

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

PROCESSOS DE ALTERAÇÕES DA MARÉ ASTRONÔMICA NA
DESEMBOCADURA DA LAGOA DOS PATOS

CRISTINA RAMALHO RIBEIRO

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Dr. Osmar Olinto Möller Jr.

Rio Grande, março de 2008.

**PROCESSOS DE ALTERAÇÕES DA MARÉ ASTRONÔMICA NA
DESEMBOCADURA DA LAGOA DOS PATOS**

CRISTINA RAMALHO RIBEIRO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

tendo sido aprovada em sua forma final pela Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães
Coordenador da Comissão de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Osmar Pinto Möller Jr.
Orientador - FURG

Prof. Elói Melo Filho, Ph.D.
UFSC

Prof. Dr^a. Elisa Helena Leão Fernandes
FURG

Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura
FURG

*Às pessoas mais importantes da minha vida:
meus pais e meus irmãos. Pai saudade eterna*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Osmar Möller pelo seu profissionalismo, pela competência, pelo incentivo, amizade e paciência. A paixão que tens tem pela pesquisa é contagiante e mostraste que a relação orientada-orientador vai muito além da obtenção de metas e de trocas de conhecimentos técnicos, é amadurecimento pessoal e profissional. Foste mais do que um orientador pra mim e eu não tenho palavras pra agradecer todo o apoio que recebi no momento que mais precisei. Muito obrigada.

À Angela Maestrini que me mostrou os primeiros caminhos da pesquisa científica e fez com que eu me apaixonasse por essa área. Muito obrigada pelo incentivo, apoio, amizade e por todo carinho que sempre demonstraste.

A Prof^ª. Elisa Fernandes por gentilmente ter cedido o uso do modelo TELEMAC. Ao Wilian Marques pelo auxílio e paciência na simulação do modelo. Obrigada.

À Nilza, secretaria da ComCur da Engenharia Oceânica e a todos os amigos e colegas, que de alguma maneira sempre me ajudaram.

Aos meus pais, Zilmar e Irani, aos meus irmãos, Daniel e Carolina e a minha cunhada, Aline, que são minha vida, meu norte, minha essência, minha inspiração, meu porto seguro, minha felicidade, meu orgulho, minha paz, meu tudo. Vocês são responsáveis pelos meus sentimentos mais nobres. A vocês minha eterna gratidão. Amo muito vocês.

Pai, foste um exemplo de ser humano. Sinto muito orgulho de ser tua filha. Sinto falta do teu abraço, tua risada, dos teus sábios conselhos, mas basta eu fechar olhos para que eu possa sentir tudo isto novamente. Foste uma pessoa que deu muito mais que recebeu nesta vida e, isto te fez uma pessoa incrivelmente linda por dentro. Foste mais que um pai para mim, foste meu amigo, meu companheiro, meu parâmetro. Eu sempre te amei e sempre te amarei muito. Muito obrigada por tudo. Saudade eterna.

Às minhas amigas Maria Mello, Susana Oliveira, e Débora Machado que através da convivência diária, nasceu uma grande e bela amizade, vocês foram uma ótima surpresa! Obrigada pela compreensão, pelo incentivo, pelo ombro amigo, pelos conselhos e por todo carinho.

A CAPES pela bolsa concedida.

RESUMO

Diversos estudos têm sido realizados sobre a circulação estuarina da Lagoa dos Patos. Devido a menor importância das marés, a maioria dos trabalhos têm se concentrado nos efeitos que o vento e a descarga fluvial exercem sobre a hidrodinâmica da lagoa e, embora o efeito da maré seja secundário na circulação estuarina, existe uma complexa interação entre as marés, a descarga fluvial e os ventos. A Lagoa dos Patos está localizada na planície costeira do Estado do Rio Grande do Sul, entre as latitudes de 30° S e 32° S. Este estudo está baseado na análise estatística dos dados, principalmente de séries temporais de nível das águas registradas na desembocadura da Lagoa dos Patos e na aplicação de técnicas de modelagem numérica. Para se verificar os efeitos do vento e da descarga fluvial na variabilidade das constantes harmônicas da região, são usados como referência, séries de velocidade e direção do vento e dados de descarga fluvial dos principais afluentes da Lagoa dos Patos. Os componentes harmônicos caracterizam a maré de um determinado local e, por isso, é necessário o estudo dos constituintes a fim de analisar as oscilações existentes. A previsão das séries está diretamente relacionada a esta variabilidade e, devido a este motivo, são testadas diferentes séries para se obter uma previsão mais eficaz. O modelo TELEMAC é utilizado para simular os componentes harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 . As análises mostraram que os ventos e a descarga fluvial, influenciam nas variações que ocorrem nas amplitudes dos componentes harmônicos estudados (O_1 , K_1 , M_2 e S_2).

Palavras-chave: constantes harmônicas, maré, vento, descarga fluvial, elevação do nível.

ABSTRACT

Several studies have been conducted on the movement of estuarine of Patos Lagoon. Due to the minor importance of the tides, most of the previous studies carried out in the area focused on the effect of wind and river discharge carry on the hydrodynamics of the lagoon, and although the effect of the tide is secondary in estuarine hydrodynamics, there is a complex interaction between the tides, river discharge and the winds. The Patos Lagoon is located in the coastal plain of the State of the Rio Grande do Sul, between latitudes 30° S and 32° S. This study is based on analysis of data, particularly of time series of water levels recorded in the entrance of Patos Lagoon and the analysis of the results of a numerical model adapted to the conditions of the lagoon. To ascertain the effects of wind and river discharge in the variability of harmonics in the region, are used as reference, data sets of speed and direction of wind and river discharge data of the main tributaries of Patos Lagoon. The harmonic components characterize the tide of a particular place and therefore it is necessary to study their constituents to analyze existing fluctuations. The forecast of the series is directly related to this variability, and because of this reason, are tested different series for a more effective forecasting. Model TELEMAC is used to simulate the behavior of the harmonic components O_1 , K_1 , M_2 and S_2 under different wind and river discharge regimes. The analyses had shown that to the winds and the river discharge, influence in the variations that occur in the amplitude of the studied harmonic components (O_1 , K_1 , M_2 e S_2).

Keywords: harmonic constants, tidal, wind, river discharge, level.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE FIGURAS	14
1. INTRODUÇÃO.	16
2. OBJETIVOS.....	22
3. ÁREA DE ESTUDO.....	23
4. METODOLOGIA	26
4.1 INTRODUÇÃO.	26
4.2 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS.....	28
4.2.1 Séries de Elevação do Nível.....	28
4.2.2 Séries da Descarga Fluvial	29
4.2.3 Séries de Vento.....	29
4.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DAS SÉRIES.	30
4.3.1 Análise dos Componentes Principais.	30
4.3.2 Regressão Linear Múltipla.	33
4.4 SOFTWARE PACMARÉ.	36
4.5 MODELO NUMÉRICO - TELEMAR.	42
5. RESULTADOS.....	45
5.1 SÉRIES TEMPORAIS DO NÍVEL MÉDIO, DE VENTOS E DA DESCARGA FLUVIAL.....	45
5.1.1 Descrição das Séries.....	45
5.1.2 Análise dos Componentes Principais das Séries de Nível Médio, dos Ventos e da Descarga Fluvial.....	48
5.2 CONSTITUINTES HARMÔNICOS.....	51
5.2.1 Constituintes Harmônicos Anuais.....	51
5.2.2 Análise dos Componentes Principais dos Constituintes Harmônicos Mensais.....	52
5.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES HARMÔNICOS MENSIS, DO NÍVEL MÉDIO E DA DESCARGA FLUVIAL.....	54

5.4 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA ENTRE OS CONSTITUINTES HARMÔNICOS MENSIS E AS SÉRIES DE DESCARGA FLUVIAL, NÍVEL MÉDIO E VENTOS.	66
5.4.1 Regressão Linear Múltipla dos Principais Harmônicos Diurnos e Semidiurnos.	66
5.5 ANÁLISE DAS PREVISÕES DAS SÉRIES DE NÍVEL MÉDIO.....	76
5.5.1 Análise Espectral Cruzada entre as Séries de Nível Médio e as Previsões.....	78
5.6. SIMULAÇÃO DOS HARMÔNICOS.	80
5.6.1 Variação do Nível Médio para os Componentes Diurnos O_1 e K_1	82
5.6.1.1 Variação do Nível Médio (30 cm).....	82
5.6.1.2 Variação do Nível Médio (60 cm).....	83
5.6.1.3 Variação do Nível Médio (110 cm).....	84
5.6.2 Variação da Descarga Fluvial para os Componentes Diurnos O_1 e K_1	85
5.6.3 Simulação dos Componentes Semidiurnos M_2 e S_2	86
5.6.4 Influência do Efeito da Força de Coriolis.	87
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	89
7. CONCLUSÕES.....	92
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE ABREVIATURAS

Abr	Abril
ACP	Análise dos Componentes Principais
Ago	Agosto
Ampl	Amplitude
ANA	Agência Nacional de Águas
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos
Dez	Dezembro
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
ESRL	Earth System Research Laboratory
Fev	Fevereiro
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese verdadeira
Jan	Janeiro
Jul	Julho
Jun	Junho
K_1	Componente lunar-solar
K_2	Componente lunar-solar
M	Número de elementos
M_2	Componente lunar principal
M_3	Componente ter-diurna lunar
M_4	Componente de água rasa quarto-diurna
Mai	Mai
Mar	Março
Mf	Componente lunar quinzenal
Mm	Componente lunar mensal
MN_4	Componente de água rasa quarto-diurna
MS_4	Componente de água rasa quarto-diurna
Msm	Componente solar mensal

