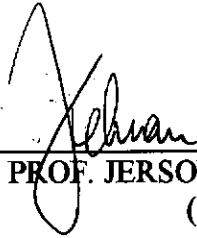


**MODELAGEM ESTOCÁSTICA CONJUNTA DE PRECIPITAÇÃO E NÍVEL
DO MAR NA BAÍA DE GUANABARA**

MARIA DE FÁTIMA RODRIGUES DA CUNHA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

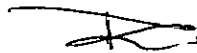
Aprovada por:



PROF. JERSON KELMAN, Ph.D.
(Presidente)



PROF. PAULO CESAR COLONNA ROSMAN, Ph.D.



PROF. PAULO CANEDO DE MAGALHÃES, D.Sc.



Dr. JORGE MACHADO DAMAZIO, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 1996

MARIA DE FÁTIMA RODRIGUES DA CUNHA

Modelagem Estocástico Conjunta de Precipitação e Nível do Mar na Baía de Guanabara [Rio de Janeiro], 1996.

Vii, 62 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. SC., Engenharia Civil, Recursos Hídricos, 1996)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Maré Meteorológica/Precipitação

I. COPPE/UFRJ

II. Modelagem Estocástica Conjunta de Precipitação e Nível do Mar na Baía de Guanabara

**Aos meus pais, Idália e
Manuel**

Agradecimentos

Expresso o meu reconhecimento e agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para a realização e conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Jerson Kelman um agradecimento especial pela sua orientação e atenção em todos os momentos e pela compreensão aos problemas enfrentados durante o período de desenvolvimento dos trabalhos, não deixando de acreditar nas minhas possibilidades de conclusão, bem como na importância dos resultados das análises.

À CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, da qual sou funcionária e obtive apoio de todos os chefes e colegas, em especial o Dr. Frederico Cláudio Peixinho, chefe do Departamento de Recursos Hídricos que, por sua visão de futuro, investe no desenvolvimento intelectual de seus funcionários, apesar das dificuldades no desenvolvimento dos trabalhos da Companhia.

À DHN, nas pessoas de Ana Cláudia, Alberto Fogato e Prof. Geraldo, principalmente pelo fornecimento dos dados de maré horária e precipitação diária da Ilha Fiscal, e pela atuação dedicada nos esclarecimentos de dúvidas surgidas durante a manipulação das informações.

Ao Departamento de Engenharia Oceânica, ressaltando as sugestões e indicações bibliográficas do Prof. Paulo Cesar Rosman e Cláudio Freitas Neves.

Aos colegas Ailton e Mônica da Hora (SERLA), Jorge Machado Damázio, Fernanda da Serra Costa e Ângela de Oliveira Ghirardi (CEPEL) que muito colaboram com indicações bibliográficas e sugestões de softwares atualizados para a análise dos parâmetros estatísticos dos dados.

À todos os membros do Programa, professores, funcionários e colegas, muito obrigada por todos os momentos compartilhados principalmente os difíceis.

Aos demais membros da Banca Examinadora, agradeço a oportunidade de julgarem este trabalho.

Aos meus familiares, pelo apoio e compreensão.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

MODELAGEM ESTOCÁSTICA CONJUNTA DE PRECIPITAÇÃO E NÍVEL DO MAR NA BAÍA DE GUANABARA

Maria de Fátima Rodrigues da Cunha
Dezembro 1996

Orientador: Jerson Kelman
Programa: Engenharia Civil - Recursos Hídricos

RESUMO

Investiga-se a dependência entre dois processos estocásticos: precipitação-diária e nível-diário do mar, a partir de dados da Ilha Fiscal na Baía de Guanabara - Rio de Janeiro.

Situações críticas para a macrodrenagem das regiões baixas, junto ao litoral, ocorrem quando se observam precipitações extremas e/ou níveis extremos.

A ocorrência simultânea de precipitações e níveis elevados configuram os casos mais desfavoráveis. É necessário, portanto, que se tenha uma descrição probabilística conjunta para os dois processos.

Esta tese desenvolve uma modelação deste tipo, assumindo que as diferenças entre os níveis observados e os níveis previstos do mar seja um processo tipo ARMA(2,1), e que a distribuição de probabilidade para as precipitações é condicionada à essa diferença.

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

**STHOCASTIC MODEL FOR RAIN AND TIDE
ON GUABABARA BAY**

**Maria de Fátima Rodrigues da Cunha
December, 1996**

**Thesis Supervisor: Jerson Kelman
Department: Civil Engineering**

ABSTRACT

It is investigated the dependence between two sthochastic processes: daily precipitation and daily sea water level, using Ilha Fiscal data in Guanabara Bay - Rio de Janeiro.

Critical situation for drainage in lowland, near the littoral, take place when it's observed maximum precipitation and / or maximum sea water level.

The simultaneous occurrence of maximum precipitation associated to maximum sea water level configure the worst condition. So, it's necessary a probabilistic description considering both processes combined.

In this Thesis, it's developed a model like that, assuming that the differences between the observed and predicted sea water levels are a ARMA(2,1) process, and the probability distribution for the precipitation is dependent to these differences.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
I - INTRODUÇÃO	1
II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
II.1 - Introdução	3
II.2 - O Fenômeno da Maré	4
2.1 - Descrição do Fenômeno	6
2.2 - Maré Meteorológica	10
II.3 - Precipitação	11
II.4 - Processo Estocástico	14
4.1 - Modelos ARMA	16
III - ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS	21
III.1 - Obtenção dos Dados	21
III.2 - Níveis do Mar	27
III.3 - Precipitação	33
III.4 - Série Conjunta	35
III.5 - Modelagem Estocástica	41
IV - CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

I- INTRODUÇÃO

O Brasil, país de dimensões continentais, possui área de aproximadamente 8 milhões de km² e população total de aproximadamente 150 milhões de habitantes, sendo que, desse total, aproximadamente 75% estão concentrados em regiões metropolitanas, com altas taxas de densidade populacional.

Essas cidades, que se desenvolvem, por motivos óbvios de sobrevivência, junto à várzea dos rios, ou nas proximidades de sua foz junto ao mar, têm sofrido nos últimos anos, diversos tipos de enchentes provocadas por diferentes fatores.

Nas regiões onde as altitudes são próximas do nível do mar, e existe o remanso nos rios devido ao efeito das marés, as cheias urbanas podem tomar proporções ainda mais catastróficas, devido ao período de permanência de níveis elevados, represados pelo corpo d'água marinho, resultando em danos materiais e humanos indesejáveis.

A solução do problema da inundação, após o desenvolvimento das regiões metropolitanas em áreas de risco, envolve medidas estruturais, de alto custo, que modificam o sistema através da construção de obras de engenharia, tais como canalização ou modificação do leito de rios, diques, reservatórios e outras.

Para detalhamento do porte das obras sugeridas, são necessários estudos de hidrologia que definem os eventos causadores, utilizando modelos matemáticos na quantificação e simulação dos efeitos, como subsídio aos que executam o planejamento dos Recursos Hídricos.

Estudos estatísticos considerando a independência na ocorrência dos fenômenos são comuns, porém cabe ressaltar que a ocorrência dos eventos pode não se dar de forma independente.

As altas intensidades de chuva provocadas por fatores climatológicos, como a entrada de frentes em uma dada região, por exemplo, pode estar aliada à elevação dos níveis do mar, provocada pelo mesmo fator.

As marés de origem astronômica começaram a ser compreendidas no século XV, a partir da Lei de Gravitação Universal, de Newton, sendo equacionadas um século mais tarde por Laplace, tornando-se possível a previsão dos níveis do mar.

Entende-se por maré meteorológica a sobrelevação do nível d'água que é provocada pela força de arraste do vento e variações de pressão atmosférica, que da mesma forma podem influenciar na geração das chuvas em uma determinada região.

Nessa região são observadas variações significativas entre os níveis do mar previstos e observados, com efeito meteorológico bem pronunciado pois, nela atuam sistemas frontais representados pelo avanço das massas frias polares, que penetram com grande intensidade e frequência.

O presente estudo realiza uma abordagem particular na análise dos eventos, aplicando a modelagem estocástica às variáveis hidrológicas. É um estudo de caso para o Rio de Janeiro onde foram utilizados dados da bacia da Baía de Guanabara.

A metodologia consiste no estudo das diferenças resultantes entre os níveis reais observados e os níveis previstos, conjugando-as com o estudo das precipitações ocorridas no mesmo período, utilizando-se as informações da estação maregráfica e pluviométrica da Ilha Fiscal (DHN), no período compreendido entre 1966 e 1992

II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

II.1 - Introdução

Este capítulo objetiva facilitar a compreensão dos mecanismos geradores dos fenômenos da marés astronômicas e das chuvas, descrevendo-se as características gerais respectivas a cada fenômeno.

Primeiramente apresenta-se uma breve descrição sobre o fenômeno da maré, tal qual ele é observado e sua componente previsível (maré astronômica). Em sequência é abordado a diferença que existe entre os níveis previstos e observados, quando descreve-se o fenômeno da maré meteorológica e sua origem.

Em outro item é analisado o fenômeno da precipitação onde são discutidos seus agentes causadores enfocando-se a hipótese de serem os mesmos agentes responsáveis pela geração da maré meteorológica.

Ao final do capítulo ilustra-se a teoria dos Modelagem Estocástica utilizada na análise dos dados.

II.2 - O Fenômeno da Maré

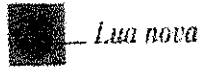
A observação da maré data de época remota, quando foi compreendida a correlação entre o fenômeno da maré e as fases da Lua, tendo sido verificado ainda que as maiores oscilações do nível do mar realizavam-se nas ocasiões de Lua cheia e Lua nova, ficando assim estabelecida que a causa primordial do fenômeno é a ação luni-solar.

Estudar quantitativamente a maré oriunda de causas astronômicas perfeitamente definidas, somente foi possível após a descoberta da lei de gravitação universal por Newton, que investigou o fenômeno admitindo condições ideais para a sua realização, considerando os efeitos que produziriam as forças de atração do Sol e da Lua, se a Terra, imaginada como uma superfície homogênea, fosse totalmente coberta por uma camada líquida também homogênea que respondesse instantaneamente à ação das forças (Franco-1964).

O moderno estudo das marés apresenta modificações em relação à teoria de Newton e permite prever com certa precisão o fenômeno. Atribui-se a Laplace o mérito de tais estudos bem como o início do estudo dinâmico das marés, vislumbrando ainda a possibilidade da análise harmônica.

A figura II.2.1 ilustra as causas da maré astronômica, apresentando as fases da lua associadas aos efeitos na elevação do nível do mar. Observa-se que nas fases de Lua nova e cheia ocorrem as marés mais elevadas devido à sobreposição dos efeitos da atração gravitacional da Lua e do Sol sobre a massa líquida.

Maré de Sizígia



CAUSAS DAS MARÉS

Órbita da Terra Terra

Aumento da maré provocado pela atração gravitacional do Sol

Aumento da maré provocado pela atração gravitacional da Lua

Atração gravitacional do Sol

Sol

Maré de Quadratura

Último quarto



Atração gravitacional da Lua

A atração gravitacional do Sol reforça o efeito da força centrífuga produzindo grande aumento das marés

A atração gravitacional do Sol diminui o efeito da Lua

Maré de Sizígia



Lua cheia

Aumento igual e oposto das marés produzido pelo efeito centrífugo devido à rotação da Terra

Maré de Quadratura

Primeiro quarto



Órbita da Lua

Lua

Aumento da maré onde a atração gravitacional da Lua é maior

Fig. II.2.1: Causas da Maré (Enciclopédia Visual- O Globo-1996)

II.2.1 - Descrição do Fenômeno

Chama-se de maré a variação periódica do nível do mar, oriunda de forças astronômicas, surgidas devido a combinação dos movimentos de rotação com a atração gravitacional que a Lua e o Sol exercem continuamente sobre a Terra (Franco-1964).

Se for observada e registrada a oscilação do nível d'água do mar em relação à uma régua graduada (figura II.2.2) e, a partir das leituras horárias, for gerado um gráfico cartesiano, em que as abscissas exprimam as horas das observações e as ordenadas exprimam as alturas lidas, verifica-se que o fenômeno é de natureza periódica, conforme o exemplo da figura II.2.3.

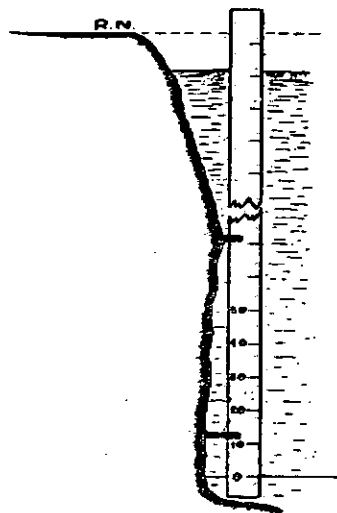


Fig.II.2.2: Régua Graduada.(Franco,1964)

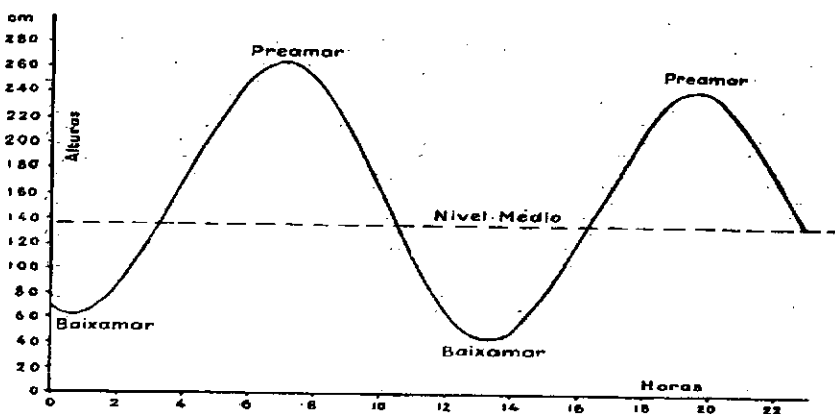


Fig.II.2.3: Maregrama (Franco,1964)

A curva traçada na figura II.2.3, que se denomina maregrama , apresenta um máximo (preamar) em cada 12 horas e 25 minutos, que corresponde a meio dia lunar. Assim, verificamos desde logo a existência de uma relação íntima entre o fenômeno e a posição da Lua.

Os mínimos, por sua vez, também se sucedem a intervalos idênticos de cerca de 6 horas e 12 minutos depois de cada preamar. Em virtude de haver, em aproximadamente 24 horas, duas preamares (PM) e duas baixa-mares (BM), diz-se que a maré em apreço é semidiurna(Franco,1964). Este é o tipo de maré mais comum na superfície terrestre e é aquela que se identifica com o tipo de maré observada na área de estudo.

