transporte de sedimentos). Desta maneira é possível tratar os fenômenos de forma estatística, associando-os às probabilidades de ocorrência.

A partir dos estudos estatísticos pode-se iniciar a aplicação dos resultados à prática de Engenharia. Os projetos costeiros devem considerar as lições aprendidas dos eventos pretéritos, tanto com a aplicação direta das análises estatísticas, quanto utilizando-as em modelos matemáticos, como dados de entrada para simulações de eventos naturais.

Nas últimas décadas, uma evolução da Engenharia está interessada em analisar, a partir dos bancos de dados e modelos matemáticos, como os projetos já construídos sofrerão com as mudanças climáticas, como por exemplo, a elevação do nível médio do mar, chuvas intensas mais frequentes e eventos de escorregamentos de detritos, que destroem as cidades na planície costeira.

Portanto, essa Dissertação está contextualizada na primeira etapa de todo o ciclo e abrangência da Engenharia: a análise estatística de dados reais (chuva-maré). As conclusões a seguir foram fundamentadas nos objetivos estipulados no capítulo 2.

A partir da revisão bibliográfica estipulada como primeiro objetivo, foram obtidos fundamentos importantes na formação da base conceitual da Dissertação. Destacou-se a metodologia estatística de análise chuva-maré mostrada no item 3.4, a qual possibilitou os resultados mais expressivos do trabalho, representados nas Tabela 14, Tabela 20 e Tabela 26. Esses resultados (apresentados no item 5.3) podem ser aplicados diretamente em projetos de Engenharia, tanto na área fluvial (bacia do Santo Antônio), quanto na parte marítima, para a região de Caraguatatuba. Outro aspecto importante, obtido através da revisão bibliográfica, foi a notória complexidade e necessidade de entendimento da dinâmica natural do Litoral Norte do Estado de São Paulo. As marés meteorológicas têm papel fundamental nos eventos extremos e, aliadas às chuvas intensas, tornam a região com alto potencial de novos desastres, similares, ou piores, do que a Catástrofe de Março de 1967.

Outra etapa importante da Dissertação ocorreu com a obtenção e tratamento de dados de chuvas e marés da região (capítulo 4), formando um banco relevante para os resultados práticos. Os 9.361 dias com a relação entre chuva e marés (preamar máxima diária, baixa-mar mínima diária e nível médio diário do mar) foram essenciais para essa Dissertação.

No contexto de análise de resultados, notou-se uma tendência de elevação do nível do mar, principalmente nas últimas décadas. Essa conclusão reforça a teoria que, cada vez mais, a Engenharia deve rever seus parâmetros e modelos de dimensionamentos para obras costeiras, pois a dinâmica natural dessas regiões vem sofrendo alterações significativas com as mudanças climáticas. Já a evolução dos eventos conjugados chuva-maré, apresentados no capítulo 6 mostram, assim como na análise maregráfica independente, que nas últimas décadas (1980 a 2000) os eventos mais extremos de elevações de níveis de maré, conjugados com dias mais chuvosos ($P > 50$ mm/dia), são mais prováveis de ocorrerem do que nas décadas mais distantes (1960 a 1980).

A principal conclusão desta Dissertação refere-se à importância de manterem-se os monitoramentos das variáveis naturais (chuvas, níveis de marés, correntes, ondas, etc). Esses dados representam o histórico do comportamento da natureza ao longo dos anos, e são imprescindíveis para pesquisas em Engenharia. Os modelos matemáticos e físicos devem ser calibrados com esses dados reais, pois somente

assim, pode-se ter confiabilidade em qualquer simulação. Ressalta-se novamente que essas pesquisas devem ser tratadas como o início do ciclo da Engenharia e devem ser estimuladas as aplicações. As pesquisas acadêmicas precisam ser a base conceitual e crítica dos grandes projetos, assim como fornecer à Sociedade, de forma transparente, técnica e ética, o retorno do conhecimento adquirido.