N_2	Componente elíptica lunar
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
Nov	Novembro
O	Oeste
O_1	Componente lunar principal
Out	Outubro
P_1	Componente solar principal
PACMARÉ	Previsão e Análise Harmônica de Marés e Correntes de Maré
Q_1	Componente elíptica lunar
S	Sul
S_2	Componente solar principal
Sa	Componente solar anual
Set	Setembro
SQE	Soma dos Quadrados dos Erros
SQR	Soma dos Quadrados explicados pelo modelo ajustado
SQT	Soma dos Quadrados não explicados pelo modelo ajustado
Ssa	Componente solar semi-anual
T	Período
T_t	Comprimento da série
a	Amplitude do constituinte
c	Celeridade da onda
c.p.d	Componentes de longo período
cm	Centímetros
cos	Cosseno
e	Erro quadrático
g	Aceleração da gravidade
h	Profundidade da onda
km	Quilômetros
km^2	Quilômetros quadrados
m	Metros

m^3/s	Metros cúbicos por segundo
mm	Milímetros
n	Número do elemento da série
p	Número de graus de liberdade
rad/h	Radiano por hora
sen	Seno
t	Tempo
tan	Tangente
u	Componente da velocidade na direção x
v	Componente da velocidade na direção y
x, y, z	Coordenadas cartesianas

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ_q	Defasagem
γ_{ij}	Peso da variável j na componente principal i
γ_1	Autovetor
β_0	Ordenada de origem
β_i	Coefficientes de regressão
Y	Variáveis populacionais independentes
ε_j	Erros ou resíduos do modelo
y_j	Valor observado
\hat{y}_j	Valor previsto
λ	Multiplicador de Lagrange
ξ	Variância
$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$	Componentes principais
A_q, B_q, C_q	Amplitude dos harmônicos
I	Matriz identidade
D	Matriz envolvendo termos de senos e cossenos
M	Número de elementos
G°	Fuso horário em relação ao uso horário
GW°	Fuso horário em relação ao meridiano de Greenwich
T_t	Comprimento da série
X_1, X_2, \dots, X_n	Variáveis populacionais dependentes
f_k, f_j, f_q	Frequência dos harmônicos
n	Número do elemento da série
\bar{x}	Valor médio da série
x_r	Porção residual da série
y	Vetor
z	Matriz coluna contendo os coeficientes A_q e B_q

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Principais harmônicos atuantes na Estação da Praticagem em 1984.....	19
Tabela 5.1 - Matriz de correlações dos ventos Longitudinal e transversal, vazão e nível médio.	48
Tabela 5.2 - Matriz fatorial das cargas não-rotacionadas das séries de 1984, 1989, 1991 e 1992.....	49
Tabela 5.3 - Matriz rotacionada cargas rotacionadas das séries de 1984, 1989, 1991 e 1992.	50
Tabela 5.4 - Amplitude dos principais constituintes harmônicos anuais obtidos no estuário da Lagoa dos Patos.....	51
Tabela 5.5 - Matriz de análise fatorial rotacionada da análise de componentes principais dos componentes harmônicos.	53
Tabela 5.6 - Análise estatística dos harmônicos estudados (O_1 , K_1 , M_2 e S_2), do nível médio e da descarga fluvial.....	56
Tabela 5.7 - Correlações existentes entre os harmônicos e o nível médio, a descarga fluvial e ventos para o ano de 1984.....	62
Tabela 5.8 - Medidas de tendência central existentes entre os harmônicos e o nível médio, a descarga fluvial e ventos para o ano de 1984.....	62
Tabela 5.9 - Períodos utilizados para examinar a interferência da descarga fluvial sobre os componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2	63
Tabela 5.10 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico O_1	73
Tabela 5.11 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico K_1	74
Tabela 5.12 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico M_2	75
Tabela 5.13 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico S_2	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Características de uma onda com caráter progressivo.....	16
Figura 1.2 - Apresentação de uma onda com caráter estacionário.....	17
Figura 1.3 - Características de uma onda com caráter progressivo e estacionário.....	18
Figura 3.1 - Lagoa dos Patos e seu estuário no detalhe.....	23
Figura 4.1 - Localização dos pontos onde foram realizadas as simulações para a determinação dos harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 . (a) Região costeira. (b) Interior do estuário.	27
Figura 4.2 - Localização da Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande (Praticagem).	28
Figura 5.1 - Nível médio, descarga fluvial e intensidade e direção do vento das séries de 1984 e 1989.....	46
Figura 5.2 - Nível médio, descarga fluvial e intensidade e direção do vento das séries de 1991 e 1992.....	47
Figura 5.3 - Histogramas e médias móveis dos componentes harmônicos do nível médio e da descarga fluvial	54
Figura 5.4 - Histogramas e médias móveis dos componentes harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2	55
Figura 5.5 - Desvio médio obtido para a elevação do nível, para a descarga fluvial e para os ventos longitudinais e transversais durante o período de 1984.....	57
Figura 5.6 - Desvio médio obtido para os componentes harmônicos estudados durante o período de 1984.....	58
Figura 5.7 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da O_1 , da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.	59
Figura 5.8 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da K_1 , da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.	60
Figura 5.9 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da M_2 e S_2 , da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.	61
Figura 5.10 - Médias móveis da descarga fluvial e do nível médio dos anos de 1984, 1991 e 1992.....	64
Figura 5.11 - Diagramas de dispersão obtidos através da análise das séries estudadas.	65
Figura 5.12 - Anomalias da descarga fluvial, do nível médio e do vento longitudinal e transversal dos anos de 1984, 1989, 1991 e 1992.	67

Figura 5.13 (a) - Anomalias de amplitude dos componentes diurnos e semidiurnos (O_1 e K_1).	67
Figura 5.13 (b) - Anomalias de amplitude dos componentes diurnos e semidiurnos (M_2 e S_2).	68
Figura 5.14 - Diagramas de dispersão das anomalias das amplitudes dos componentes O_1 , e K_1 , da vazão e do nível médio.	69
Figura 5.15 - Diagramas de dispersão das anomalias das amplitudes da M_2 , e S_2 , da vazão e do nível médio.	70
Figura 5.16 - Séries dos anos de 1984 e 1989 e suas respectivas previsões.	77
Figura 5.17 - Séries dos anos de 1991 e 1992 e suas respectivas previsões.	78
Figura 5.18 - Análise espectral cruzada entre as séries de nível médio e as previsões das séries.	79
Figura 5.19 - Análise de coerência entre as séries de nível médio e as previsões das séries... ..	80
Figura 5.20 - Localização dos pontos em que foram realizadas as simulações.	81
Figura 5.21 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 30 cm.	82
Figura 5.22 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 60 cm.	83
Figura 5.23 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 110 cm.	84
Figura 5.24 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9. (a) Descarga fluvial de 1.000 m ³ /s. (b) Descarga fluvial de 5.000 m ³ /s.	85
Figura 5.25 - Amplitudes dos componentes semidiurnos M_2 e S_2 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 60 cm.	86
Figura 5.26 - Estudo dos componentes semidiurnos sem a presença do efeito de Coriolis.....	87

1. INTRODUÇÃO.

A maré é um elemento decisivo nos processos de circulação e mistura em zonas costeiras e estuarinas. Como estabelecem Cameron e Pritchard (1963), dependendo das relações ou interações com a descarga fluvial, o efeito da maré, ou do prisma de maré, vai ser traduzido pelo maior ou menor grau de estratificação halina e pela distância atingida pela propagação de água de maior salinidade para o interior deste estuário. A turbulência gerada pela ação das correntes contra as bordas do estuário tem um papel importante neste processo que influencia, também, a distribuição espacial e temporal de substâncias em suspensão e dissolvida. Assim, a maré acaba sendo um fator de impacto em todos os compartimentos sistêmicos que compõem um ambiente estuarino.

Assim como a onda de maré afeta a circulação de um estuário, ela acaba sendo modificada pela morfologia deste e isto se reflete na modificação do comportamento, em assimetrias e na amplificação ou atenuação da amplitude da onda de maré que entra em um estuário. De acordo com Dyer (1979) a maré em um estuário pode apresentar um caráter progressivo ou estacionário. No primeiro caso (Figura 1.1), a elevação e a velocidade de corrente apresentam uma defasagem de 90° tendo-se correntes com velocidades nulas nos máximos/mínimos de elevação. A salinidade está em fase com a velocidade.

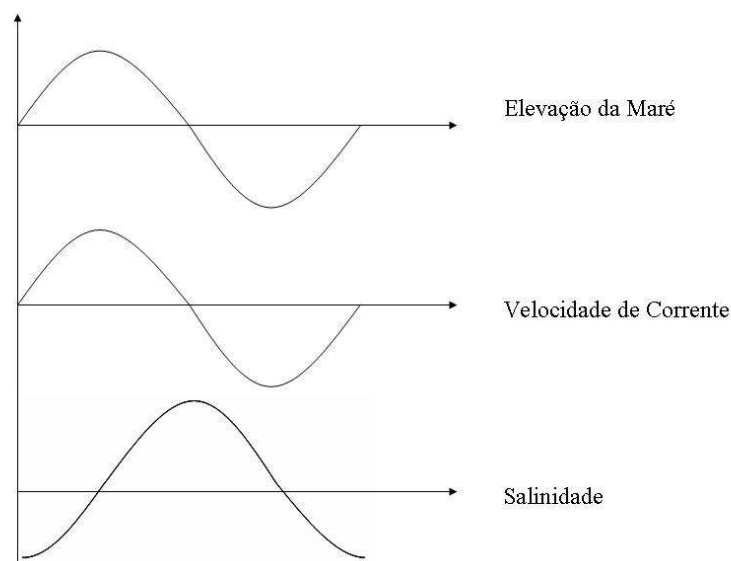


Figura 1.1 - Características de uma onda com caráter progressivo. (Fonte: Miranda et al., 2002).