A observação durante uma lunação, sendo a maré nitidamente semidiurna, indica que as maiores amplitudes (diferenças entre as alturas de preamar e baixamar consecutivas) ocorrem nas proximidades da Lua cheia e Lua nova e as menores ocorrem nas imediações dos quartos crescente e minguante. As marés de maior amplitude denominam-se marés de águas vivas ou sizígia, e as de menor amplitude chamam-se marés de águas mortas ou de quadratura .

Também pode ser observado que a amplitude da maré é maior quando a Lua está próxima da Terra, ou seja, no perigeu, e ainda que, qualquer que seja o tipo da maré, a média das alturas horárias durante um longo período (1 ano, por exemplo) é constante e denomina-se nível médio do mar (NM). O nível médio da maré, que é a média das alturas de PM e BM, difere ligeiramente do NM.

Se a ocorrência de PM ou BM processa-se a intervalos de meio dia lunar, projetando-se a Terra e a órbita lunar sobre o plano do equador e imaginando-se que a Terra esteja totalmente coberta por uma camada d'água de profundidade constante, observa-se que ocorrerá uma intumescência na parte voltada para a Lua e a outra na parte oposta. Como a Terra gira em torno de seu eixo, realizando, em relação à Lua, uma rotação em 24H 50 min, o eixo das intumescências acompanhará o eixo Terra-Lua com um certo atraso. Com a ação conjunta do Sol e da Lua, haverá duas figuras semelhantes e a superfície do mar será a que resulta da superposição.

A maré também pode ser entendida como uma superposição de diversas ondas com diferentes amplitudes, períodos e fases, conforme exemplificado na figura II.2.4. Nessa figura, a parte (a) mostra o nível d'água realmente observado; a parte (b) exemplifica as constituintes da análise harmônica das marés, sendo as mais importantes as constituintes M2 e S2, relativas às forças de atração lunar e solar respectivamente; a parte (c), apresenta os resultados da soma de todas as constituintes de (b); finalmente a parte (d) apresenta as diferenças entre os níveis observados e os previstos [(a)-(c)], que se comportam como um resíduo não periódico, que ocorre devido a efeitos climatológicos.

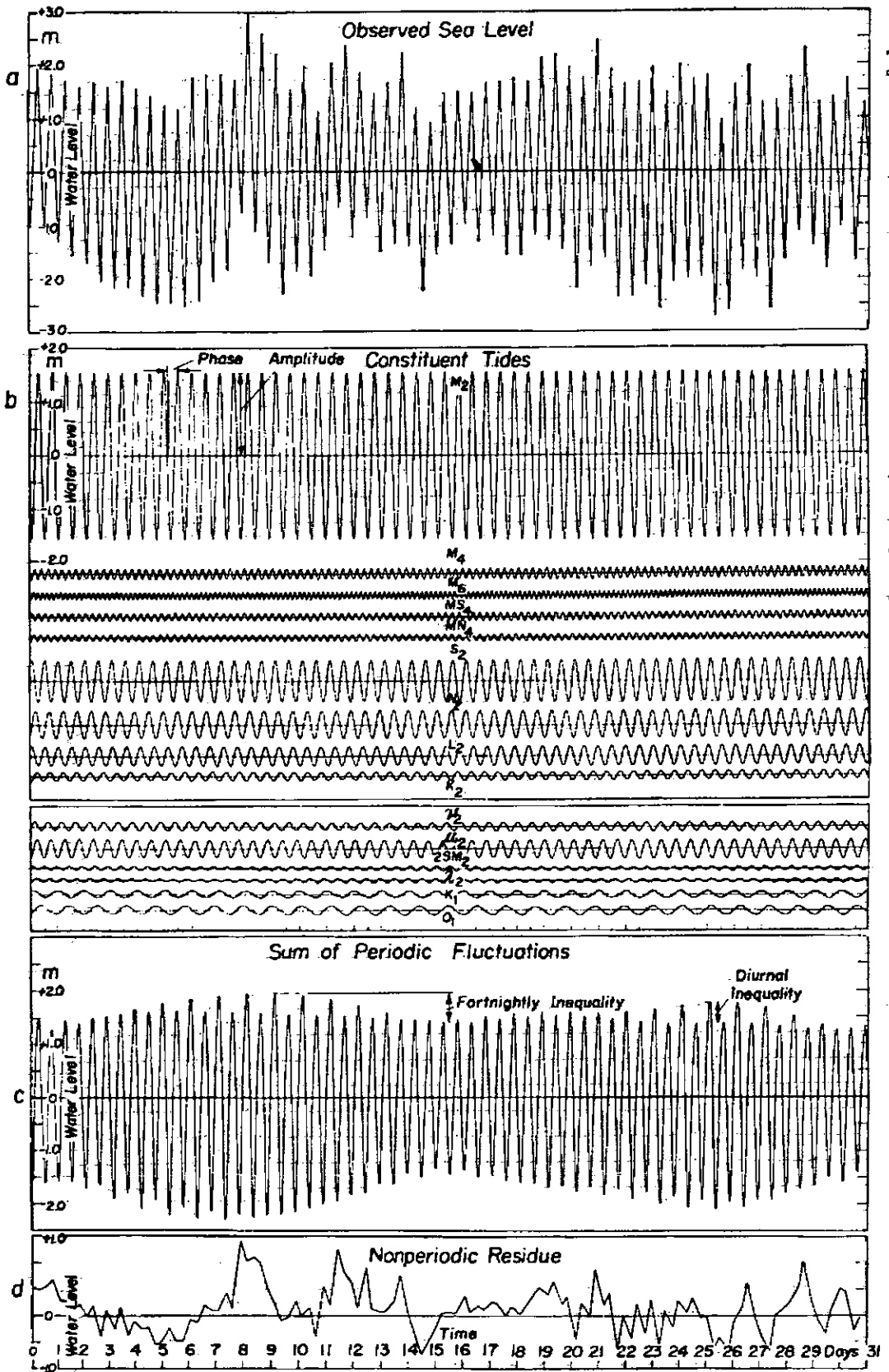


FIG. 30. Harmonic analysis: a) observed fluctuations in water level; b) harmonic constituents; c) sum of harmonic constituents; d) nonperiodic residue due to wind and pressure. (After E. Schultze.)

Fig.II.2.5: Análise Harmônica: (a)flutuações observadas no nível d'água; (b)constituintes harmônicas; (c) soma de constituintes harmônicas; (d)resíduos não periódicos devido ao vento e pressão (E.Schultze - Defant 1958)

II.2.2 - Maré Meteorológica

A maré meteorológica é definida como uma perturbação do nível do mar causada por agentes meteorológicos. Corresponde ao apresentado na figura II.2.5 (d), resíduos ou ruídos não periódicos.

A elevação do nível do mar observado é definida pela equação:

$$Z(t) = S_0 + \zeta(t) + \varepsilon(t)$$

onde:

S_0 = altura do nível médio

$\zeta(t)$ = soma das flutuações periódicas (maré astronômica)

$\varepsilon(t)$ = ruído aleatório

A altura da perturbação do nível do mar($\varepsilon(t)$), ou maré meteorológica, é obtida em um determinado instante subtraindo-se a altura da maré astronômica prevista da altura da maré observada.

Os valores obtidos podem ser, portanto, positivos ou negativos e correspondem a ação de fenômenos climatológicos como a variação dos valores de pressão atmosférica, ventos, temperatura, etc. A duração dos fenômenos pode variar de algumas horas até vários dias, sendo usualmente maiores do que um ciclo de maré.

Para tratar o problema da maré meteorológica, no presente trabalho, foi realizado um estudo estocástico dos resíduos $\varepsilon(t)$ de uma longa série de dados, procurando-se avaliar o modelo de $\varepsilon(t)$ ao longo do tempo.

II.3 - Precipitação

Diversos fatores influem nos processos climatológicos e no regime de chuvas da região Sudeste, região em que se insere a área de estudos: alguns de ordem estática e outros de ordem dinâmica. Todos atuam simultaneamente em constante interação.

Edmon Nimer-1989, descreve tanto os fatores estáticos como os Dinâmicos, determinantes da climatologia da região sudeste, apresentados resumidamente a seguir:

Fatores Estáticos (condições geográficas)

A região Sudeste se localiza entre os paralelos 14° a 25° sul, na borda ocidental do Oceano Atlântico tendo, portanto, a maioria de suas terras inseridas na zona tropical, com forte incidência de radiação solar. O clima da região apresenta as estações do ano definidas.

A radiação solar, cria melhores condições à evaporação, uma vez que no processo de evaporação é empregado calor, sendo tanto mais ativo quanto maior o calor disponível a ser empregado no processo. Outra pré-condição para que ocorra evaporação é a existência de superfícies líquidas que, na região Sudeste está representada pelo extenso litoral que possui uma superfície oceânica à disposição da evaporação e condensação.

A posição marítima da região Sudeste, aliada à sua urbanização determina uma forte e constante concentração de núcleos de condensação em camadas inferiores da atmosfera, contribuindo para o acréscimo de chuvas em seu território sempre que essa região é atingida por frentes frias e outros fenômenos de ascendência dinâmica.

Fatores Dinâmicos

Durante todo o ano, nas regiões tropicais do Brasil, sopram freqüentemente ventos de E a NE oriundos das altas pressões subtropicais, ou seja, do anticiclone semifixo do Atlântico Sul, que possui temperaturas elevadas, fornecidas pela intensa radiação solar e telúrica das latitudes tropicais e forte umidade específica fornecida pela intensa evaporação marítima. O domínio deste anti-ciclone mantém a estabilidade do tempo. Esta estabilidade, com tempo ensolarado, praticamente só cessa com a chegada de correntes perturbadas, a saber: Sistema de correntes perturbadas do Sul, Sistema de correntes perturbadas de Oeste, Sistema de correntes perturbadas de Leste.

Verifica-se que a área objeto dos estudos está inserida em região nitidamente mais chuvosa, freqüentada por invasões de correntes de circulação perturbada de Sul, representadas pelas frentes polares.

A passagem da Frente Polar é acompanhada de trovoadas, chuvas, ventos moderados a fortes do quadrante oeste rondando para o sul. Alivia significativamente as condições de temperatura e conforto ambiental durante a estação quente, condições que perduram por alguns dias até que retorne à região o fluxo de ar tropical.

Pluviometria Anual e Principais características do Regime de Chuvas : De sua posição geográfica em relação à influência marítima e às correntes de circulação perturbada, e dos contrastes morfológicos de seu relevo advêm todas as características de seu regime de chuvas.

A altura média das precipitações durante o ano exprime muito bem a atuação daqueles fatores na área. Estendendo-se no sentido SW-NE acompanhando o litoral e a Serra do Mar, trajeto mais freqüentado por frentes polares, apresenta uma altura de precipitação anual superior a 1.250mm, conforme o apresentado na figura III.3.1.

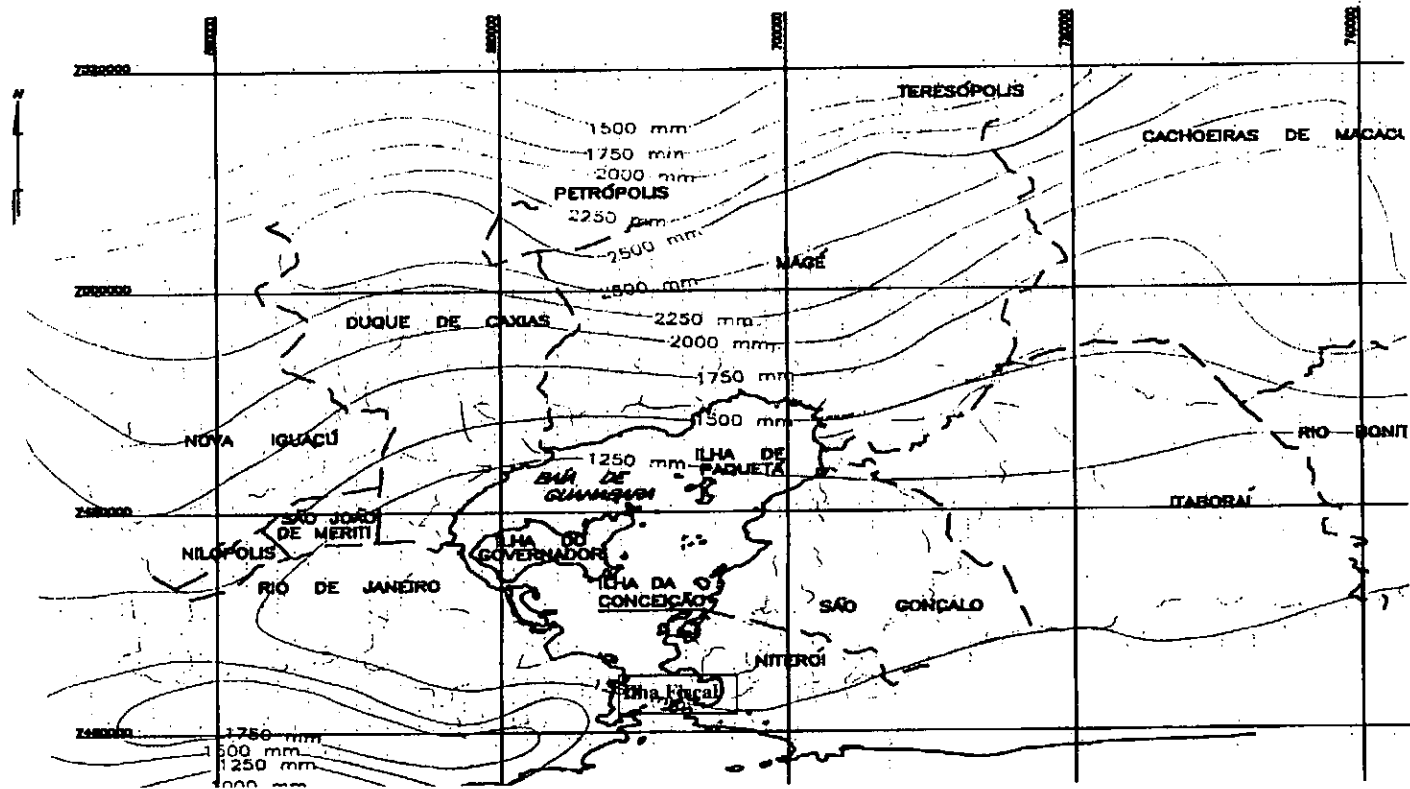


Fig.III.3.1: Isoietas Anuais - Baía da Baía de Guanabara.

II.4 - Processo Estocástico

A maioria dos processos físicos no mundo real envolve um processo aleatório ou estocástico que pode ser descrito como um fenômeno estatístico que ocorre no tempo de acordo com leis probabilísticas.