Finalmente, a sistemática adotada nesse estudo de caso específico é passível de ser generalizada nas localidades em que os efeitos orográficos sobre o litoral são capazes de conjugar fortes precipitações com a elevação da maré, como ocorre em extensos trechos do litoral dos Estados de Santa Catarina ao Espírito Santo.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme mencionado anteriormente, essa Dissertação está contextualizada no âmbito das primeiras etapas do ciclo da Engenharia: a obtenção, tratamento e análise de dados primários de chuva e maré. A continuidade dos resultados demonstrados está associado à aplicação prática dos mesmos. A seguir sugerem-se alguns tópicos que podem ser abordados em pesquisas futuras.

9.1 Maré meteorológica x maré astronômica

A dissociação da componente meteorológica dos valores reais de marés (banco de dados), conforme citado no item 3.1.2, seria um avanço importante para a associação dos dias com precipitações intensas às alturas do mar extremas e compreensão da relação causa e efeito das chuvas orográficas com marés meteorológicas. Para tanto, deveria ser feita análise harmônica de marés, através das constantes harmônicas da região do Litoral Norte do Estado de São Paulo. Os resultados serão similares ao gráfico da Figura 20.

9.2 Inserção dos níveis de marés nas simulações matemáticas

O item 7.5 demonstra uma primeira simulação, em modelo matemático, de eventos de escorregamento de detritos para a Bacia do Rio Santo Antônio. Entretanto, não foram considerados os efeitos extremos de maré, associados às chuvas intensas. Uma evolução da pesquisa seria considerar no modelo, níveis de marés conjugados com precipitações, conforme resultados práticos dessa Dissertação. Assim, poder-se-ia obter o efeito do remanso no escoamento do Rio Santo Antônio, ao encontrar a barreira natural do nível do mar.

Com essas novas simulações seriam possíveis análises de riscos mais detalhadas (quantitativamente) dos prejuízos causados por um evento similar ao de 1967. A mensuração dos danos à infraestrutura e vidas é de extrema importância para futuros planos de contingência e uso e ocupação do solo.

9.3 Projetos de Engenharia

A aplicação mais relevante seria a elaboração de projetos de Engenharia considerando os resultados dessa Dissertação, assim como os resultados das simulações matemáticas. O principal objetivo dos projetos de pesquisa deve ser embasar cientificamente os projetos executivos. No caso da Zona Costeira, obras de intervenção devem ser pensadas para proteger a Sociedade do risco eminente de eventos extremos de chuvas e marés.

Outra importante contribuição seria a pesquisa de como os parâmetros de projeto, para obras fluviais e marítimas, devem ser atualizados em relação às mudanças climáticas. A evidente elevação do nível do mar, os frequentes eventos de marés meteorológicas e, precipitações intensas, muitas vezes associadas entre si, sugerem que os projetos de Engenharia devem ser concebidos de forma diferente do que no passado.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e Gestão de Portos e Costas**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2009. ISBN 978-85-212-0486-2.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; AMARAL, R. F. Mean Sea-Level Rise Impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil-Physical Modelling Study. **Environmental Monitorind and Assessment**, 144, 2008. 377-387.

ALVES, M. A. **Correntes de maré e inerciais na plataforma continental ao largo de Ubatuba (SP)**. Dissertação (Mestrado) Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.

ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. <http://hidroweb.ana.gov.br/>. **Site da ANA-Agência Nacional de Águas**, 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03 janeiro 2012.

BRIGATTI, N.; SANT'ANNA NETO, J. L. Dinâmica climática e variações do nível do mar na geração de enchentes, inundações e ressacas no Litoral Norte paulista. **Revista Formação-Especial 20 anos**, Presidente Prudente, v. 2, n. 15, p. 25-36, 2008.

CASTRO, C. M. D.; PEIXOTO, M. N. D. O.; DO RIO, G. A. P. Riscos Ambientais e Geografia:Conceituações, Abordagens e Escalas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, 2005. 11-30.