Por outro lado, se o estuário tiver um período natural de oscilação próximo ao dos componentes principais da maré, acaba ocorrendo uma ressonância e a formação de uma onda estacionária descrita na Figura 1.2.

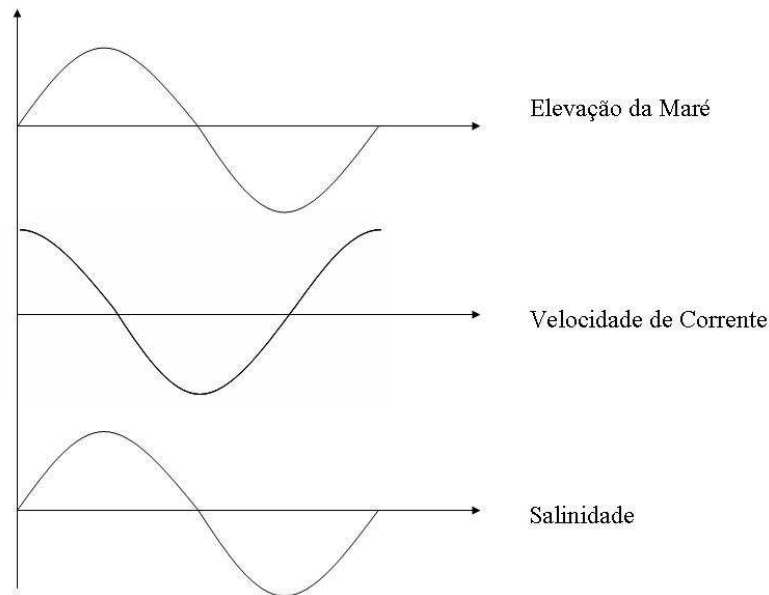


Figura 1.2 - Apresentação de uma onda com caráter estacionário. (Fonte: Miranda et al., 2002).

As condições para isso são:

$$T_n = 4 * l / \sqrt{gh} \quad (1.1)$$

Onde, T_n é o período, l é considerado o comprimento, g é aceleração da gravidade (m^2/s) e h é a profundidade.

Os estuários não têm uma geometria uniforme, tornando-se, em geral, rasos e estreitos. Sendo assim, a amplitude da onda de maré tende a aumentar estuário acima, mas simultaneamente, poderá ocorrer um decréscimo efetivo de amplitude como resultado da dissipação de energia pelo atrito (Miranda et al., 2002). Como a cabeceira não se comporta uma extremidade fechada, e também há dissipação de energia da onda refletida, a onda de maré no interior da maioria dos estuários é uma composição de ondas progressivas e estacionárias (Figura 1.3).

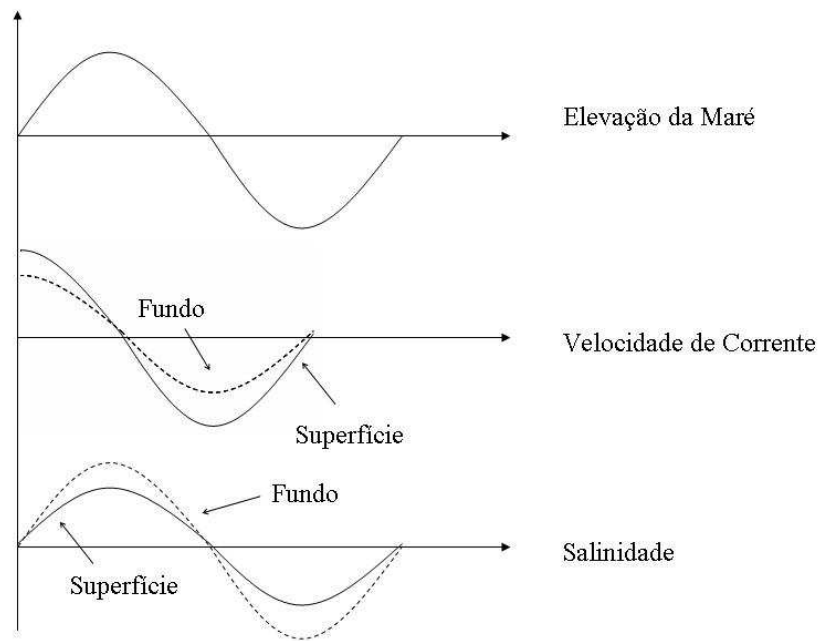


Figura 1.3 - Características de uma onda com caráter progressivo e estacionário. (Fonte: Miranda et al., 2002).

A morfologia também induz alterações na forma da onda de maré causando diferenças nas amplitudes das ondas de enchente (Preamares, PM) e vazante (Baixamares, BM). Por exemplo, no estuário da Gironde as PM duram menos do que as BM, mas apresentam maiores velocidades de correntes (Castaing, 1981). Isto afeta a distribuição de sedimentos de fundo fazendo com que um estuário assim seja importador de sedimentos mais grosseiros (Antiqueira e Calliari, 2005). Nos casos mais críticos, esta deformação da onda de maré leva à formação de pororocas (*tidal bore*) fenômeno observado em regiões de macromaré como no rio Amazonas, a baía de São Marcos no Maranhão, o estuário da Gironde e o rio Tamisa na Inglaterra. Estas deformações, que começam na plataforma induzem à formação das chamadas componentes de águas rasas (*overtides*).

Nichols e Allen (1981) verificaram que, dependendo das relações entre a convergência da morfologia de um estuário e a fricção, este pode ser classificado em sincrônico, hipersincrônico e hiposincrônico. No primeiro caso a convergência do canal e a fricção tem efeitos similares e a onda não sofre alteração à medida que entra no estuário. No segundo caso, a convergência do canal é mais importante do que a atenuação verificada pelo efeito de fricção e a onda de maré tem sua amplitude aumentada à medida que se propaga para o interior do estuário. Este é o caso dos estuários de Gironde (Castaing, 1981). Em lagoas

costeiras estranguladas, o efeito de fricção é maior do que o da convergência do canal e, assim, a onda de maré é atenuada no interior deste. Esta situação foi observada para Guarapina (Kjerfve e Knoppers, 1991), Laguna Madre (Smith, 1988), Lagoa dos Patos (Möller, 1996, Fernandes et al., 2004; Möller et al., 2007). O canal de entrada funciona como um filtro seletivo para as componentes de maré, removendo, normalmente as componentes de mais baixo período.

Na análise dos constituintes tudo é relativo e torna-se necessário considerar todos os fatores que interagem e influenciam no comportamento das constantes harmônicas. Alguns trabalhos mostram a reação sofrida pelos harmônicos ao longo do estuário (Fernandes et al., 2004; Möller et al., 2007). Como a hidrodinâmica lagunar é regida pela descarga fluvial e pela ação dos ventos, propõe-se estudar como estas variáveis físicas influenciam as constantes harmônicas e como isto afeta a previsão. Durante altas descargas de água doce e fortes ventos NE, o sistema inteiro torna-se de água doce por prolongados períodos, enquanto ventos SE, durante períodos secos, causam prolongadas residências de água salgada (Möller et al., 1996).

O estuário da Lagoa dos Patos a maré é considerada mista, com predominância diurna. Na Tabela 1.1 são indicadas algumas das principais constituintes das forças atuantes no estuário da Lagoa dos Patos, divididas em grupos de acordo com o seu período e indicando um valor típico da sua amplitude.

Tabela 1.1 - Principais harmônicos atuantes na Estação da Praticagem em 1984. (Fonte: Fernandes et al., 2004).

<i>Constituinte</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Amplitude (cm)</i>	<i>Fase (°)</i>
Lunar Principal	O ₁	11,54	326
Solar Principal	P ₁	1,32	330
Lunar-Solar	K ₁	4,32	310
Elíptica Lunar	N ₂	4,46	242
Lunar Principal	M ₂	2,53	303
Solar Principal	S ₂	4,04	69
Lunar-Solar	K ₂	1,73	208
Ter-diurna lunar	M ₃	1,23	98

Tabela 4.1 (continuação) - Principais harmônicos atuantes na Estação da Praticagem em 1984.

Fonte: Fernandes et al., 2004.

<i>Constituinte</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Amplitude (cm)</i>	<i>Fase (°)</i>
Componente de água rasa quarto-diurna	M ₄	5,18	254
Componente de água rasa quarto-diurna	MN ₄	2,93	200
Componente de água rasa quarto-diurna	MS ₄	1,92	285
Solar Anual	Sa	11,10	347
Solar Semi-Anual	Ssa	7,45	289
Solar Mensal	Msm	2,99	289
Lunar Mensal	Mm	2,99	100
Lunar Quinzenal	Mf	2,69	166

O vento possui grande influência na morfologia da Lagoa dos Patos, sua orientação longitudinal (Nordeste-Sudoeste) é decorrente da direção predominante dos ventos na região (Castelão e Möller, 2003). A circulação dirigida pelo vento provoca efeitos locais e não locais, produzindo oscilações de elevação ou rebaixamento na costa, devido ao transporte de Ekman, e ao longo da Lagoa dos Patos (Möller, 2001). Ventos Nordeste provocam um gradiente de elevação da superfície e, geram um gradiente de pressão barotrópico, responsável por bombear água em direção ao oceano. (Möller et al., 2001; Castelão e Möller, 2003). Segundo os mesmo autores o vento Sudoeste causa um empilhamento de água em Itapoã e uma depressão na região da Feitoria e, mais uma vez, tem-se um gradiente de elevação da superfície na costa dirigido para o interior da laguna ocasionando fluxos de enchente. Em escala sinótica, de 3 a 15 dias (Möller et al., 2001) a ação principal do vento é fazer variar o nível médio onde a maré irá oscilar. Porém com sentido oposto ao caso anterior.