Matematicamente um processo estocástico deve ser definido como uma coleção de variáveis aleatórias ordenadas no tempo $\{ X(t), t \in T \}$, onde T denota o conjunto de pontos no qual o processo é definido.

Porém, freqüentemente é impossível fazer mais de uma observação para um dado tempo, assim somente obtém-se uma observação de cada variável aleatória.

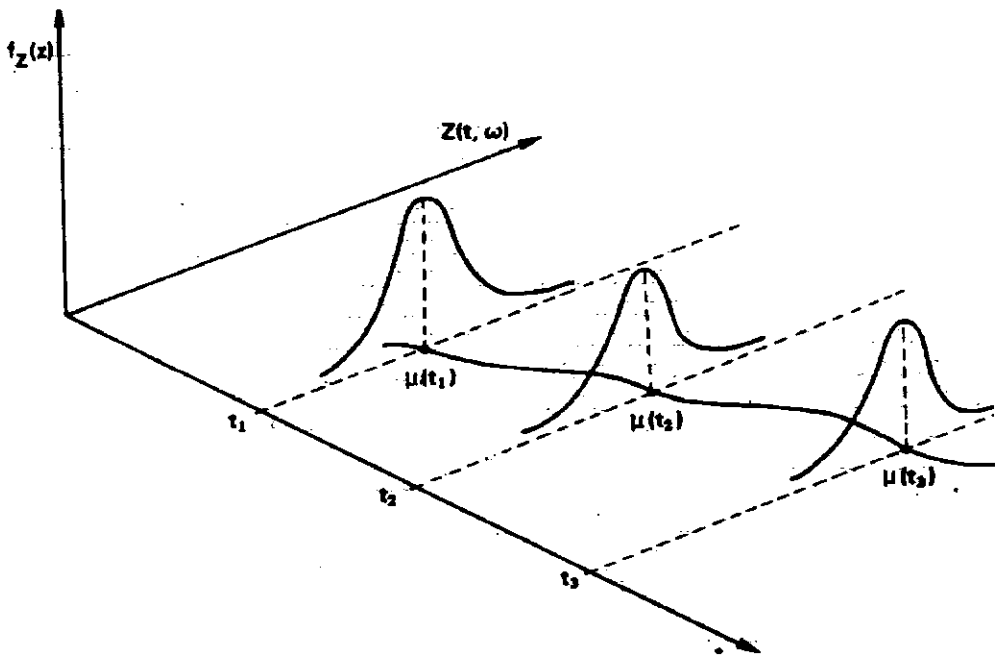


Fig. II.4.1: Processo Estocástico representado por uma família de variáveis aleatórias (Morettin & Toloï -1987).

Uma importante classe de processos estocásticos são aqueles que são estacionários. A série é estacionária se a distribuição da função de $X(t_1) \dots X(t_n)$ é a mesma da distribuição função de $X(t_1+I) \dots X(t_n+I)$ para todo $t_1 \dots t_n$, e I .

Em outras palavras, defasando o tempo original de uma quantidade I não haverá efeito nas distribuições de função, que contudo depende do intervalo entre $t_1, t_2 \dots t_n$.

Na prática, porém, a maioria das séries temporais são não-estacionárias. Com o objetivo de ajustar um modelo estacionário, é necessário remover as fontes de variação da estacionariedade.

Se durante o tempo observado, por exemplo, a série é não estacionária na média, então pode-se aplicar a diferenciação. Outra técnica utilizada para tornar o modelo estacionário é padronizar a série transformando a variável em Normal Padrão.

II.4.1 - Modelos ARMA

A metodologia para utilização dos Modelos Autorregressivos Média Móvel - ARMA, foi primeiramente desenvolvida por Box & Jenkins no ano de 1970 e diversos estudiosos tem aprimorado a técnica de construção de modelos desde então (Lettenmaier e Burges-1977; McLeod e Hipel-1978).

Consiste em ajustar, à um conjunto de dados, um modelo estocástico linear, baseado na idéia de que a série temporal é gerada através de um filtro linear:

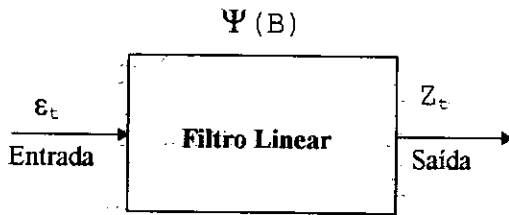


Fig.II.4.2 : Modelo estocástico representado por um Filtro Linear.

onde:

ϵ_t = série de entrada, constituída dos ruídos aleatórios;

Z_t = série de saída;

$\Psi(B)$ = filtro linear ou função de transferência

A construção do modelo baseia-se na escolha de uma estrutura adequada, embasada nos próprios dados da série, que deve ser simples e parcimoniosa, ou seja, deve conter um pequeno número de parâmetros, permitindo resultados ou previsões precisas.

Os estágios do ciclo iterativo que norteiam a escolha do modelo são:

- Identificação do modelo;
- Estimação dos parâmetros;
- Verificação do modelo ajustado.

Os Modelos Autorregressivos Média Móvel - ARMA(p,q), são modelos que utilizam um filtro linear, combinando dois operadores de ordem finita: um autorregressivo de ordem p e um média móvel de ordem q.

O processo autorregressivo apresenta um componente aleatório de erro e uma combinação linear de observações anteriores, enquanto o processo média móvel apresenta um componente também aleatório e uma combinação linear de ruídos anteriores.

A forma geral do Modelo ARMA(p,q) é descrita através da seguinte equação:

Eq. II.4.1:

$$Z_t = \sum_{i=1}^p \Phi_i Z_{t-i} - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t$$

onde:

Z_t = série de dados;

t = índice de tempo;

Φ_i = coeficientes autoregressivos;

θ_j = coeficientes média móvel;

ε_t = série de ruídos aleatórios, usualmente normais.

A estacionariedade de um processo estocástico (Z_t) é verificada na prática quando as características são constantes para todo o processo, ou seja, a média e a variância são constantes para $Z_{t+\tau}$:

$$\mu_t = \mu;$$

$$\sigma_t^2 = \sigma^2.$$

O histórico da modelagem de séries hidrológicas indica que em sua maioria são utilizados modelos ARMA de ordem não superior a dois, tanto para o filtro autorregressivo ($p \leq 2$) como para o de média móvel ($q \leq 2$).

Em seqüência é apresentado o Modelo ARMA(2,1), com mais detalhes, por ter sido o modelo de ajuste utilizado.

Modelo ARMA(2,1)

O modelo ARMA(2,1), é a partir da seguinte equação:

Eq.II.4.2:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

onde:

Z_t = série de dados;

t = índice de tempo;

ϕ_1 = coeficiente autoregressivo de ordem 1;

ϕ_2 = coeficiente autoregressivo de ordem 2;

θ_1 = coeficiente média móvel de ordem 1;

ε_t = série de ruídos aleatórios no instante t , $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

$$E[\varepsilon_t] = 0, \forall t;$$

$$\text{Var}[\varepsilon_t] = \sigma_\varepsilon^2, \forall t;$$

$$E[\varepsilon_t \varepsilon_{t-k}] = 0, k > 0.$$

Coefficientes autorregressivos: $-1 < \Phi_1 < 1$

Coefficiente média móvel: $-1 < \theta_1 < 1$

Para o modelo ARMA (2,1), tem-se o seguinte correlograma :

$$\rho_0 = 1$$

$$\rho_1 = A/B$$

$$\rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} + \phi_2 \rho_{k-2}, k \geq 2$$

onde A e B são os seguintes determinantes:

$$A = \begin{vmatrix} (1-\phi_2^2) & (1-\phi_1\theta_1 + \theta_1^2) \\ -\phi_1 & -\theta_1 \end{vmatrix}$$

Estimativa dos Parâmetros

Pode-se estimar o valor dos parâmetros de um modelo Arma (p,q), através do método dos momentos, igualando as expressões do autocorrelograma do modelo, com os coeficientes de autocorrelação amostral, definidos pela seguinte equação:

$$\rho_j = \frac{1}{n-j} \sum_{t=1}^{n-j} (Z_{t+j} - Z_t)$$

O outro método alternativo para a estimativa dos parâmetros, equivalente ao método da máxima verossimilhança, minimiza a soma dos quadrados dos resíduos (componentes independentes), ou seja :

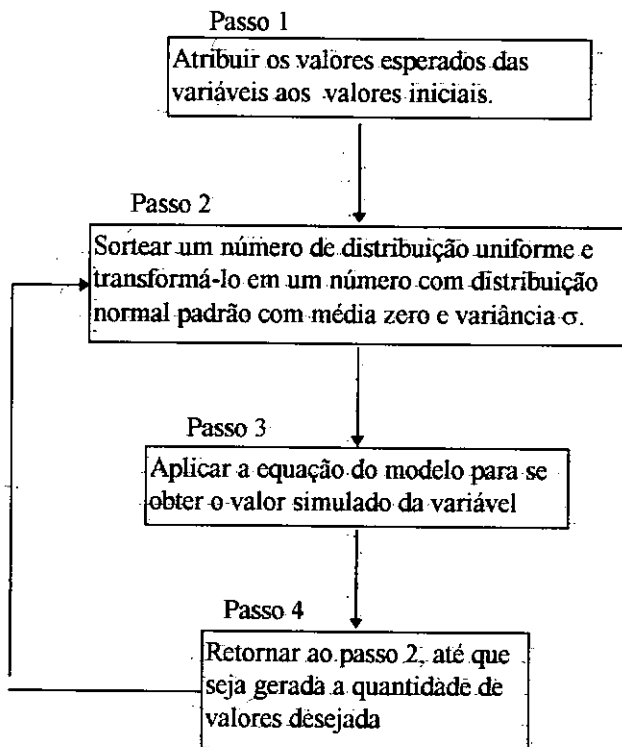
$$S = \sum \varepsilon_t^2$$

Geração de Séries Sintéticas

Após a análise da série histórica, no que diz respeito à escolha do modelo de ajuste aos seus dados, ao cálculo das suas principais características estatísticas e finalmente à estimativa dos parâmetros, é então possível gerar séries sintéticas.

A geração de séries sintéticas consiste em implementar um algoritmo, que através de uma seqüência de comandos, organizados em um programa de computador, sejam gerados novos dados que preservem as características da série original, e por isso simulem o comportamento da série temporal respectiva.

O referido algoritmo foi escrito com a seguinte sequência de passos:



III - ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

III.1 - Obtenção dos dados

A cidade do Rio de Janeiro, por sua localização e caracterização climatológica, sendo freqüentemente atingida por chuvas que causam inundações, foi selecionada para o estudo da simultaneidade das chuvas com níveis d'água, que pudessem estar ocorrendo em função dos mesmos agentes causadores.

Foram realizadas pesquisas junto a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), por ser uma instituição tradicional na coleta de dados e parâmetros oceanográficos.

No que toca à coleta de dados pluviométricos, foram contactados o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), a Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), além da própria DHN.

Dentre as possibilidades existentes optou-se por utilizar os dados da estação maregráfica da Ilha Fiscal, mantida pela DHN, com registros disponíveis a nível horário, tanto para níveis observados quanto para os níveis previstos.

Já para os dados pluviométricos, foram coletados os registros diários das estações de Andorinhas, Nova Iguaçu e Xerém sob administração da SERLA, Estação de Bombeamento Imunana, operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) para o DNAEE, e estação da Ilha Fiscal/Ponta da Armação operada pela DHN.

O quadro abaixo apresenta, para cada estação, o seu código de identificação junto ao DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, as coordenadas de localização, e a altitude.

Estação	Tipo	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Ilha Fiscal	Maregráfica	54140(DHN)	22° 53,8'S	43° 9,9'W	-
Ilha Fiscal	Pluviométrica	02243064	22°54'S	43°10'W	-
Andorinhas	Pluviométrica	02243001	22°32'36"S	43°03'37"W	80
Xerém	Pluviométrica	02243162	22°33'03"S	43°18'15"W	143
Nova Iguaçu	Pluviométrica	02243046	22°42'20"S	43°27'44"W	40
Imunana	Pluviométrica	02243001	22°41'S	42°57'W	10

A localização geográfica das estações tanto pluviométricas como maregráfica pode ser observada na figura III.1.1. Verifica-se que as estações de Andorinhas e Xerém localizam-se em área mais próxima ao limite da bacia da Baía de Guanabara e apresentam maiores altitudes. O período disponível de dados coletados para cada estação está registrado no quadro da figura III.1.2.

A figura III.1.3 apresenta a ficha descritiva da estação maregráfica da Ilha Fiscal. Nela podem ser observadas as diferenças de nível entre o zero da régua, referência utilizada para os dados observados, e o Nível de Redução (NR), referência dos dados previstos, bem como a correlação entre estes e as referências fixas no terreno RN1 e RN2, amarrados em relação ao Zero do IBGE.

A posição do nível de redução é determinada pela análise harmônica e representa um nível mínimo, o qual é raramente atingido. Para que seja possível a comparação entre os níveis observados e os níveis previstos fornecidos pela DHN, é necessário que o valor do NR seja subtraído do valor observado análogo.

A altura do nível de redução em relação ao zero da régua é dada por:

$$NR = S_0 - Z_0$$

onde:

S_0 = nível médio em relação ao zero da régua;

Z_0 = altura do nível médio em relação ao NR.

Para correlacionar os níveis observados e previstos referenciados à um plano comum determinado pelo Nível de Redução, ao Zero do IBGE, é necessário reduzir os valores anteriores em 87,1 cm.