CBHLN-COMITÊ DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO LITORAL NORTE. **PORTAL DO COMITÊ DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO LITORAL NORTE**, 2012. Disponível em: <<http://cbhln.com.br/>>. Acesso em: 18 junho 2012.

CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. P. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

COMET. The Comet Program, 2012. Disponível em: <<http://www.comet.ucar.edu/>>. Acesso em: 10 set. 2012.

COMITÊ DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO LITORAL NORTE DE SP. **Plano de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte**. [S.l.]. 2009.

CONTI, J. B. **Circulação secundária e efeito orográfico na gênese das chuvas na região nordeste paulista**. IGEOG/USP. São Paulo. 1975.

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o Litoral na Área de Caraguatatuba-SP – Contribuição à Geomorfologia Litorânea Tropical**. São Paulo: [s.n.], 1974. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo (FFLCH-USP). Departamento de Geografia (FLG).

CUTTER, S. **The Changing Nature of Risks and Hazards**. Washington, D.C.: Joseph Henry Press. 2001.

ESTADO DE SÃO PAULO, 2012. Disponível em: <<http://blogs.estadao.com.br>>. Acesso em: fevereiro 2012.

FIBGE-FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico do Estado de São Paulo**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2001.

GOOGLE BRASIL. Google Maps, 2012. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>>. Acesso em: 25 jan. 2012.

HEWITT, K. **Regions of Risk. A Geographical Introduction to Disasters**. [S.l.]: Longman, 1997.

HIDROCONSULT. **Análise Probabilística de Ocorrência Conjugada de Eventos Máximos Chuva-Maré**. DAEE- Departamento Estadual de Águas e Energia. São Paulo. 1979.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Datum Altimétrico Brasileiro**. DEGEB- Departamento de Geodésia. Rio de Janeiro. 1990.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE CIDADES@**, 2012. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=351050#>>. Acesso em: 18 Junho 2012.

IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **RELATÓRIO NO 57.540- Plano de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Litoral Norte**. IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. 2001.

ITA- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. **Mudanças Climáticas Globais e impactos na zona costeira: modelos, indicadores, obras civis e fatores de mitigação/adaptação**. São José dos Campos. 2009.

MESQUITA, A. R. D. Documento preparado para a FUNDESPA, 1997. Disponível em: <<http://www.mares.io.usp.br/sudeste/sudeste.html>>. Acesso em: 20 Agosto 2012.

MOREIRA, A. D. S. **Sistema de Informações de Indicadores do modelo de Porto concentrador de carga**. São Paulo. 2009.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2007. ISBN 978-85-7499-023-1.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAGUATATUBA, 2012. Disponível em: <<http://www.caraguatatuba.sp.gov.br>>. Acesso em: 13 março 2012.

RECORD-RJ, P. D. N. D. **Portal de Notícias R7**, 13 Janeiro 2011. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/rio-de-janeiro/noticias/chuvas-causam-a-maior-tragedia-da-regiao-serrana-do-rio-de-janeiro-20110113.html>>. Acesso em: 05 jan. 2013.

SAKAI, R. D. O.; ALFREDINI, P. **ESTUDO DO IMPACTO DE DEBRIS-FLOWS - CASO DA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO EM CARAGUATATUBA (BRASIL)**. XXV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. San Jose, Costa Rica: [s.n.]. 2012.

TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J. L.; SANTORO, J. Chuvas e escorregamentos no Litoral Norte Paulista entre 1988 e 2001. In: _____ **Anais do Encontro de Geógrafos Brasileiros**. Joao Pessoa: [s.n.], 2002.

VIÉGAS, N. J. D. F. **Modelagem Numérica das marés do Litoral no Espírito Santo**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES. 2006.

WITISKI, H. D. M. **Modellazione numerica di debris-flow per il bacino del Rio Santo Antônio, in Caraguatatuba, costa nord dello Stato di São Paulo, Brasile**. [S.l.]. 2012.

ZUQUETTE, L. V.; NAKAZAWA, V. A. Cartas de Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. [S.l.]: ABGE, 1998.