Analisando os efeitos de ordem linear e não-linear, o estuário da Lagoa é regido pela maré de frequência diurna, seguido pelas semidiurnas e quarto-diurnas. Os processos de submaré são mais energéticos que os semidiurnos e quarto-diurnos e suas frequências variam entre 3 e 23 dias (Fernandes et al., 2004). Estes autores verificaram no trabalho que o sinal

das componentes diurnas se comporta de maneira distinta no verão e no inverno, sendo que no verão os picos de energia são mais intensos, contudo não existem diferenças significativas na banda semidiurna.

Considerando a diferença entre os sinais dos harmônicos obtidos no verão e no inverno, pode ser mencionado que o período de oscilação da Lagoa dos Patos é de 24 h, que é o mesmo da força dominante da maré e da brisa (Möller, 1996). Motta (1969) observou que a influência da maré é restrita à área estuarina, situada entre a desembocadura e a Ponta da Feitoria. Möller et al. (1996) aplicou o modelo numérico Wang e Connor (1975) para analisar a propagação da maré diurna no interior do estuário, constatando que 70% da amplitude do harmônico diurno O_1 é dissipada. Fernandes et al. (2004) estudou a atenuação da maré no canal de acesso ao estuário usando um modelo de elementos finitos 2D, com o objetivo de propor uma alternativa para o estudo da atenuação da maré e da submaré, visto que a disponibilidade de estações de medição é limitada.

Segundo Möller et al. (2007), seiches produzidos pela combinação das marés e pelos efeitos da brisa no interior da lagoa ficam com uma amplitude maior que geradas separadamente, entretanto, esta é uma provável indicação que este processo possa interferir no comportamento da maré, provocando diferenças das constantes harmônicas. Este autor mostrou que a deformação da curva da maré possa ser devido à interferência entre os seiches oriundos do interior da lagoa e a própria maré, mostrando que a variabilidade ocorrida na amplitude da K_1 talvez seja oriunda desta combinação. Todavia a oscilação observada na O_1 é dividida entre os efeitos do vento e a da descarga fluvial, descrita por Möller et al., 2001. Estes fatores também podem exercer influência na amplitude das marés, reconhecidos por Wong e Throwbridge (1990) e Parker (1991).

2. OBJETIVOS.

O objetivo deste trabalho é analisar as principais razões pelas quais as constantes harmônicas da maré variam ao longo de tempo e verificar os efeitos destas variações na previsão harmônica feita para o estuário da Lagoa dos Patos. De forma específica pretende-se avaliar:

- a) O comportamento das componentes diurnas (O_1 e K_1) e semidiurnas (M_2 e S_2) na região de estudo.
- b) O efeito que a descarga fluvial e a ação dos ventos exercem sobre o comportamento dos componentes harmônicos estudados (O_1 , K_1 , M_2 e S_2).

3. ÁREA DE ESTUDO.

A Lagoa dos Patos (Figura 2.1) representa um dos mais importantes recursos hídricos para o estado do Rio Grande do Sul e está localizada na planície costeira entre as latitudes de 30° S e 32° S. Ela possui forma alongada na direção NE-SO, comprimento de 250 km, largura média de 40 km e área de 10.360 km² (Möller et al., 1996), separando-se do oceano por uma estreita restinga de 240 km de comprimento. Seu estuário é considerado do tipo estrangulado, caracterizado por uma micromaré de 0,47 m. O estuário é a área compreendida entre a desembocadura e a Ponta da Feitoria. A região estuarina compreende cerca de 10% de sua área total (971 km²). A única comunicação entre a região estuarina e o mar, dá-se através de um estreito canal delimitado pelos molhes da Barra de Rio Grande, e possui 20 km de comprimento, 1 a 2 km de largura e 15 m de profundidade.

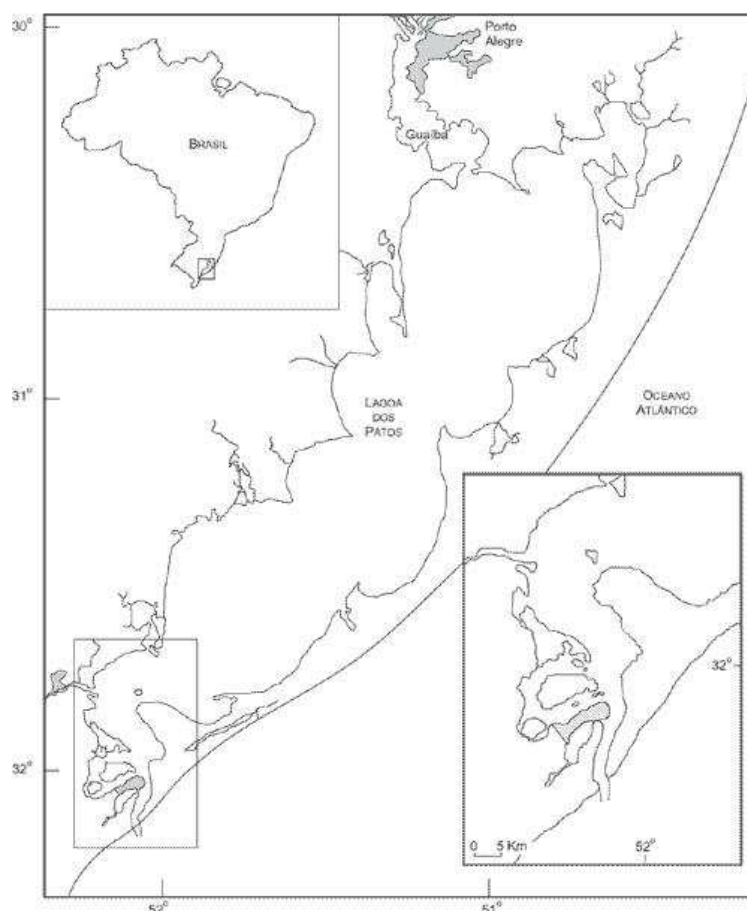


Figura 3.1 - Lagoa dos Patos e seu estuário no detalhe.

Várias definições para estuários foram formuladas por pesquisadores ao longo dos anos, uma delas é a pela definição clássica de Cameron e Pritchard (1963) um estuário é um corpo de água semi-fechado que apresenta pelo menos uma conexão livre com o mar através da qual a água salgada é mensuravelmente diluída pela água doce de origem continental. A definição feita por Kjerfve (1986), leva em consideração a gênese geológica e os processos regionais que contribuem para a formação desses ambientes e são responsáveis pelas características geomorfológicas e fisiográficas encontradas na natureza. Nessas condições, um estuário foi definido como aquele que apresenta conexões restritas com o oceano.

Como típico de lagoas estranguladas, o canal da Lagoa dos Patos atenua os avanços da onda de maré para dentro do estuário, portanto, a hidrodinâmica é forçada principalmente pela ação dos ventos e da descarga fluvial (Kjerfve, 1986; Möller et al., 1996). Além disto, o canal acaba confinando grande parte da influência de maré na porção afunilada do estuário e atenuando sua amplitude (Fernandes et al., 2004).

A morfologia da desembocadura influencia a extensão na qual a maré invade a laguna, e a salinidade varia, em parte, por isso. Assim, o limite norte da região estuarina é apontado como sendo a linha que une a Ponta dos Lençóis à Ponta da Feitoria (Closs 1962, Calliari, 1980). Entretanto, este limite pode estender-se para o interior da lagoa até sua porção intermediária (aproximadamente 200 km), em casos de estiagem prolongada associada aos ventos provenientes do quadrante Sul (Hartmann e Schettini, 1991). A região entre os molhes apresenta condições de moderada e alta hidrodinâmica, isto pode ser explicado em função das interações entre os regimes hidrodinâmico lagunar e o marinho (Antiqueira e Calliari, 2005).

O estuário da Lagoa dos Patos é caracterizado por eventos de enchente e vazante regidos respectivamente por marés meteorológicas e pela descarga fluvial proveniente da bacia de drenagem. Os padrões de circulação do estuário são governados pelo vento e pelos ciclos hidrológicos da bacia do Sudeste. As velocidades das correntes na saída do estuário podem atingir de 1,70 a 1,90 m/s, depois de prolongados períodos de chuvas (Mata e Möller, 1993). Visto que a desembocadura está em uma região de baixa amplitude de maré, esta se faz discreta como fator condicionante da circulação, sendo mais importante os regimes de ventos e a da descarga fluvial, cujas combinações promovem situações variadas, principalmente na região da desembocadura (Hartmann e Schettini, 1991).

Podem ocorrer na desembocadura situações de vazão extrema, quando os totais de precipitação estão acima do normal e, em conjunto com ventos do quadrante Norte, acarretam uma perda de identidade estuarina na área, sendo encontrado, então, um deslocamento unidirecional em sentido de jusante tipicamente fluvial (Hartmann e Schettini, 1991).