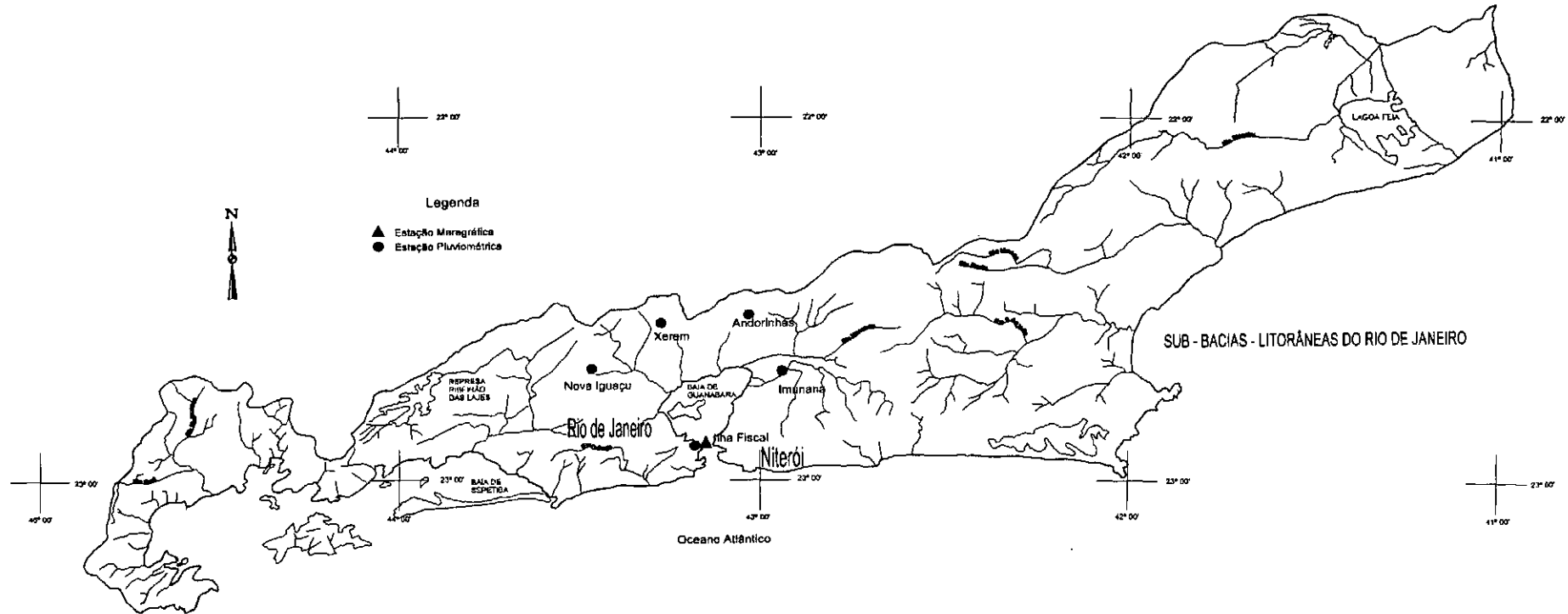


Fig. III.1.1: Área de Estudo - Localização das Estações.

DADO	ESTAÇÃO	ANO																													
		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
Tipo	Nome																														
Níveis Observ.	Ilha Fiscal	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-	-	-	■	■	-	-
Níveis Prev.	Ilha Fiscal	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Precipitação	Ilha Fiscal																														
Precipitação	Imuhana			-	-	■		-	■	■								-		-	-									-	-
Precipitação	Andorinhas												-																		-
Precipitação	Nova Iguaçu												-	-																	-
Precipitação	Xerém												-																		-
	Legenda :	■	Observação Completa																												
		-	Com falhas																												
			Sem observação																												

Fig. III.1.2: Quadro de disponibilidade de dados das estações maregráfica e pluviométricas consideradas.

III.2 - Níveis do Mar

Para realização dos estudos com os níveis do mar, foram utilizados os dados horários da Ilha Fiscal, no período entre 1965 e 1992, desde que não houvesse registro de falhas. A figura III.2.1 ilustra a ocorrência dessas falhas.

Observa-se que não foi possível utilizar as informações de 1965, 1970, 1980 e 1987 a 1990 e portanto, a série temporal de níveis apresenta um total de 21 anos de observações.

Para dar prosseguimento aos estudos, foram calculados os valores médios diários dos níveis observados e previstos, utilizando-se um filtro média-móvel de 25 horas. Esse é o tempo relativo ao ciclo completo da maré do tipo semi-diurna que é observada no local em apreço.

Os resultados obtidos foram referenciados ao Datum de Imbituba do IBGE. O gráfico III.2.2 apresenta os valores médios mensais dos níveis observados e previstos na Baía de Guanabara ao longo do ano. Observa-se que no período compreendido entre os meses de março e junho ocorrem os níveis médios mais elevados.

A figura III.2.3 apresenta o quadro com os valores mínimos, médios e máximos para os níveis horários e médios diários, observados em cada ano considerado. Já a figura III.2.4 apresenta um gráfico onde foram plotados somente os valores máximos anuais para os níveis horários e médios diários.

Depreende-se desse gráfico que o máximo nível horário observado na Ilha Fiscal é da ordem de 1,1 m, enquanto que o máximo nível médio diário atinge a cota 0,6m.

ANO	N.º TOTAL DE DIAS	PERÍODO COM FALHAS	DIAS COM FALHAS
1965	365	01/01, 24/12 a 31/12	9
1966	365	-	0
1967	365	-	0
1968	366	-	0
1969	365	-	0
1970	365	25/12 a 31/12	7
1971	365	-	0
1972	366	-	0
1973	365	-	0
1974	365	-	0
1975	365	-	0
1976	366	-	0
1977	365	-	0
1978	365	-	0
1979	365	-	0
1980	366	01/06 a 08/08, 01/11 a 30/11	99
1981	365	-	0
1982	365	-	0
1983	365	-	0
1984	366	-	0
1985	365	-	0
1986	365	-	0
1988	366	01/01 a 08/11	220
1989	365	19/01 a 23/01	5
1990	365	12/03 a 23/03	12
1991	365	-	0

Fig. III.2.1: Quadro de Falhas dos Níveis Observados da Ilha Fiscal.

NÍVEIS MÉDIOS MENSAIS - IBGE

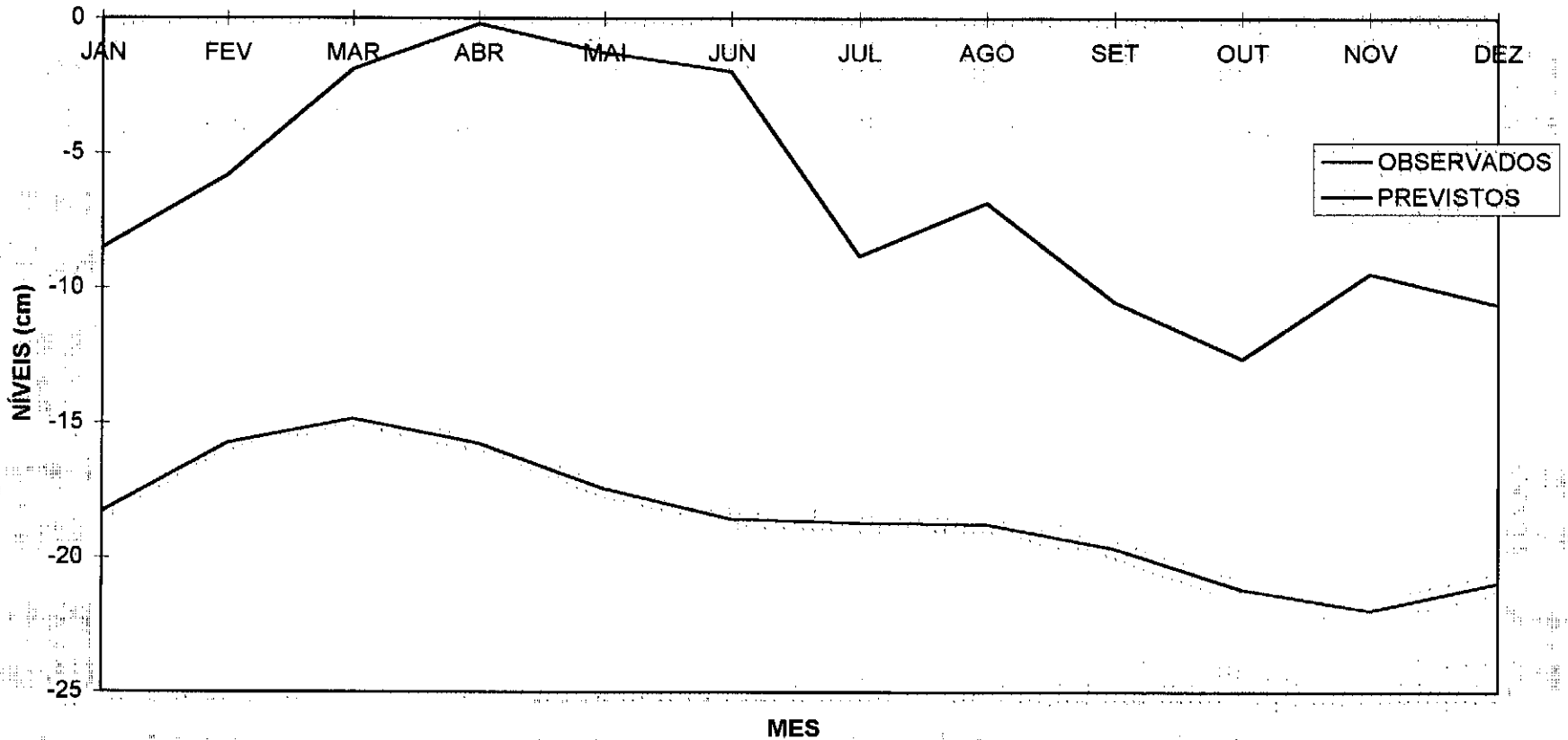


Fig. III.2.2: Níveis Médios Mensais - Referência IBGE.

Níveis Observados - Ilha Fiscal (Referência IBGE)						
Ano	Nível Horário Máximo			Nível Diário Máximo		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
1966	-34,7	19,3	76,3	-67,7	-25,7	16,3
1967	-55,7	27,3	107,3	-90,7	-18,7	31,3
1968	-32,7	24,3	80,3	-73,7	-20,7	30,3
1969	-32,7	30,3	84,3	-64,7	-14,7	33,3
1971	-22,7	41,3	112,3	-64,7	-6,7	48,3
1972	-26,7	40,3	112,3	-55,7	-8,7	45,3
1973	-9,7	45,3	103,3	-33,7	0,3	60,3
1974	-23,7	35,3	88,3	-66,7	-9,7	42,3
1975	-21,7	42,3	106,3	-44,7	-1,7	38,3
1976	-7,7	45,3	92,3	-32,7	0,3	43,3
1977	-18,7	44,3	111,3	-46,7	-0,7	58,3
1978	-18,7	40,3	98,3	-51,7	-4,7	43,3
1979	-11,7	48,3	96,3	-42,7	5,3	59,3
1981	-29,7	45,3	108,3	-60,7	-0,7	45,3
1982	-4,7	52,3	114,3	-45,7	6,3	51,3
1983	-26,7	46,3	97,3	-46,7	1,3	54,3
1984	-23,7	38,3	108,3	-51,7	-1,7	40,3
1985	-19,7	41,3	94,3	-45,7	-3,7	54,3
1986	-14,7	44,3	100,3	-52,7	-0,7	42,3
1991	-44,7	38,3	101,3	-59,7	-6,7	38,3

Fig. III.2.3: Valores mínimos, médios e máximos dos níveis horários e médios diários

Níveis Observados - Ilha Fiscal - Referência IBGE

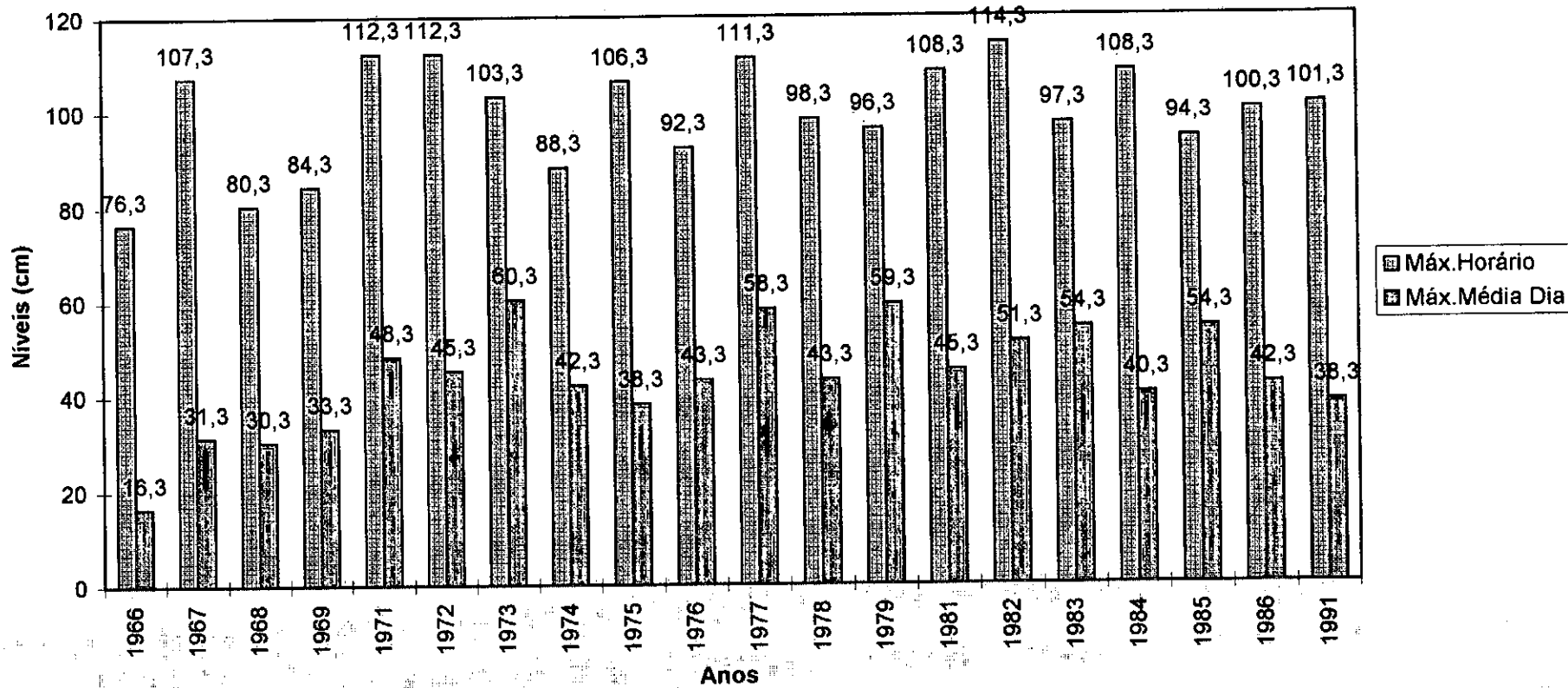
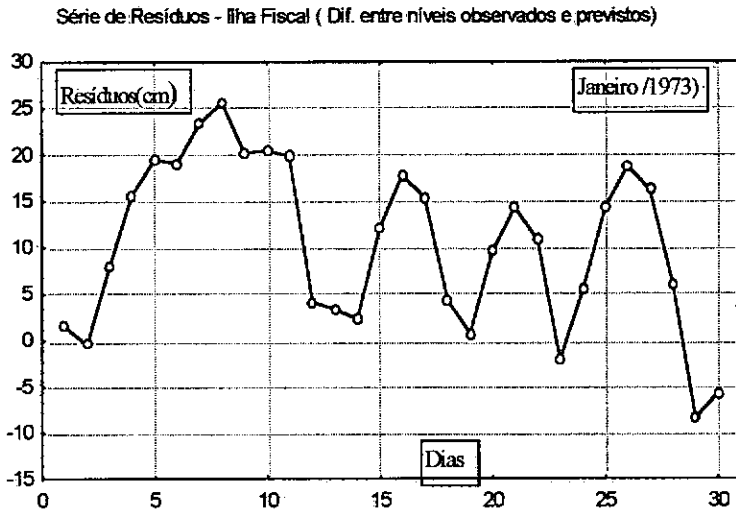


Fig.III.2.4: Níveis máximos horários e níveis médios diários da Ilha Fiscal - Referência IBGE.