As variações periódicas que ocorrem sobre as condições hidrográficas da Lagoa dos Patos são causadas pela evolução dos sistemas atmosféricos. Os sistemas que ocorrem com maior frequência são os anticiclones migratórios (polares), que se deslocam seguindo uma trajetória de sudoeste para nordeste, com circulação no sentido anti-horário, induzindo a uma variação na direção do vento de Sudoeste para Nordeste. Essa variação do vento afeta diretamente o sistema de correntes da lagoa e, sobretudo, o regime de enchentes e vazantes da região estuarina (Hartmann et al., 1986).

Efeitos meteorológicos, notadamente o vento, podem causar significativas variações nos níveis dos extremos de maré relação aos previstos (Harari e Mesquita, 2001). O efeito do vento na Lagoa dos Patos pode ser dividido em duas partes, representando os efeitos local e remoto. O vento atuando sobre a plataforma continental (efeito remoto) causa elevação ou abaixamento no nível da costa, por transporte de Ekman (Castelão e Möller, 2003). O vento nordeste é dominante ao longo do ano, o vento sudoeste tem maior importância durante outono e inverno quando a passagem de sistemas frontais torna-se mais frequente sobre esta área (Piovesan et al., 2005). Ventos de nordeste causam abaixamento no nível na costa, enquanto que ventos de sudoeste causam elevação no nível (Castelão e Möller, 2003). Estes autores concluíram que a tensão do vento atua também diretamente sobre a superfície da lagoa (efeito local do vento), ocorrendo transferência de momento do vento para a água. Este tipo de atuação causa desníveis entre as extremidades do sistema (setup/setdown).

4. METODOLOGIA.

4.1 INTRODUÇÃO.

Este estudo está baseado na análise de dados, principalmente de séries temporais de nível das águas registradas na desembocadura da Lagoa dos Patos e na aplicação de técnicas de modelagem numérica. Para se verificar os efeitos do vento e da descarga fluvial na variabilidade das constantes harmônicas da região, são usados como referência, séries de velocidade e direção de vento e dados de descarga fluvial dos principais afluentes da Lagoa dos Patos.

Devido à multicolinearidade constatada entre o nível médio, a descarga fluvial e os ventos, estas séries foram submetidas à Análise dos Componentes Principais (ACP) para tornar estas variáveis independentes. Após, procedeu-se a regressão linear entre as constantes harmônicas e os fatores obtidos na ACP. Através das constantes harmônicas foram obtidas as previsões de cada série e comparadas através de uma análise espectral cruzada com as observações.

A restrição de coleta de dados de nível em outros pontos do estuário, bem como, questionamentos inerentes aos componentes harmônicos, fez com que fosse realizada a simulação dos componentes estudados: O_1 , K_1 , M_2 e S_2 . Durante as simulações, não foi considerado o atrito das laterais e do fundo e foi realizada em três cenários distintos:

- a) Considerando a influência da descarga fluvial em períodos extremos (1.000 e 5.000 m³/s) sobre os componentes harmônicos;
- b) Analisando o comportamento dos constituintes acima citados através da variação do nível (30, 60 e 110 cm);
- c) Avaliando a influência do efeito de Coriolis nas componentes harmônicas para se avaliar a geração de ondas inerciais em uma região situada a 30°S.

O modelo TELEMAC-2D foi utilizado para a realização de simulações bidimensionais na região de estudo. A área de estudo foi definida entre as latitudes 29,8° S e 35,33° S e longitudes 46,83 ° O e 52,89° O, com a fronteira oceânica limitada pela isóbata de 3.000 m. A amplitude e fase das componentes da maré (O_1 , K_1 , M_2 e S_2) prescrita na fronteira oceânica

paralela à zona costeira foram obtidas do modelo FES95.2 (*Finite Element Solution*). As simulações foram realizadas para um período de 29 dias em 6 pontos fixados na costa adjacente (Figura 4.1) e em 3 pontos localizados no interior do estuário (Figura 5.3).

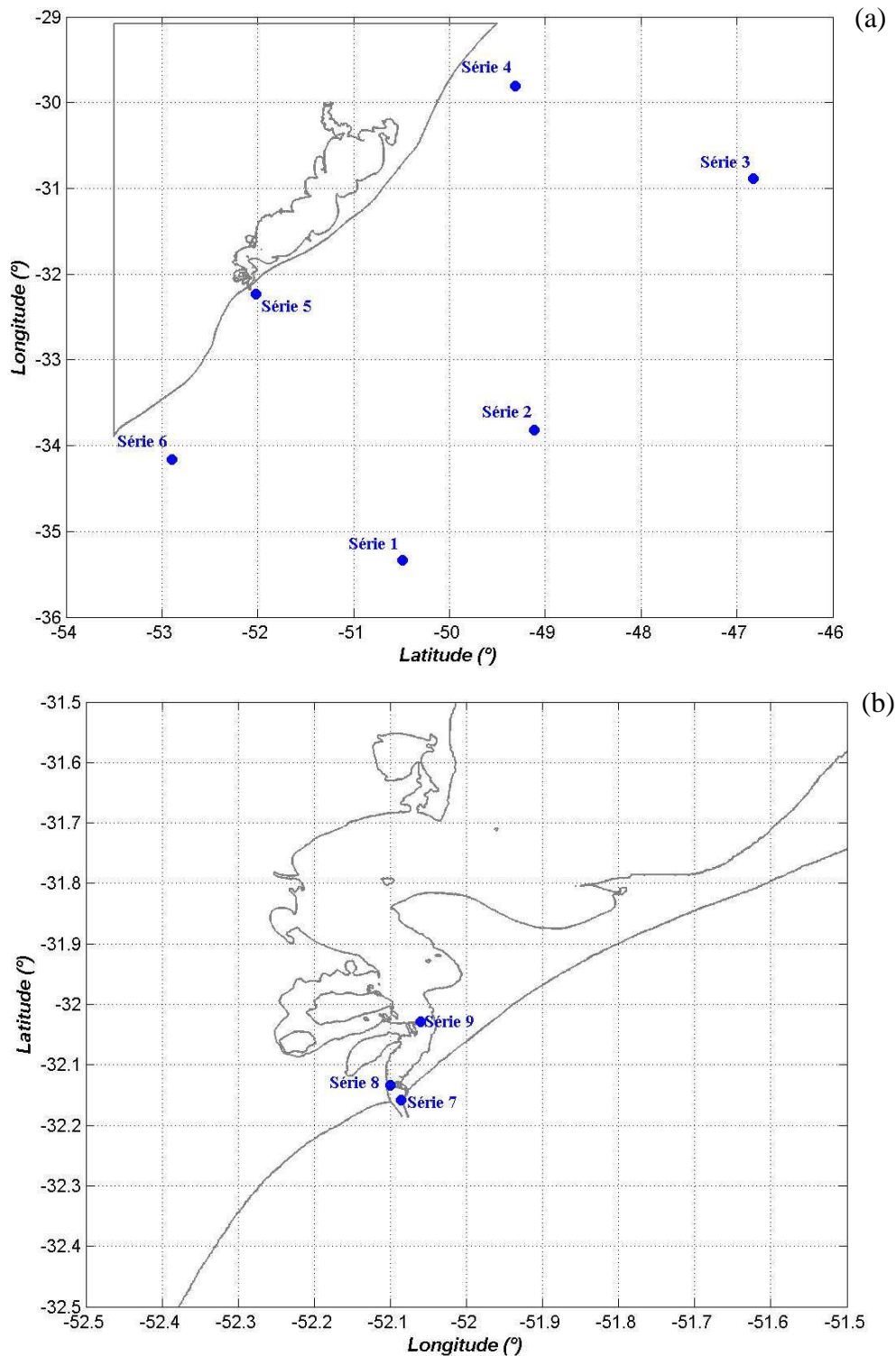


Figura 4.1 - Localização dos pontos onde foram realizadas a simulações para a determinação dos harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 . (a) Região costeira. (b) Interior do estuário.

4.2 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS.

4.2.1 Séries de Elevação do Nível.

As séries temporais de nível das águas foram obtidas através do Banco Nacional de Dados Oceanográficos e correspondem às medições horárias realizadas na área da Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande (Praticagem), conforme mostra a Figura 4.2. A posição do marégrafo é $32,13^{\circ}$ S e $52,10^{\circ}$ O, sendo situado nas proximidades da entrada da Lagoa dos Patos. Em função da escassez de séries longas e contínuas, foram selecionados os seguintes anos: 1984, 1989, 1991 e 1992, entretanto o ano de 1989 abrange um intervalo de 2 de janeiro a 28 de novembro. É importante ressaltar que ocorreu um El-Niño intenso no período de 1990 a 1992.

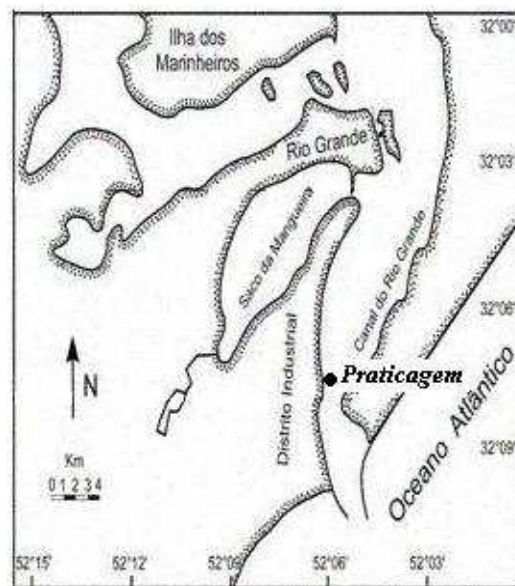


Figura 4.2 - Localização da Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande (Praticagem).