Em sequência foram calculadas as diferenças entre os níveis previstos e os níveis observados. Essas diferenças, que correspondem aos resíduos não periódicos ilustrados na figura II.2.5 (d), ocorrem devido aos efeitos climatológicos.

A figura III.2.5 seguinte, ilustra para a Ilha Fiscal, os resíduos calculados para o mês de janeiro de 1973, como exemplo. Observa-se que durante esse mês os resíduos são quase sempre positivos, ou seja, os níveis observados na estação maregráfica são superiores aos previstos pela DHN.



III.3 - Precipitação

Em uma primeira fase, foram coletados os dados diários de precipitação de cinco estações pluviométricas: Ilha Fiscal, Andorinhas, Xerém, Nova Iguaçu e Imunana, localizadas na bacia hidrográfica da Baía de Guanabara, conforme descrito no item III.1. Procurou-se selecionar estações que apresentassem uma boa massa de dados disponíveis, no período comum aos registros do nível do mar.

Após as primeiras análises concluiu-se que os estudos deveriam prosseguir somente com os dados registrados na estação da Ilha Fiscal, por considerar-se que esta estação melhor representa a região no que toca às chuvas de origem frontal, apresenta a maior série de dados no período comum aos registros de níveis do mar e seus dados são de boa qualidade.

A figura III.3.1 apresenta a precipitação média mensal e a precipitação total anual da Ilha Fiscal. Nessa figura se observa que trimestre mais chuvoso está compreendido entre os meses de dezembro a fevereiro, e que o valor total anual de 1250 mm ora verificado, corresponde ao apresentado no item II.3.2 quando da caracterização do regime de chuvas da bacia da Baía de Guanabara.

Ressalta-se que o esse período não é coincidente com o período de marés médias mensais observadas mais elevadas, que corresponde aos meses de março a junho (figura III.2.6).

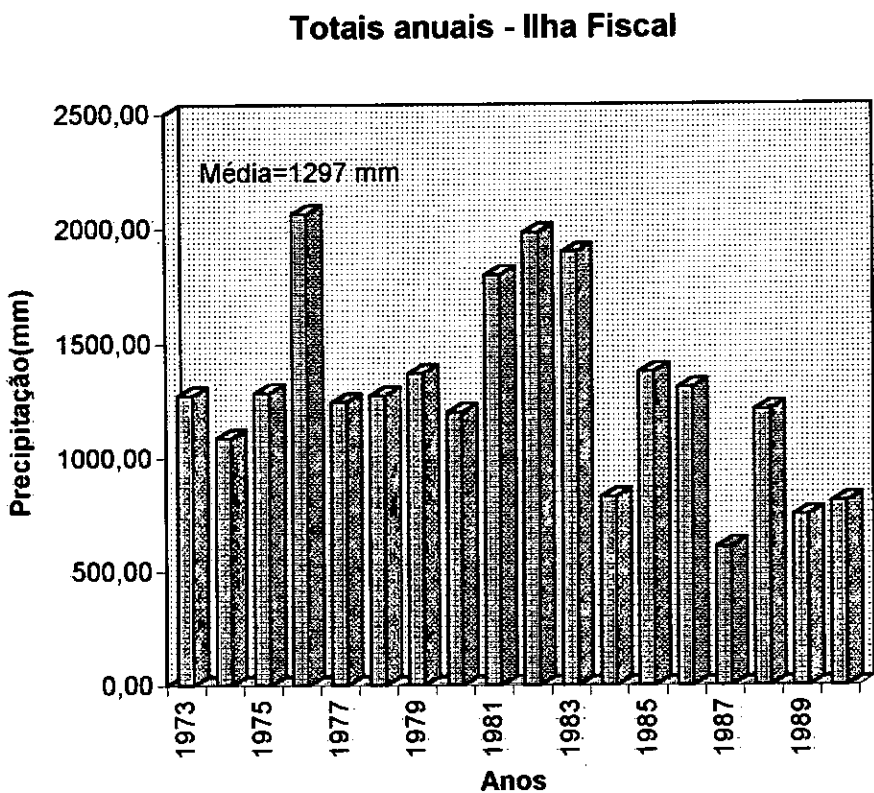
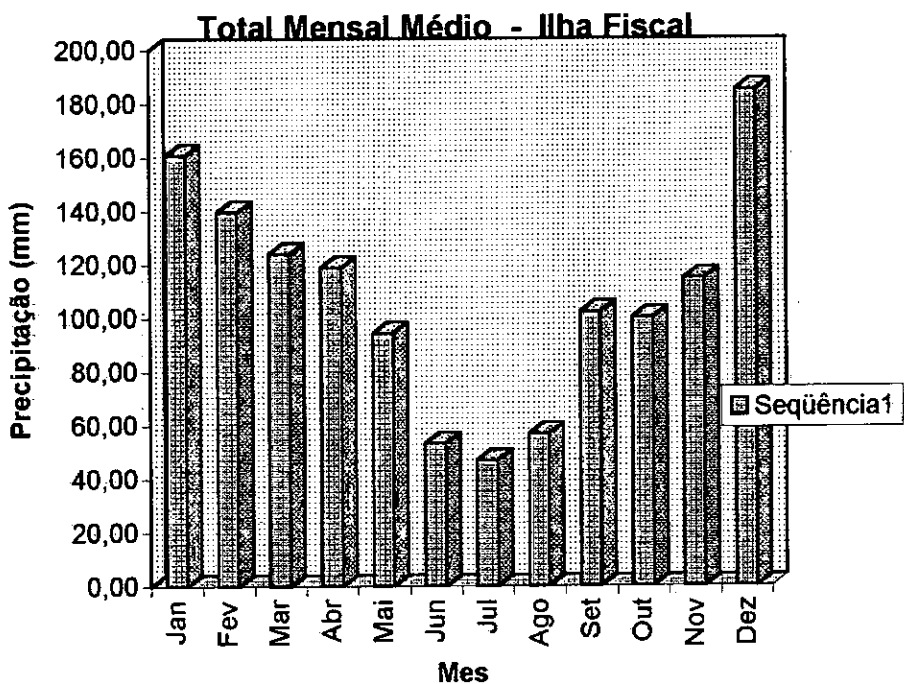


Fig.III.3.1: Total mensal médio e Totais anuais de chuva na Ilha Fiscal

III.4 - Série Conjunta

A partir dos dados de precipitação e dos resíduos obtidos pelo cotejamento do nível do mar observado e previsto na Ilha Fiscal, foi organizado um arquivo contendo informações relevantes disponíveis incluindo a data (ano, mês, dia) do evento, precipitação(mm), nível observado (cm), nível previsto (cm) e o resíduo (cm).

O período total da série conjunta é de 13 anos e corresponde ao conjunto de anos disponível, comum entre precipitação e níveis, sem registro de falhas, conforme a seguir descrito:

Estação Pluviométrica	Período	Total de anos	Nº de Observações
Ilha Fiscal	1973 a 1986	13	4747

Em sequência, de posse dos dados organizados, procurou-se verificar a correlação entre os resíduos não periódicos (ou diferenças entre níveis observados e previstos) e as dados de chuva, das formas descritas nos itens seguintes.

III.4.1 - Tabela de Contingência

A tabela de contingência é um recurso que permite avaliar o grau de dependência entre diferentes variáveis. A utilização desta ferramenta implica na classificação das variáveis em escalas nominais.

Para analisar os dados de chuva e resíduos, admitiram-se 3 categorias para cada uma das variáveis, da seguinte forma:

Variável	Categoria	Valores
Resíduos (Obs-Prev)	R1	Valores médios diários inferiores a zero
	R2	Valores médios diários entre zero e 20 cm
	R3	Valores médios diários acima de 20cm
Precipitação	P1	Valores diários iguais a zero (dias sem chuva)
	P2	Valores diários entre 0 e 50 mm
	P3	Valores diários acima de 50 mm

O quadro da figura III.4.1, ilustra os cálculos realizados e os resultados encontrados. Avaliou-se a dependência entre as variáveis calculando-se o valor do qui-quadrado e testando-se a hipótese de independência.

Ilha Fiscal

Tabela de Contingência				
	Resíduos (cm)			
Precip.(mm)	R1	R2	R3	Total
P1	348	1358	1664	3370
P2	50	353	906	1309
P3	3	20	45	68
Totais	401	1731	2615	4747
Cálculo do qui-quadrado				
	Valores Esperados			
	285	1229	1856	
	111	477	721	
	6	25	37	
	$X^2 = \text{Somat.}[(O-E)^2/E] =$		164	
	14,08	13,57	19,95	
	33,19	32,38	47,41	
	1,31	0,93	1,52	

Fig.: III.4.1 Tabela de Contingência para os dados da Ilha Fiscal.

O valor do qui-quadrado é dado por:

$$X^2 = \text{Somatório } [(O - E)^2/E], \text{ onde:}$$

X^2 = valor do qui-quadrado;

O = valor observado;

E = valor esperado;

O valor esperado de cada categoria é calculado supondo-se a independência das variáveis. Em seguida calcula-se o qui-quadrado.

A hipótese nula formulada é: As variáveis precipitação e resíduos são independentes. Aceita-se a hipótese nula se o valor do qui-quadrado calculado for inferior ao valor crítico tabelado, para um determinado nível de significância e nº de graus de liberdade.

A significância adotada é de 0,10 e a quantidade de graus de liberdade é calculada em função do nº de linhas e colunas da tabela: produto do nº de linhas menos 1 linha multiplicada pelo nº de colunas menos 1 coluna, ou seja, 4 graus de liberdade.

O valor do qui-quadrado tabelado para as condições ilustradas anteriormente é de 7,78. Os valores calculados podem ser observados no quadro da figura II.4.1. Observa-se o valor do qui-quadrado calculado de 164 é muito superior ao valor crítico, ou seja, os valores obtidos na amostra são muito diferentes dos valores esperados caso existisse independência. Rejeita-se então, a hipótese nula de independência entre as variáveis precipitação e resíduos.

Na tentativa de quantificar a dependência, para a categoria P3/R3 foi gerado um gráfico de correlação, ilustrado na figura III.4.2.

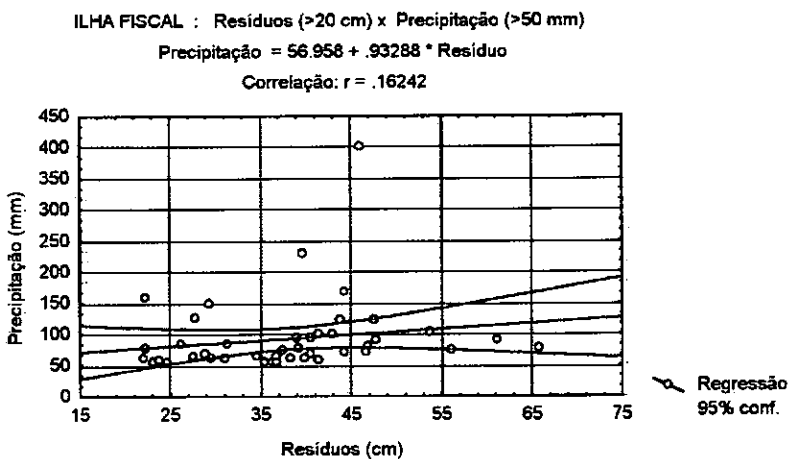


Fig. III.4.2: Gráfico de correlação precipitação (>50mm) x resíduos (>20cm) para a estação da Ilha Fiscal.

Observa-se que a correlação na faixa onde os efeitos climatológicos geram a elevação do nível do mar acima do nível previsto superior a 20 cm, coincidentes com precipitações superiores a 50 mm na mesma estação é muito baixa.

Foi realizada uma outra tentativa, considerando-se ainda mais rigorosos os valores, no intuito de verificar se a correlação sofreria alteração significativa. Conforme verifica-se na figura III.4.3, para precipitações superiores a 100 mm e resíduos superiores a 30 cm, a correlação entre os dados históricos passou a ser negativa.

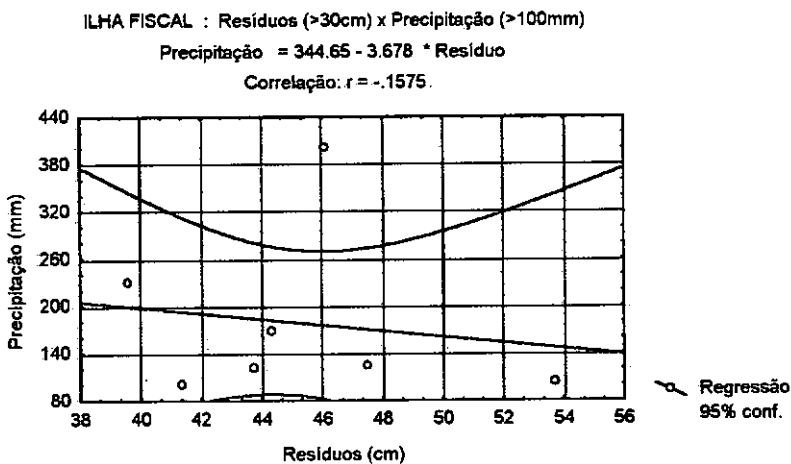


Fig. III.4.3: Gráfico de correlação precipitação (>100mm) x resíduos (>30cm) para a estação da Ilha Fiscal.

III.4.2 - Gráfico de Correlação Cruzada

Continuando a investigação do relacionamento entre as variáveis precipitação versus resíduos, foi elaborado um gráfico de correlação cruzada, que apresenta para vários distanciamentos em dias (lags), o valor da correlação entre os dados.

Na figura III.4.4, verifica-se então que a correlação contemporânea (lag=0), considerando-se todos os registros da série histórica conjunta é da ordem de 0,18. Para verificar se essa correlação é significativa, ou não, foi realizado um teste de hipótese sobre o coeficiente de correlação, como segue:

$$H_0 : \rho = 0 \text{ (não existe correlação)}$$

$$H_A : \rho \neq 0$$

A distribuição de ρ amostral é $\approx (0, 1/\sqrt{n})$

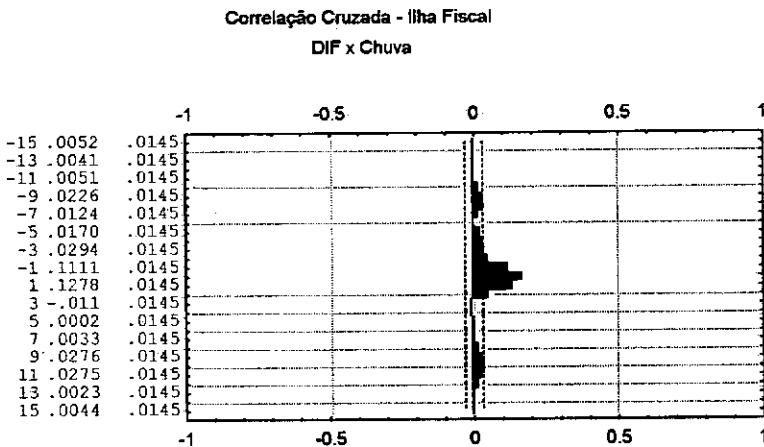
$$\rho \text{ amostral } \in (-1,96 \sigma_\rho, +1,96 \sigma_\rho)$$

$$\sigma_\rho = 1/(n)^{1/2} = 1/(4747)^{1/2} = 0.0145$$

O intervalo de ρ amostral para validar a hipótese nula é

$$\rho \text{ amostral } \in (-0.028, +0.028)$$

Como ρ calculado a partir da amostra é da ordem de 0.18, fora do intervalo em que seria considerado nulo, a hipótese de independência, ou de que não existe correlação entre precipitações e resíduos, é rejeitada.



III.5 - Modelagem Estocástica

Neste item descreve-se os procedimentos realizados para a modelagem estocástica dos resíduos (diferenças entre os níveis observados e previstos), a simulação de séries de precipitações e níveis do mar, utilizando-se as informações da série histórica conjunta da estação da Ilha Fiscal, para o período de 1973 a 1986, com as seguintes características estatísticas :

Estatísticas - Ilha Fiscal

Série	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	N
Resíduos (Obs. - Prev.)	21.79	16.10	-45.80	76.52	4747
Precipitação	3.95	13.60	0.00	400.00	4747

Observa-se que a média dos resíduos (diferenças entre os níveis observados e previstos), no período de dados considerado, é positiva e assume o valor de 21,79 cm. Significa que os efeitos climatológicos observados na Baía de Guanabara tem a tendência de elevar os níveis, em relação aos previstos pelas forças astronômicas.

A metodologia de análise e aplicação da modelagem estocástica seguiu de acordo com o apresentado nos itens seguintes.

III.5.1 - Geração de Séries Sintéticas de Resíduos

A primeira etapa consiste na identificação do modelo estocástico que apresente o melhor ajuste à série histórica, e em seguida estimam-se os parâmetros do modelo, que posteriormente possibilitam a geração das séries sintéticas.

Inicialmente foi realizada a transformação da série histórica de resíduos (y_1, y_2, \dots, y_n) , para uma série com distribuição normal padrão (z_1, z_2, \dots, z_n) , da seguinte forma:

$$Z_t = (Y_t - \mu_y) / \sigma_y$$

onde:

Z_t = variável transformada, com distribuição acumulada normal padrão;

Y_t = série original;

μ_y = média da série original;

σ_y = desvio padrão da série original.

A identificação da ordem do modelo ARMA para ajuste à série de resíduos padronizados Z_t , foi realizada a partir da análise da função de autocorrelação dos ruídos brancos de diversos modelos ajustados, assumindo-se que seriam os modelos adequados.

Quando o modelo é adequado, o valor dos coeficientes de autocorrelação para qualquer lag é praticamente zero. Procura-se também o modelo que apresente um bom ajuste com um pequeno número de parâmetros, mantendo válido o princípio da parcimônia.

A seguir são apresentadas as funções autocorrelação de alguns modelos ARMA, através das figuras III.5.1, III.5.2 e III.5.3 que ilustram respectivamente o modelo ARMA(1,0) ou AR(1), ARMA(1,1) e ARMA(2,1).

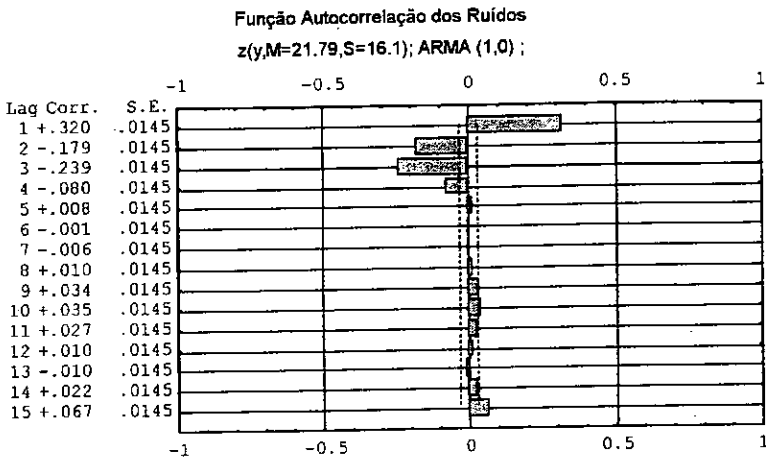


Fig. III.5.1: Função autocorrelação dos ruídos do modelo ARMA(1,0)

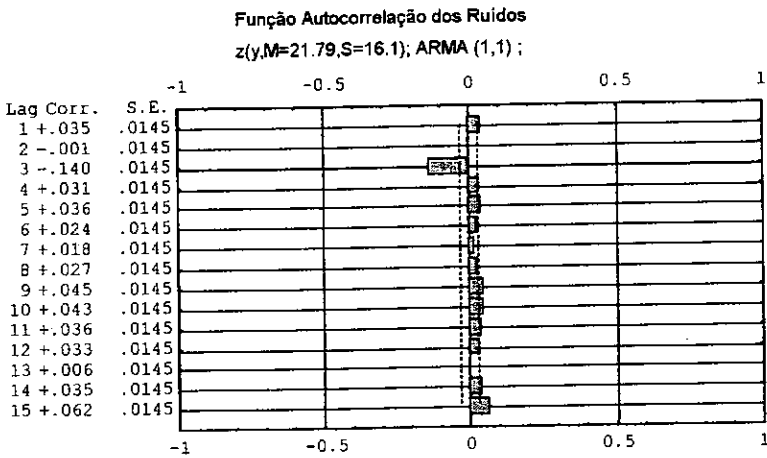


Fig. III.5.2: Função autocorrelação dos ruídos do modelo ARMA(1,1)

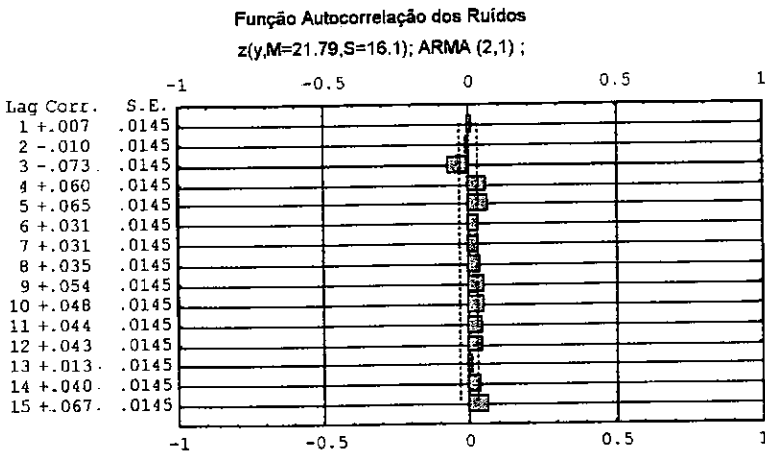


Fig. III.5.3: Função autocorrelação dos ruídos do modelo ARMA(2,1)

Verifica-se que o modelo AR(1) apresenta coeficientes de autocorrelação significativos até o lag 4. Quanto ao ARMA (1,1), quando se observa o lag 3, conclui-se que ainda ocorre uma correlação que não pode ser desprezada.

O modelo ARMA(2,1), finalmente, apresenta a função autocorrelação onde os coeficientes, para qualquer lag aplicado, são próximos de zero. Decidiu-se então pela utilização desse modelo na rotina de simulação dos resíduos não periódicos do nível do mar.

Em seguida foi realizada uma verificação do ajuste dos ruídos brancos à função normal, figura III.5.4, bem como foram calculados os parâmetros do modelo ARMA(2,1).

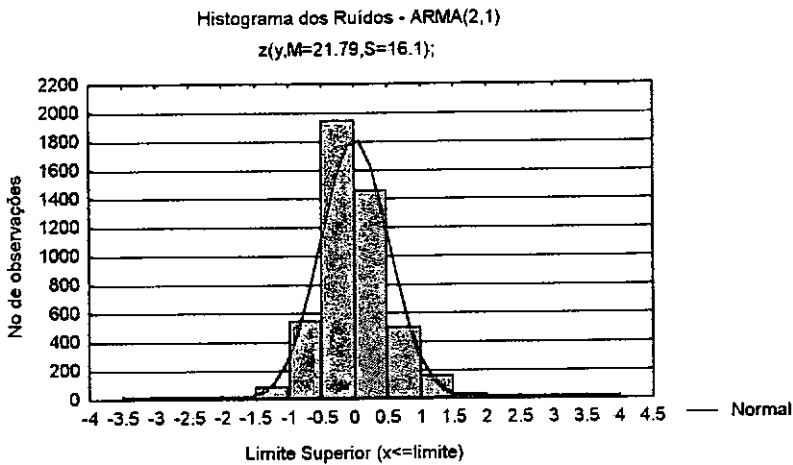


Fig. III.5.4 : Histograma dos ruídos do modelo ARMA(2,1).

O modelo ARMA(2,1) é ajustado aos dados de acordo com a equação seguinte:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

Os parâmetros foram calculados, através do programa Statistica que, a partir das características da amostra, identificou os seguintes valores:

$$\phi_1 = +0,8597$$

$$\phi_2 = -0,1682$$

$$\theta_1 = -0,3556$$

As principais características estatísticas da série histórica de resíduos dos níveis do mar, série padronizada e a série de ruídos do modelo ARMA(2,1) ajustado aos dados, encontram-se registradas no quadro abaixo.

Série de Resíduos	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Histórica	21,79	16,10	-45,80	76,52
Padronizada	0,00	1,00	-4,20	3,40
Ruídos	0,00	0,52	-3,32	2,74

A seguir são apresentados os gráficos da função autocorrelação e da função autocorrelação parcial da série padronizada, figuras III.5.5 e III.5.6, respectivamente.

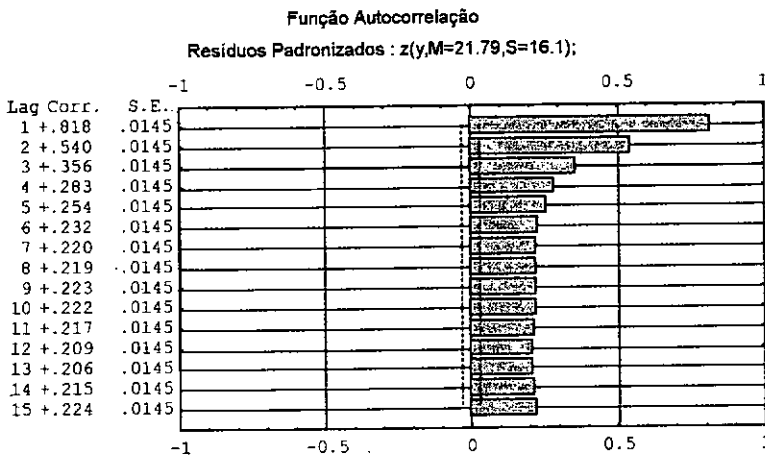


Fig.III.5.5 : Função Autocorrelação da Série Padronizada de Resíduos.

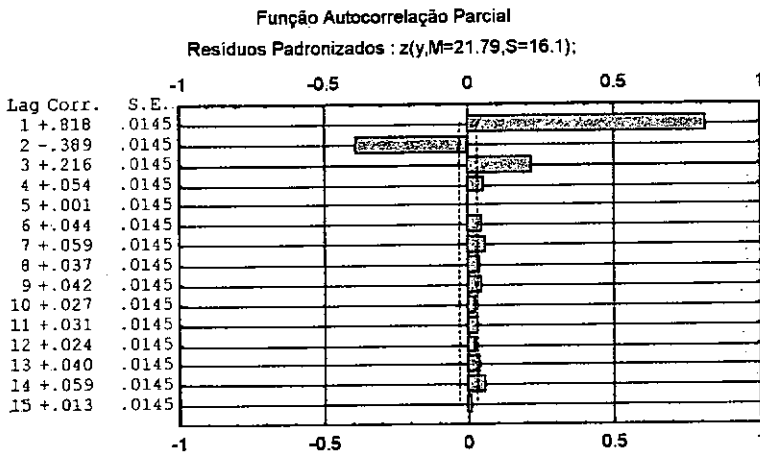


Fig.III.5.6 : Função Autocorrelação Parcial da Série Padronizada de Resíduos.

Com os resultados anteriormente é possível então dar início ao processo de geração de séries sintéticas onde o modelo e seus parâmetros são dados de entrada. Para isso foi elaborado um programa, na linguagem Turbo pascal, e foram gerados 10.000 anos de informações diárias. A rotina elaborada teve por base o descrito no item II.4.1, no tocante a geração de séries sintéticas.

A partir da série simulada foi feita a verificação do modelo através da análise de suas características estatísticas, do ajuste à distribuição normal padrão, bem como da análise dos ruídos brancos.

É necessário, porém, para que se possa depositar confiança no modelo estocástico utilizado na simulação, verificar se foram preservadas algumas propriedades da série histórica. O interesse dos estudos está voltado para os valores diários de níveis do mar observados. O modelo ARMA(2,1) foi aplicado aos resíduos não periódicos, resultantes do cotejo entre níveis reais observados e níveis previstos.

Para se obter a série de níveis observados é necessário, portanto, a simulação de 10.000 anos de níveis previstos de origem astronômica, o que foi realizado considerando-se a data inicial de 01/01/97.

Em seguida, foram somados os valores dos resíduos obtidos pelo modelo ARMA(2,1) aos níveis previstos e assim obtida a série simulada de níveis observados.

Para proceder a verificação dos modelos de simulação, foi gerado um gráfico que apresenta a distribuição de níveis médios diários máximos anuais simulados, comparando-a com a distribuição dos níveis médios diários máximos anuais observados pertencentes à série histórica (figura III.5.7).