Os registros de nível disponibilizados pela Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande encontram-se no período que abrange o intervalo de 1983 até 1994, porém as séries estudadas foram concentradas nos anos de 1984, 1989, 1991 e 1992, pois eram as únicas que estavam completas.

As constantes harmônicas da maré foram obtidas através da aplicação o programa de Previsão e Análise Harmônica de Marés e Correntes de Maré (PACMARÉ) com análises

mensais e anuais com base nos valores horários da altura da maré medidos na Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande (Praticagem). O PACMRÉ está fundamentado na série de Fourier e no método dos mínimos quadrados, desenvolvido por Franco (1988). As análises mensais foram baseadas em uma análise harmônica de 30 dias, totalizando 12 análises para cada ano e as análises anuais foram obtidas através da série completa, totalizando 4 análises harmônicas anuais.

O procedimento para a obtenção das constantes harmônicas foi obtido através do desvio das séries. O que se chama aqui de desvio é a oscilação de nível proveniente da subtração entre a série e sua respectiva média. Este desvio foi obtido para as séries completas (anuais) e para as séries obtidas em períodos específicos (mensal).

4.2.2 Séries da Descarga Fluvial.

Através da página da Agência Nacional de Águas (ANA), Marques (2005) obteve as médias diárias da descarga fluvial dos principais afluentes da Lagoa dos Patos: os rios Jacuí, Taquari e Camaquã para os períodos de 1984, 1989, 1991 e 1992 (Figura 2.2). Não existem dados para o Canal de São Gonçalo, que conecta as lagoas dos Patos e Mirim.

4.2.3 Séries de Vento.

As médias diárias de velocidade e direção dos ventos foram obtidos para a região localizada nas coordenadas 52,5°E e 31,43°S, disponíveis no Reanalysis Project at the NOAA/ESRL Physical Sciences Division (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>). Os vetores de vento foram transformados em componentes longitudinais e transversais à costa.

4.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DAS SÉRIES.

Modelos multivariados de pesquisa envolvem análise do relacionamento entre múltiplas variáveis explicativas e, em alguns casos, múltiplas variáveis dependentes. Grande parte das pesquisas delineadas para examinar o efeito exercido por duas ou mais variáveis independentes sobre uma variável dependente utiliza a análise de Regressão Múltipla. A Regressão Múltipla é definida por Tabachnick e Fidell (1996) como um conjunto de técnicas estatísticas que possibilita a avaliação do relacionamento de uma variável dependente com diversas variáveis independentes.

Quando as variáveis independentes estão fortemente correlacionadas entre si - condição designada por multicolinearidade - a análise do modelo de regressão ajustado pode ser desprovida de significado, fazendo desta condição um dos principais pressupostos a ser validade durante a regressão linear. Em situações ideais, as variáveis independentes não estão correlacionadas, isto é, são consideradas ortogonais e o modelo ajustado, bem como, os coeficientes de regressão podem ser utilizados com fins de estimação. Na prática, em matrizes de dados multivariados existe quase sempre algum tipo de associação entre, pelo menos, algumas das variáveis independentes.

A multicolinearidade pode ser diagnosticada de várias formas. A mais simples e intuitiva é a análise da matriz de correlações bivariadas entre as variáveis da base de dados. Depois são submetidos à Análise dos Componentes Principais para condensar as informações contidas nas variáveis originais, em um conjunto menor de novas dimensões com uma perda mínima de informação. Para o estudo estatístico das séries foi utilizado o software *Statistica 6.0*.

4.3.1 Análise dos Componentes Principais.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica de análise exploratória multivariada que transforma um conjunto de variáveis correlacionadas em um conjunto menor de variáveis independentes, combinações lineares das variáveis originais, designadas de componentes principais. O estudo e interpretação da estrutura da variância-covariância de um

determinado fenômeno medido por múltiplas variáveis de modo a revelar as relações entre elas é objetivo principal da ACP (Maroco, 2007).

Do ponto de vista algébrico, as componentes principais são combinações de n variáveis populacionais originais correlacionadas com o objetivo de formar n combinações lineares independentes do tipo (Johnson e Wichern, 1992):

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \gamma_{11}X_1 + \gamma_{12}X_2 + \dots + \gamma_{1n}X_n \\ \xi_2 &= \gamma_{21}X_1 + \gamma_{22}X_2 + \dots + \gamma_{2n}X_n \\ &\dots \\ \xi_n &= \gamma_{n1}X_1 + \gamma_{n2}X_2 + \dots + \gamma_{nn}X_n\end{aligned}\tag{4.1}$$

Onde X_1, X_2, \dots, X_n são as n variáveis populacionais originais, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ são as n componentes principais e γ_{ij} é o peso da variável j na componente principal i . Os pesos γ_{ij} são estimados de modo que (Maroco, 2007):

a) A primeira componente principal explique a maior proporção da variância total das variáveis originais;

b) A componente seguinte explique a maior proporção da variância não explicada pela primeira componente e esta é independente da primeira. Esta condição pode formalizar-se matematicamente por

$$(\gamma_{i1}\gamma_{j1} + \gamma_{i2}\gamma_{j2} + \dots + \gamma_{in}\gamma_{jn} = 0 \quad (i \neq j; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n))\tag{4.2}$$

c) A escala das novas componentes seja fixa de modo a manter constante a variância total. Esta condição é expressa matematicamente por:

$$(\gamma_{i1}^2 + \gamma_{i2}^2 + \dots + \gamma_{in}^2 = 1 \quad (i = 1, \dots, n))\tag{4.3}$$

A otimização matemática pode ser simplificada através do recurso da notação matricial. Se x for um vetor unitário de dimensão n (sendo n o número de variáveis originais), então:

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix}\tag{4.4}$$

A matriz de variâncias-covariâncias de x é $\Sigma = E(xx')$. Se $\gamma' = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ for o vetor transposto do vetor dos pesos, e $\xi' = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]$ for o vetor transposto das componentes principais, então cada uma delas podem ser representadas por $\xi = \gamma' * x$. A variância de ξ é:

$$V(\xi) = E(\xi\xi') = E(\gamma'xx'\gamma) \quad (4.5)$$

O problema de otimização resume-se em encontrar o vetor de pesos γ tal que $\gamma'\Sigma\gamma$ seja máxima sob a restrição de que $\gamma\gamma' = 1$. A obtenção deste problema obtém-se através das derivadas parciais e ao Multiplicador de Lagrange:

$$(\Sigma - \lambda I)\gamma = 0 \quad (4.6)$$

Onde λ é o Multiplicador de Lagrange, I é a matriz identidade e 0 é o vetor nulo. A solução deste sistema de equações deve possuir um determinante nulo, ou seja, $|\Sigma - \lambda I| = 0$, conseqüentemente a equação polinomial deverá ser igual à zero:

$$\kappa_1\lambda^n + \kappa_2\lambda^{n-1} + \dots + \kappa_n\lambda + \kappa_{n+1} = 0 \quad (4.7)$$

A equação (4.7) possui n raízes então $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n)$ que são designados por valores próprios (autovalores), raízes características ou raízes latentes da matriz Σ . Assim o primeiro valor próprio λ_1 , a que corresponde ao primeiro vetor próprio (*autovetor*) γ_1 obtém-se por meio da resolução do sistema:

$$(\Sigma - \lambda_1 I)\gamma_1 = 0 \quad (4.8)$$

Tal que a condição $\gamma_1\gamma_1' = 1$ seja satisfeita.

Multiplicando por γ_1' e reorganizando os termos, tem-se:

$$\gamma_1'(\Sigma - \lambda_1 I)\gamma_1 = 0\gamma_1' \quad (4.9)$$

$$\gamma_1'\Sigma\gamma_1 = \gamma_1'\lambda_1 I\gamma_1 \quad (4.10)$$

$$\gamma_1' \Sigma \gamma_1 = \lambda_1 \gamma_1' \gamma_1 \quad (4.11)$$

$$\gamma_1' \Sigma \gamma_1 = \lambda_1 \quad (4.12)$$

Assim a primeira componente principal ξ_1 pode ser representada pelo vetor próprio γ_1 e a variância explicada pela primeira componente:

$$V(\xi_1) = \gamma_1' \Sigma \gamma_1 = \lambda_1 \quad (4.13)$$

Sendo λ_1 o maior valor próprio. Depois de encontrada a primeira componente, procede-se para a segunda componente por um processo iterativo semelhante, mas com a restrição adicional da ortogonalidade entre as componentes dada por:

$$\gamma_1' \gamma_2 = 0 \quad (4.14)$$

4.3.2 Regressão Linear Múltipla.

A Regressão Linear define um conjunto vasto de técnicas estatísticas usadas para modelar relações entre variáveis e prever o valor de uma variável dependente a partir de um conjunto de variáveis preditoras. Segundo Maroco (2007), a relação entre duas variáveis pode ser de dependência funcional, ou seja, a magnitude da variável dependente é função da magnitude da variável independente, mas o contrário não se aplica, ou de mera associação, isto é, nenhuma das variáveis pode ser tida como dependente da outra, mas apenas que elas variam em conjunto. O termo variável dependente implica na relação causa-efeito, porém a regressão linear pode ser usada para modelar a relação funcional entre duas variáveis.

A relação funcional entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes é do tipo:

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \dots + \beta_n X_{nj} + \varepsilon_j \quad (4.15)$$

Onde, β_i são os coeficientes de regressão e representam a variação de Y por unidade de variação de X_i , ε_j representa os erros ou resíduos do modelo e β_0 é a ordenada de origem.