Níveis Máximos do Mar (Referência IBGE)

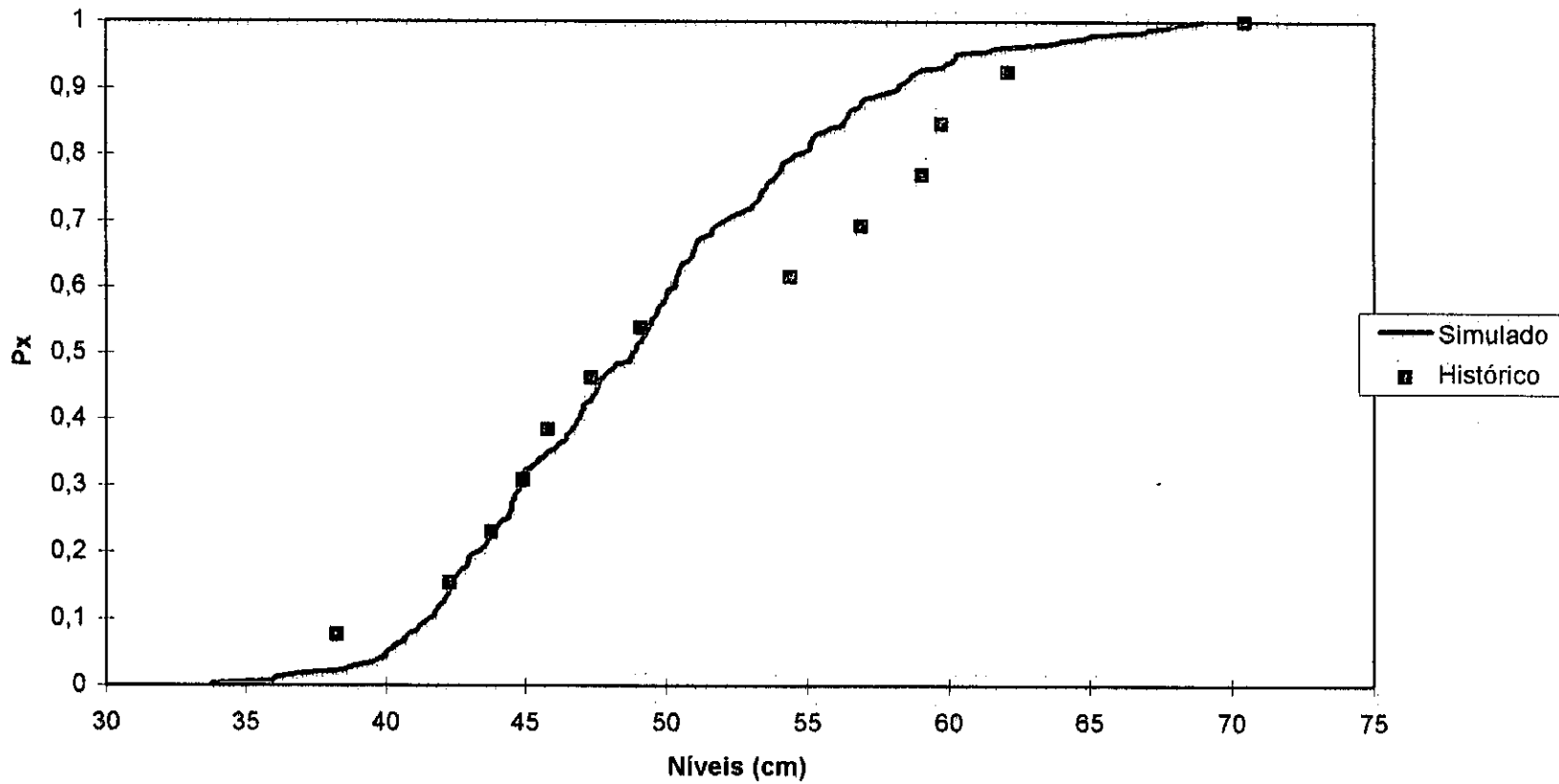


Fig.: III.5.7: Gráfico dos Máximos Níveis Médios Diários da Ilha Fiscal.

Teste Kolmogorov-Smirnov

O Teste Kolmogorov-Smirnov é um teste de ajuste de dados empíricos à uma determinada distribuição de frequência. Esse teste foi utilizado para verificar a validade do modelo proposto, testando a hipótese de que a amostra histórica e a sintética tenham sido sorteadas de uma mesma população.

Seja:

$P_x(x)$ = distribuição acumulada teórica

$S_n(x)$ = distribuição acumulada da amostra

Realiza-se o teste determinando o desvio máximo definido por $D = \max | P_x(x) - S_n(x) |$ e comparando este valor com o valor crítico tabelado. Rejeita-se a hipótese se o desvio calculado for maior que o valor crítico.

Com relação à distribuição de níveis médios diários máximos anuais, foram obtidos os seguintes valores:

$D_{\max} = 0,180$

$D_{\text{crítico}} = 0,352$ para um nível de significância de 0,10

Logo $D_{\max} < D_{\text{crítico}}$. Então aceita-se o modelo.

III.5.2 - Geração de Séries Sintéticas de Precipitação

Numa primeira etapa, foram gerados 10.000 anos de precipitações diárias, supondo-se a dependência da sua ocorrência ao valor do resíduo do nível do mar no mesmo dia, de acordo com as categorias definidas na Tabela de Contingência.

A distribuição marginal de probabilidades considerada no modelo de simulação das precipitações diárias é, para cada categoria considerada para a variável resíduo do nível do mar, uma combinação da distribuição empírica (para precipitações nulas) com a distribuição exponencial de dois parâmetros (para precipitações superiores a zero).

A tabela abaixo ilustra os valores da tabela de contingência considerados no modelo de simulação de precipitações.

Precipitação (mm)	Resíduos (cm)			Total
	<=0	0<R<=20	>20	
= 0	348	1358	1664	3370
>0	53	373	951	1377
Totais	401	1731	2615	4747

Os dados de entrada para o programa de simulação de precipitações diárias são os resíduos diários, a probabilidade de precipitação nula e a média e o desvio padrão do histórico das precipitações não nulas.

A fórmula da distribuição exponencial de dois parâmetros é:

$$x = A - B \cdot \text{Ln} [1-Fx], \text{ onde:}$$

x = precipitação diária,

A = (média - desvio padrão) das precipitações observadas,

B = desvio das precipitações observadas,

$F_x(x) = P[X \leq x]$ = distribuição acumulada .

A rotina de geração das precipitações diárias seguiu os seguintes passos:

i) Sorteia-se um número de distribuição uniforme U , no intervalo entre 0 e 1.

ii) Faz-se $F_x(x)=U$

iii) Verifica-se o valor do resíduo no dia

iv) Para cada categoria de resíduo têm-se as seguintes equações:

Se $F_x(x) \leq P(x=0)$, então $x=0$

senão $x = (\text{média} - \text{desvio}) - \text{desvio} * \text{Ln} [1-F_x]$

v) O valores das características estatísticas utilizadas na simulação são os seguintes:

Resíduos	Precipitação = 0 Probabilidade	Precipitação > 0	
		Média	Desvio Padrão
$R \leq 0\text{cm}$	0,87	9,07	17,99
$0 < R \leq 20\text{cm}$	0,78	11,83	18,22
$R > 20\text{cm}$	0,64	14,57	24,13

A partir das precipitações diárias geradas, foi elaborado o gráfico com a distribuição acumulada dos máximos anuais e comparados aos valores históricos. Este procedimento permite validar o modelo utilizado na geração, pois é avaliado um parâmetro que não fez parte das hipóteses do modelo.

A figura III.5.8 apresenta as distribuições acumuladas das precipitações da série histórica, e da série gerada a partir da dependência com os resíduos dos níveis do mar.

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi novamente utilizado para verificar a hipótese de que as amostras pertencem à mesma população, comparando os valores históricos com os simulados, a partir das distribuições acumuladas de máximos anuais. Assim tornou-se possível a validação do modelo.

A descrição do teste consta do item III.5.1. Observa-se que, também no caso da precipitação, o modelo é aceito pois o valor de D_{max} encontrado entre a distribuição acumulada dos máximos anuais da série simulada e a distribuição acumulada da série histórica é inferior ao $D_{critico}$ tabelado para um nível de significância de 0,10, conforme abaixo:

Hipótese	D_{max}	$D_{critico}$	Significância	Conclusão
Dependência	0,20	0,352	0,10	$D_{max} < D_{critico} \rightarrow$ Aceita-se o modelo

Precipitação Máxima - Ilha Fiscal

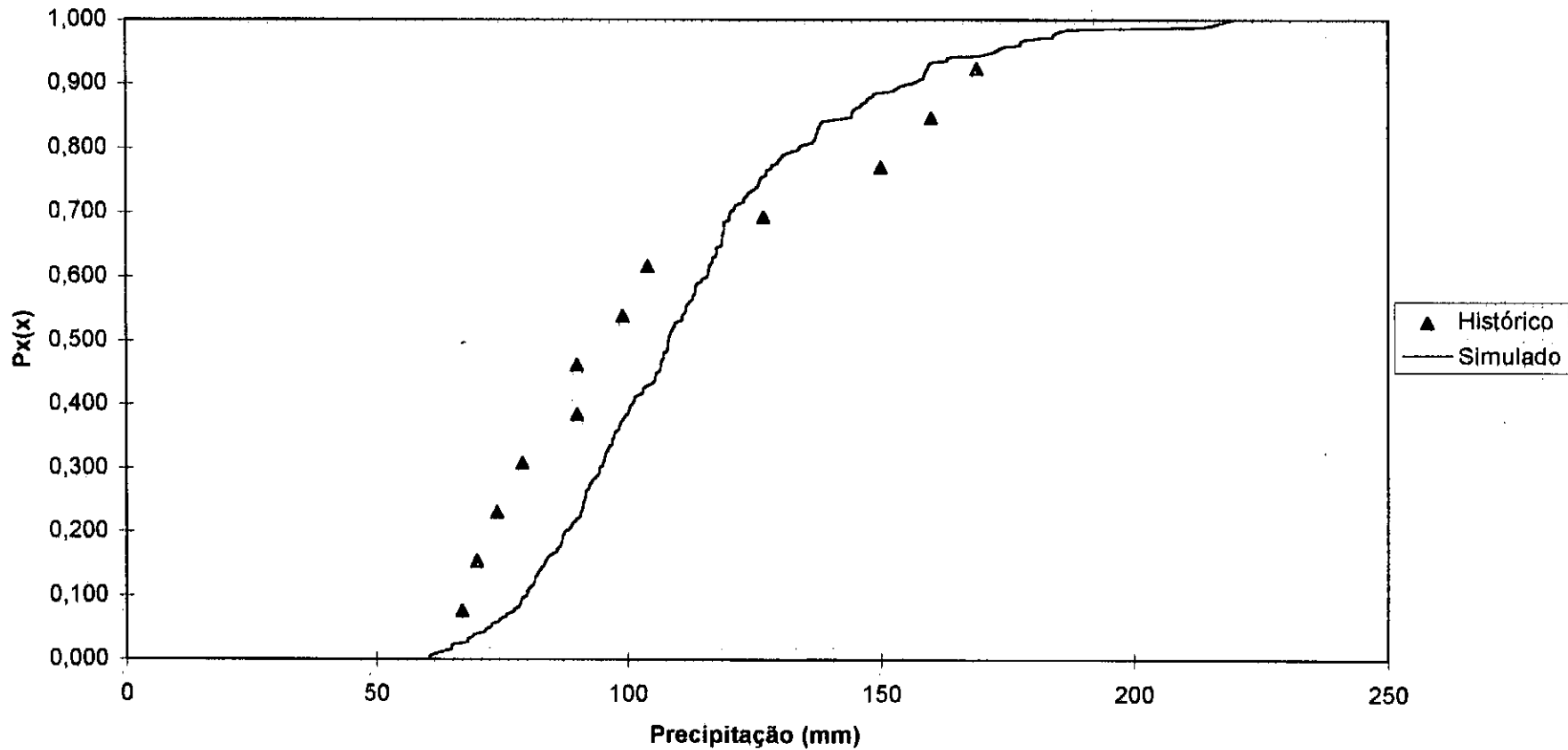


Fig.III.5.8: Distribuição acumulada de precipitação diária - máxima anual.

III.6 - Avaliação da Ocorrência Conjunta

Este item descreve a avaliação feita com relação à ocorrência conjunta de níveis do mar e precipitação em um dia qualquer, ou quando se consideram os eventos máximos anuais, sendo esta última, a hipótese de maior interesse.

O procedimento foi prático, utilizando-se os valores diários obtidos nas séries simuladas. Foram elaborados programas, em turbo pascal, que quantificaram a ocorrência de classes de valores das variáveis de forma dependente e de forma independente, a saber:

Valores Diários :

A precipitação foi dividida em classes de 20 mm enquanto os níveis foram divididos em classes de 10 cm. Foram contados o número de dias, em um total de 3.650.000 dias, em que ocorreu uma precipitação superior à classe considerada, calculando assim a sua probabilidade de ocorrência. Da mesma forma foram contados os dias em que ocorreu um nível do mar superior ao da classe considerada, calculando assim a sua probabilidade de ocorrência.

Então :

PA= probabilidade de ocorrência de uma determinada chuva

PB= probabilidade de ocorrência de um determinado nível

$P = PA * PB = 1/TR$ = Probabilidade de Ocorrência Independente

TR = Tempo de Recorrência

A ocorrência dependente dos eventos foi calculada contando-se o número de dias, dentre o total simulado, em que, de forma simultânea, se verifica a precipitação e o nível do mar acima de uma determinada classe.

Nesse caso a probabilidade de ocorrência é definida da seguinte forma:

$$P(A \text{ e } B) = P(A|B).P(B) = \text{Probabilidade de Ocorrência Dependente}$$

De posse dos resultados, foi elaborado um gráfico, apresentado na figura III.6.1, que ilustra a ocorrência dependente e independente dos valores diários.

Observa-se nessa figura que para um dia qualquer, as curvas de ocorrência dependente, para um TR especificado, contemplam valores nível x precipitação superiores às curvas de ocorrência independente. Esse resultado era esperado pois $P(A|B)$ é maior do que $P(A)$, ou seja, a probabilidade de ocorrência de precipitação dado que o nível do mar está alto é maior do que a probabilidade da ocorrência da chuva independente do nível do mar.

Por exemplo, para o nível médio diário do mar na cota 20 cm (referência IBGE), a precipitação a ser considerada na hipótese dependente para um tempo de recorrência de 100 anos ($p=0.01$), é de 40 mm, enquanto na hipótese independente, a precipitação é da ordem de 30 mm.

Máximos Anuais

Da mesma forma foram avaliadas as probabilidades de ocorrência conjunta de precipitação máxima anual e níveis máximos anuais sob as hipóteses de dependência e independência.

Foram computados os anos em que ocorreram valores superiores às classes determinadas, considerando precipitações superiores a 50 mm e níveis médios diários do mar superiores à cota de 20 cm (referência IBGE).

Os cálculos foram realizados através de programa e, a partir dos resultados, foi gerado o gráfico apresentado na figura III.6.2.

Observa-se que, as curvas da hipótese independente, neste caso, contemplam pares superiores aos da hipótese dependente. Por exemplo, considerando-se o nível médio diário do mar na cota de 30 cm (referência IBGE), e um tempo de recorrência de 100 anos ($p=0.01$), o valor da precipitação encontrado é de 150 mm para a hipótese dependente, e quando se assume a hipótese de independência o valor da precipitação é de aproximadamente 190 mm, sendo neste caso 27% superior.

Em outro exemplo, para a recorrência de 10 anos e nível médio diário do mar na cota 40 cm (referência IBGE), a precipitação passa de 70 mm na hipótese dependente para 150mm na hipótese independente, um acréscimo superior a 100% no valor da precipitação.

Esses resultados, a princípio inesperados, ocorrem devido ao fato dos eventos máximos anuais ocorrerem em épocas do ano diferentes e portanto a sazonalidade torna-se um aspecto muito importante, que usualmente não é considerado nos estudos mais comuns.

Ou seja, no caso específico de obras junto à Baía de Guanabara, pode ocorrer um superdimensionamento, quando se consideram os eventos nível do mar x precipitação máximos anuais de forma independente.

A definição de cenários envolvendo variáveis hidrológicas, que podem ser conjugadas de forma conjunta, deve ser bastante cuidadosa pois uma hipótese mal formulada pode acarretar desperdícios, levando em consideração situações que não possam existir.

Por outro lado, a partir das isolinhas de probabilidade deve-se procurar a pior situação para a região em estudo, ou seja, promover diversas simulações considerando as variáveis envolvidas, até que se encontre o par que defina o pior cenário, dentro dos critérios e segurança desejados.

Probabilidade de Ocorrência - Valores Diários
Precipitação x Nível do Mar
Estação : Ilha Fiscal

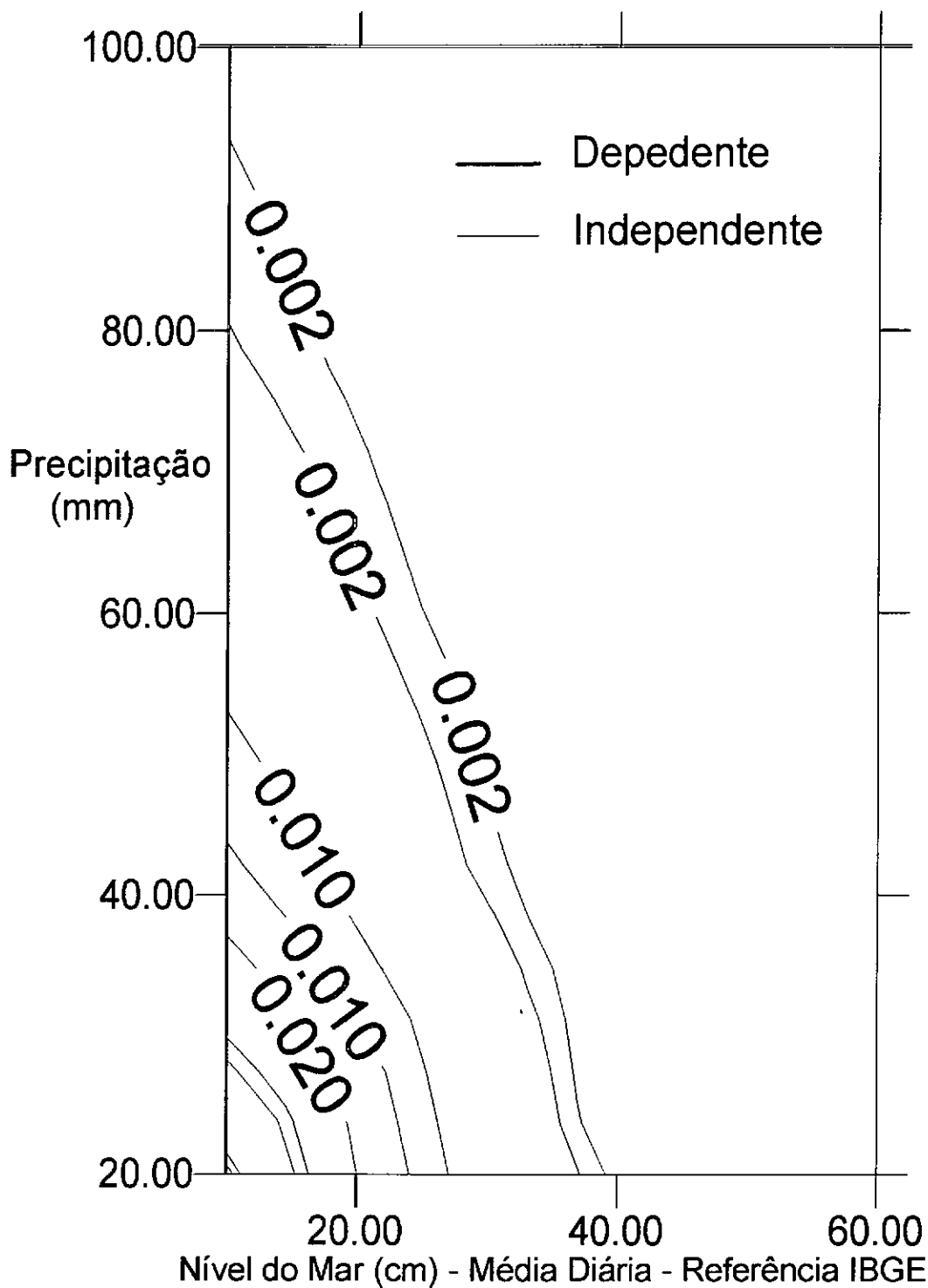


Fig. III.6.1 : Probabilidade de Ocorrência Conjunta - Valores Diários

Probabilidade de Ocorrência Precipitação x Nível do Mar Estação : Ilha Fiscal

Máximos Anuais

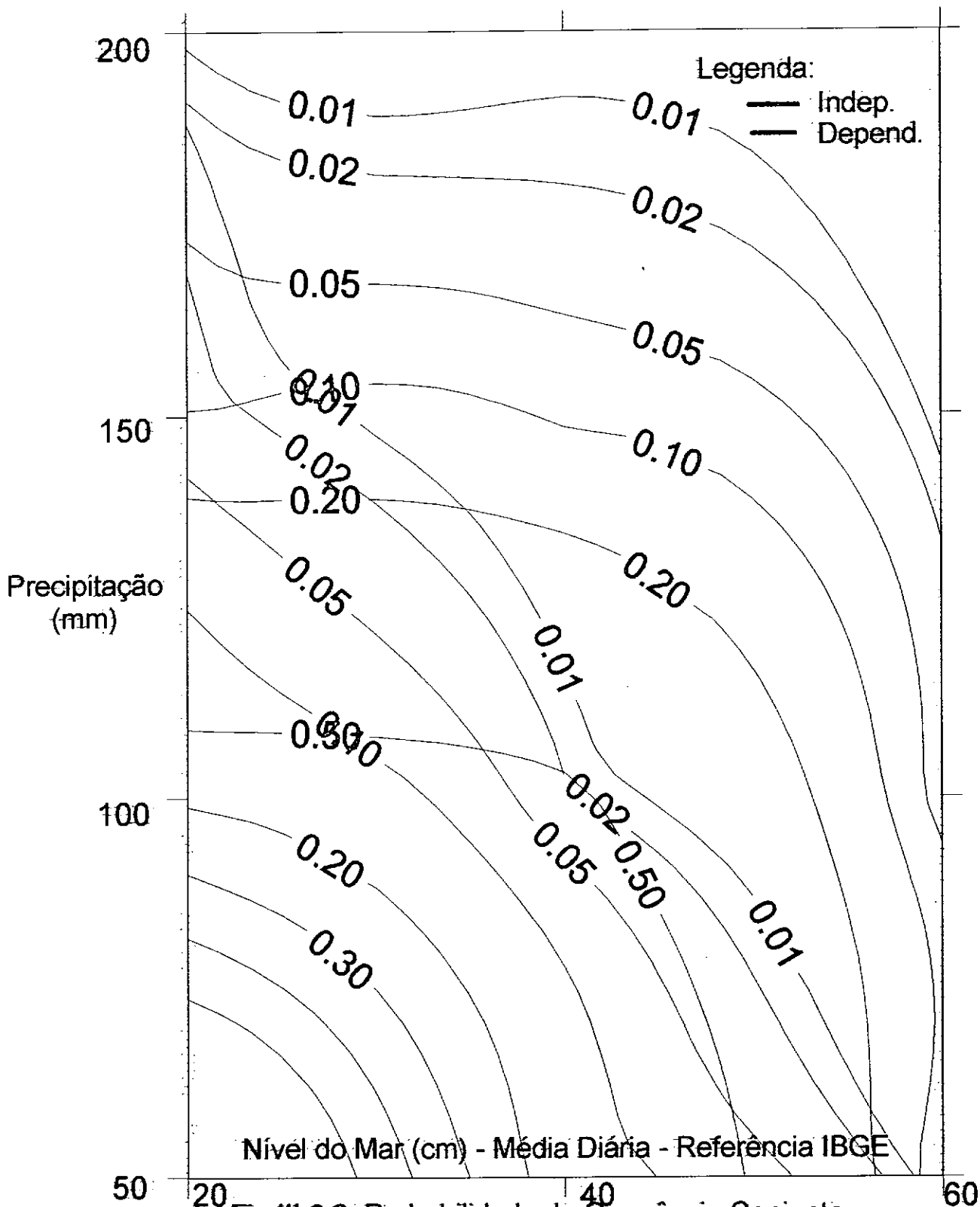


Fig.III.6.2: Probabilidade de Ocorrência Conjunta

IV - CONCLUSÕES

O objetivo principal da presente tese foi avaliar a dependência entre os processos estocásticos de precipitação diária e níveis médios diários, utilizando os dados da estação da Ilha Fiscal na Baía de Guanabara, fornecidos pelo DHN.

Foi elaborada uma modelagem conjunta, admitindo-se que os resíduos não periódicos resultantes da diferença entre níveis médios diários observados e previstos, seja um processo do tipo ARMA (2,1), e que a distribuição de probabilidades das precipitações é condicionada à esses resíduos, pois assume-se que a ocorrência dos dois fenômenos é devida aos mesmos efeitos climatológicos.

Os resultados das análises sob diferentes hipóteses de ocorrência, dependente e independente, no tocante aos máximos anuais de níveis médios diários do mar e máximos anuais de precipitação, indicam, porém, que nesse caso, a sazonalidade é um fator importante e que deve ser considerado.

Como o período de níveis médios diários máximos não coincide com o período de precipitações mais elevadas na Baía de Guanabara, os estudos indicam que ocorre a superestimação quando se considera de forma independente os eventos máximos, quando comparada com a hipótese de ocorrência dependente.

Para um mesmo tempo de recorrência, a hipótese de independência pode aumentar os valores considerados de precipitação ou nível médio diário do mar em taxas superiores a 100%, o que onera ou superdimensiona o porte de obras de engenharia.

Espera-se que esses resultados despertem o interesse na continuidade da pesquisa e sejam um alerta para a necessidade do aumento das investigações nos dados hidrológicos básicos de forma mais criteriosa, considerando diversas hipóteses na

definição de eventos extremos, quando diversas variáveis hidrológicas estão envolvidas na ordem de grandeza de obras hidráulicas.

A partir das isolinhas de probabilidade, podem ser simulados diversos cenários, escolhendo-se a pior situação para dar prosseguimento ao projeto, de acordo com os critérios e segurança desejados.

Ressalta-se de outra forma que, considerando a dependência dos eventos extremos, para o mesmo tempo de recorrência, encontram-se pares de valores precipitação e nível médio diário do mar menores, que poderão nortear o dimensionamento hidráulico das obras, com menores custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, T, 1983. Environmental Oceanography - An Introduction to the Behavior of Coastal Waters. Pergamon Press.
- BOX & JENKINS, 1976. Time Series Analysis - Forecasting and Control. Holen-Day.
- CHATFIELD, C, 1975. The Analysis of Time Series: Theory and Practice. Chapman and Hall - London
- COX & MILLER, 1972. The Theory of Stochastic Processes. Imperial College, London. Chapman and Hall Ltd.
- DEFANT, Albert, 1958. Ebb and Flow - The Tides of Earth, Air and Water. Ann Arbor. The University of Michigan Press.
- FRANCO, A.S., 1964. Livro Texto de Marés. Curso de Hidrografia para Oficiais.DHN.
- GHIRARDI, Ângela O.,1996. Estimação dos Parâmetros do Modelo ARMA(1,1) com Preservação do Comprimento Médio de Estiagem. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- HAAN, Charles T., 1977. Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State Press/ Ames.
- KELMAN, Jerson, 1987. Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Volume 1, Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos, Capítulo 4. Nobel / ABRH.

MORETTIN & TOLOI, 1987. Previsão de Séries Temporais. Atual Editora.

NASCIMENTO & KELMAN, 1995. Um modelo para Geração estocástica de Chuvas Diárias em Caderno de Recursos Hídricos, v.13, nº2, RBE.

NEVES FILHO, S.C., 1992. Variação da Maré Meteorológica no Litoral Sudeste do Brasil, 1965-1986. Tese de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.

NIMER, Edmon, 1989. Climatologia do Brasil. IBGE.

PEREIRA, Basílio B,1984. Séries Temporais Multivariadas.6º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística.

SALAS & DELLEM & YEVJEVICH, & LANE, 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications.

SERLA,1990. Avaliação de Níveis de Maré nas Áreas de Projeto dos Rios Meriti/Iguaçu e Estrela. Projeto de Macro e Mesodrenagem, Hydroconsult, RJ.

SILVA, G.N., 1992. Variação de Longo Período do Nível Médio do Mar: Causas, Consequências e Metodologia de Análise. Tese de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.

TUBELIS & NASCIMENTO, 1988. Meteorologia Descritiva - Fundamentos e Aplicações Brasileiras. Nobel. YEVJEVICH, Vujica, 1972. Probability and Statistics in Hydrology. Water resources Publications. Fort Collins, Colorado.

TUCCI, C.E.M., 1993. Impacto da Urbanização nas Cheias Urbanas e na Produção de Sedimentos; Bacia do Arroio Dilúvio. FAPERGS.

YEVJEVICH, Vujica, 1972. Stochastic Processes in Hydrology. Water resources Publications. Fort Collins, Colorado.