O Método dos Mínimos Quadrados é utilizado para estimar $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$, e as estimativas dos coeficientes de regressão são obtidas de modo que os erros ou resíduos, calculados através do modelo sejam mínimos. Sendo:

$$e_j = y_j - \hat{y}_j \quad (4.16)$$

Considerando e_j o resíduo do modelo, y_j o valor observado e \hat{y}_j o valor previsto. Este conceito corresponde em termos gráficos à adequação da reta em relação aos valores observados de Y , de modo que a distância entre y_j e \hat{y}_j seja menor possível. Ao elevar ao quadrado e_j e somar todos os resíduos encontrados, obtém-se uma estimativa do ajuste da reta em relação aos valores observados com os estimados. O problema de estimação de $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ resume-se a um problema de determinação da Soma dos Quadrados dos Erros (SQE), dado por:

$$SQE = \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (4.17)$$

A avaliação da influência das variáveis independentes sobre a variável dependente, ou seja, se o modelo ajustado é ou não significativo é formulado por duas hipóteses:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

Para testar estas hipóteses, a variabilidade total em Y , expressa pela soma dos quadrados dos desvios de Y relativamente à \bar{Y} (SQT), é dividida em duas componentes aditivas: uma explicada pelo modelo ajustado (SQR) e a outra não explicada pelo modelo, mas sim pelos erros (SQE):

$$SQT = SQR + SQE \quad (4.18)$$

$$SQT = \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2 \quad (4.19)$$

$$SQR = \sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - \bar{Y})^2 \quad (4.20)$$

$$SQE = \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2 \quad (4.21)$$

$$\sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2 = \sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - \bar{Y})^2 + \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2 \quad (4.22)$$

Assim, se a fração da variância total em Y explicada for significativamente maior do que a proporção da variância total não explicada pelo modelo, pode-se concluir que o modelo ajustado é significativo. A variância explicada pela regressão é estimada dividindo o SQR pelos respectivos graus de liberdade p (número de variáveis independentes no modelo), e a variância dos erros pode ser estimada dividindo a SQE pelos respectivos graus de liberdade $(n - p - 1)$. Assim a estatística de teste é:

$$F = \frac{SQR/p}{SQR/(n-p-1)} = \frac{QMR}{QME} \quad (4.23)$$

Onde, QMR e QME são os quadrados médios da regressão e dos erros, respectivamente. Sob H_0 a estatística F possui distribuição F -Snedecor com p e $(n - p - 1)$ graus de liberdade. Finalmente, se o p -value $\leq \alpha$, rejeita-se H_0 a favor de H_1 e conclui-se que pelo menos uma das variáveis independentes possui um efeito significativo sobre a variação da variável dependente, ou seja, o modelo ajustado é significativo.

O coeficiente de determinação (R^2) mede a proporção da variabilidade total que é explicada pela regressão ($0 \leq R^2 \leq 1$) ou de modo equivalente a proporção da variabilidade total de Y que é atribuível à dependência dos Y de todos os X_i . O R^2 pode ser calculado através da expressão:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (4.24)$$

De forma geral, a incorporação de mais de uma variável independente tende a aumentar o R^2 mesmo que esta possua influência reduzida sobre a variável dependente. Alternativamente, utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado R_a^2 , que aumenta apenas se a adição da nova variável conduzir a um melhor ajustamento do modelo e é dado por:

$$R_a^2 = 1 - \frac{QME}{QMT} \quad (4.25)$$

São três os tipos principais de análise de regressão múltipla: (1) regressão múltipla padrão; (2) regressão múltipla hierárquica, ou sequencial; e (3) regressão estatística. Como observado por Tabachnick e Fidell (1996), estas estratégias analíticas diferem entre si quanto ao que acontece com a variabilidade sobreposta de preditores correlacionados entre si na explicação do critério e, além disso, de quem determina (a estatística ou a teoria) a ordem de entrada dos preditores na equação.

São três as formas de se realizar uma regressão *stepwise*: (1) *Forward* - quando a equação começa vazia e cada preditor entra, um por um, na equação; (2) *Backward* - quando todos os preditores são incluídos de uma só vez na equação, e depois são retirados, um a um, até que se identifiquem os melhores preditores; (3) *Stepwise* - semelhante à regressão *Stepwise Forward*, mas, ao invés dos preditores serem incluídos individualmente, eles entram na equação em blocos (Tabachnick e Fidell, 1996). A regressão *Stepwise* foi escolhida para os estudos exploratórios.

4.4 SOFTWARE PACMARÉ.

O Software PACMARÉ (Previsão e Análise Harmônica de Marés e Correntes de Maré) foi desenvolvido por Franco (1988) e foi utilizado para a obtenção das alturas de marés com base nas constantes harmônicas obtidas em análises feitas pelo método harmônico. O Programa utiliza a técnica e decomposição de uma grandeza periódica não-sinusoidal baseado no teorema de Fourier. O PACMARÉ emprega um percentual de 95% para a rejeição de pequenos componentes e analisa até 13 tipos de componentes diários, podendo ser especificado o número de ciclos da espécie analisada.

As ondas de marés são consideradas ondas de longo período, pois possuem comprimentos elevados em profundidades relativamente pequenas ($h/L < 1/20$), sendo h considerado a profundidade e L o comprimento. Estas ondas de longo período podem originar ondas estacionárias (*seiches*) no interior dos estuários devido à ressonância. Em casos extremos, a deformação de uma onda pode ser tão grande que isto acaba gerando fenômenos como a pororoca (*tidal bore*).

O estudo propagação de ondas na superfície requer que o fluido possua um movimento irrotacional, para isso é necessário que o fluido seja considerado incompressível e não viscoso. Partindo de tais hipóteses, a equação de Laplace traduz o movimento da onda:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.26)$$

Onde ϕ é considerado o potencial de velocidade do fluxo e x, y, z são as coordenadas cartesianas. Por se tratar de águas rasas o cálculo da velocidade de propagação é feito através da equação:

$$c = \sqrt{gh} \quad (4.27)$$

Sendo, c é a celeridade da onda, g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade.

A análise harmônica permite representar uma função complexa como a somatória de termos senoidais e cossenoidais, sendo que cada onda é definida por um valor único de amplitude e de fase. A amplitude corresponde à metade do valor onde a função é maximizada e a fase é o deslocamento entre a origem e o pico da onda no intervalo de 0 até 2. Cada termo designa o número de ciclos completados por uma onda num determinado intervalo: o primeiro harmônico ou harmônico fundamental tem um período T , o segundo harmônico tem um período igual à metade do período do primeiro harmônico $T/2$, o terceiro harmônico $T/3$ e assim sucessivamente. Para M constituintes harmônicas possíveis, a série temporal $x(t_n)$, $n=1, 2, \dots, N$ pode ser expandida como:

$$x(t_n) = \bar{x} + \sum_{q=1}^M [A_q \cos(2\pi f_q t_n) + B_q \text{sen}(2\pi f_q t_n)] + x_r(t_n) \quad (4.28)$$

Onde,

\bar{x} - valor médio da série

A_q, B_q - amplitude dos harmônicos

f_q - frequência dos harmônicos

x_r - porção residual da série

M - número de elementos

n - número do elemento da série

$$t_n = n\Delta t \quad (4.29)$$

$$2\pi f_q t_n = \frac{2\pi f_q}{N} \quad (4.30)$$

$$C_q = (A_q^2 + B_q^2)^{1/2} \quad (4.31)$$

$$\phi_q = \tan^{-1}\left(\frac{B_q}{A_q}\right) \quad (4.32)$$

Sendo,

C_q - amplitude

ϕ_q - defasagem

O objetivo do método dos mínimos quadrados é minimizar a variância e^2 da parte residual das séries (x_r):

$$e^2 = \sum_{n=1}^N \left[x(t_n) - \left(\bar{x} + \sum_{q=1}^M (A_q \cos(2\pi f_q t_n) + B_q \text{sen}(2\pi f_q t_n)) \right) \right]^2 \quad (4.33)$$

Fazendo a derivação parcial em relação à A_q e B_q e igualando a zero, tem-se $2M + 1$ equações simultâneas para os $M + 1$ constituintes:

$$\frac{\partial e^2}{\partial A_q} = 0 = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ \left[x_n - \left(\bar{x} + \sum_{q=1}^M (A_q \cos(2\pi f_q t_n) + B_q \text{sen}(2\pi f_q t_n)) \right) \right] [-\cos(2\pi qn / N)] \right\} \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial e^2}{\partial B_q} = 0 = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ \left[x_n - \left(\bar{x} + \sum A_q \cos(2\pi f_q t_n) + B_q \sin(2\pi f_q t_n) \right) \right] \left[-\sin(2\pi qn/N) \right] \right\} \quad (4.35)$$

A derivação dos coeficientes requer a solução de uma equação matricial da forma:

$$Dz = y \quad (4.36)$$

Onde,

D - matriz $(2M + 1) * (2M + 1)$ envolvendo termos de senos e cossenos

y - vetor.

z - matriz coluna contendo os coeficientes A_q e B_q

Então,

$$z = D^{-1} y \quad (4.37)$$

Sendo,

$$D = \begin{pmatrix} N & c_1 & c_2 & \dots & c_M & s_1 & s_2 & \dots & s_M \\ c_1 & cc_{11} & cc_{12} & \dots & cc_{1M} & cs_{11} & cs_{12} & \dots & cs_{1M} \\ c_2 & cc_{21} & cc_{22} & \dots & cc_{2M} & cs_{21} & cs_{22} & \dots & cs_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_M & cc_{M1} & cc_{M2} & \dots & cc_{MM} & cs_{M1} & cs_{M2} & \dots & cs_{MM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_1 & sc_{11} & sc_{12} & \dots & sc_{1M} & ss_{11} & ss_{12} & \dots & ss_{1M} \\ s_2 & sc_{21} & sc_{22} & \dots & sc_{2M} & ss_{21} & ss_{22} & \dots & ss_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_M & sc_{M1} & sc_{M2} & \dots & sc_{MM} & ss_{M1} & ss_{M2} & \dots & ss_{MM} \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

$$y = \begin{pmatrix} yc_0 \\ yc_1 \\ yc_2 \\ \dots \\ \dots \\ yc_M \\ ys_1 \\ \dots \\ ys_M \end{pmatrix} \quad z = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ \dots \\ A_M \\ B_1 \\ \dots \\ B_M \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

O vetor z requer que coeficientes A_q e B_q para cada constituinte harmônico especificado. Para isto, substituem-se os elementos da matriz D para o tempo:

$$t_n = n\Delta t \quad (4.40)$$

Usando,

$$\alpha_k = f_k T_t$$

$$\alpha_j = f_j T_t$$

$$T_t = N\Delta t$$

f_k, f_j - frequência

T_t - comprimento da série

$$c_k = \sum_{n=1}^N \cos(2\pi\alpha_k n / N) \quad (4.41)$$

$$s_k = \sum_{n=1}^N \text{sen}(2\pi\alpha_k n / N) \quad (4.42)$$

$$cc_{kj} = cc_{jk} = \sum [\cos(2\pi\alpha_k n / N) \cos(2\pi\alpha_j n / N)] \quad (4.43)$$

$$ss_{kj} = ss_{jk} = \sum [\text{sen}(2\pi\alpha_k n / N) \text{sen}(2\pi\alpha_j n / N)] \quad (4.45)$$

$$cs_{kj} = cs_{jk} = \sum [\cos(2\pi\alpha_k n / N) \text{sen}(2\pi\alpha_j n / N)] \quad (4.46)$$

Onde,

$$\alpha_k \frac{n}{N} = \left(\frac{\alpha_k}{N\Delta t} \right) (n\Delta t) \quad (4.47)$$

O vetor y é dado por:

$$yc_k = \sum_{n=1}^N x_n \cos(2\pi\alpha_k n / N) \quad (4.48)$$

$$ys_k = \sum_{n=1}^N x_n \text{sen}(2\pi\alpha_k n / N) \quad (4.49)$$

As principais faixas de frequência de oscilação para o potencial gerador de maré foram identificadas por (Cartwright e Edden, 1973) e são mostradas abaixo, para os seguintes componentes:

- Longo período - 0 e 0,03 rad/h; T = 0 a 8,8 dias;
- Diurnas - 0,2 e 0,3 rad/h; T = 31 a 21 horas;
- Semidiurnas - 0,45 a 0,55 rad/h; T = 14 a 11,4 horas.

Além dos constituintes provenientes das forças gravitacionais, existe sempre em uma onda real de maré, chamada de resíduo e com frequências que abrangem todo o espectro. Este resíduo reflete forçamentos causados direta ou indiretamente pela radiação solar (vento, aquecimento, perturbações atmosféricas) e por efeitos não-lineares. O tipo de maré existente em cada local caracteriza-se em função das amplitudes dos principais componentes diurnos (K_1 e O_1) e semidiurnos (M_2 e S_2) da maré, sendo que esta classificação está fundamentada no Número de Forma (F), ou seja:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (4.50)$$

Quando dois constituintes com frequências diferentes se encontram, sua adição resultante é modulada por uma onda com frequência igual à diferença das frequências das ondas originais. Este efeito de caráter linear faz, no entanto com que os efeitos dos termos não-lineares sejam diferentes daqueles produzidos pelos constituintes quando atuam isoladamente (Parker, 1991). Considerando a interação das constituintes M_2 e N_2 a onda resultante é modulada com um período de 27,6 dias. As correntes de maré são maiores

quando M_2 e N_2 estão em fase. Devido à natureza quadrática da tensão de corte no fundo, o aumento de perda de energia dos constituintes que estão em fase é superior à diminuição de perda de energia quando as componentes estão fora de fase e a perda total de energia é, portanto, superior quando as ondas atuam simultaneamente.

4.5 MODELO NUMÉRICO - TELEMAC.

O TELEMAC é um modelo de elementos finitos desenvolvido pelo *Laboratoire National d'Hydraulique (EDF, France)* para simular o fluxo em estuários e zonas costeiras. O modelo resolve as equações de Navier-Stokes considerando as variações locais na superfície livre do fluido, desprezando as variações de densidade na equação de conservação da massa, considerando a pressão hidrostática e aproximação de Boussinesq para resolver as equações do momento (Marques et al., 2006).

O TELEMAC-2D usa um sistema cartesiano como referência (x, y, z), no qual os eixos x e y formam um plano horizontal e a gravidade atua na direção negativa de z. Seu equacionamento está baseado na equação da continuidade da massa (equação 4.51) e nas duas equações do movimento, ambas integradas na vertical e derivadas das equações tridimensionais de Navier-Stokes (equações 4.52 e 4.53).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(h) + h \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_i \vec{\nabla} v) \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_i \vec{\nabla} v) \quad (4.53)$$

Onde,

S_x - termos fonte na direção x

S_y - termos fonte na direção y

g - aceleração gravitacional

h - profundidade total

t - tempo

u - componente da velocidade na direção x

v - componente da velocidade na direção y

η - elevação da superfície livre

ν_t - coeficiente de viscosidade turbulenta

Os termos S_x e S_y nas Equações 5.51 e 5.52 são chamados termos fonte e representam fontes e sumidouros de momento na direção x e y , respectivamente. No modelo TELEMAC-2D os termos fonte são: fricção com o fundo, força de Coriolis, cisalhamento do vento.

A força de Coriolis, devido à natureza não inercial do sistema de referência adotado, é calculada da seguinte forma:

$$\vec{F}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{u} \quad (4.54)$$

Ou em forma de componentes como:

$$F_{cx} = fv \quad (4.55)$$

$$F_{cy} = -fu \quad (4.56)$$

$$f = 2\vec{\omega} \sin \varphi \quad (4.57)$$

Onde,

\vec{F}_c - Vetor força de Coriolis

$\vec{\omega}$ - Vetor velocidade angular

φ - Latitude do fluido

f - Parâmetro de Coriolis

As condições de contorno do modelo consideram que nos contornos fechados não há fluxo de água através do fundo e de faces laterais, e existe uma condição de livre deslizamento nas paredes para todos os vetores tangentes a estas. Nos contornos abertos, o modelo considera a altura da superfície de água livre e a condição de contorno de superfície é o estresse calculado a partir da velocidade do vento e do coeficiente da influência do vento. A condição de atrito no fundo é variável, uma vez que o coeficiente de atrito é prescrito. Para cada variável principal (h , u e v), o usuário determina se há um valor prescrito ou não (livre) em cada ponto da grade.

O modelo TELEMAC-2D já foi calibrado e validado para simulações da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos e do seu estuário, e estes resultados encontram-se publicados em Fernandes et al. (2001; 2002), Cecílio (2004) e Schiller (2004). Os resultados destes autores mostram que, em todos os exercícios de calibração do modelo TELEMAC para esta região, a reprodução do modelo foi classificada como boa, de acordo com o critério proposto.

5. RESULTADOS.

5.1 SÉRIES TEMPORAIS DO NÍVEL MÉDIO, DE VENTOS E DA DESCARGA FLUVIAL.

5.1.1 Descrição das Séries.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam as séries temporais do nível médio, da descarga fluvial e intensidade e direção do vento para as séries de 1984, 1989, 1991 e 1992. A série temporal do nível médio em 1984 apresentou a maior média anual (116 cm), sendo que nos meses compreendidos entre o período de abril a agosto, as médias mensais foram superiores à média anual. A menor média anual referente ao nível médio foi observada em 1989 com 100 cm. Os anos de 1991 e 1992 apresentaram médias de 109 cm e 110 cm.

A descarga fluvial média obtida em 1984 foi de 2.475 m³/s e, como se observa na Figura 6.1 ocorre um aumento da vazão a partir de abril com uma média mensal de 1.319 m³/s e se estende até junho (6.597 m³/s). Um pico da descarga fluvial é verificado em outubro com um registro de 5.094 m³/s. O ano de 1989 é considerado um ano seco com uma média anual de 1.192 m³/s, entretanto foram encontrados 4 picos com vazões acima de 3.000 m³/s a partir de julho, sendo que o maior registro ocorreu em agosto com um fluxo de 6.990 m³/s. A média anual para este ano foi de 1.192 m³/s. A descarga fluvial média anual em 1992 foi de 2.188 m³/s e durante os meses de abril a setembro o escoamento médio foi de 3.324 m³/s, considerado superior à média anual. Através dos registros desta série foram encontrados 3 registros com um escoamento acima de 8.000 m³/s, sendo que o máximo ocorreu em junho com 10.117 m³/s.

A série de ventos tem como intensidade máxima para o vento longitudinal o ano de 1984 com -0,65 m/s, seguido dos anos de 1989 e 1991, com -0,61 m/s cada e o ano de 1992 com a menor intensidade obtida (-0,40 m/s). O vento transversal teve um registro máximo médio em 1992 (0,05 m/s), os anos de 1984, 1989 e 1991 tiveram médias de 0,003 m/s, 0,002 m/s e 0,02 m/s, respectivamente.

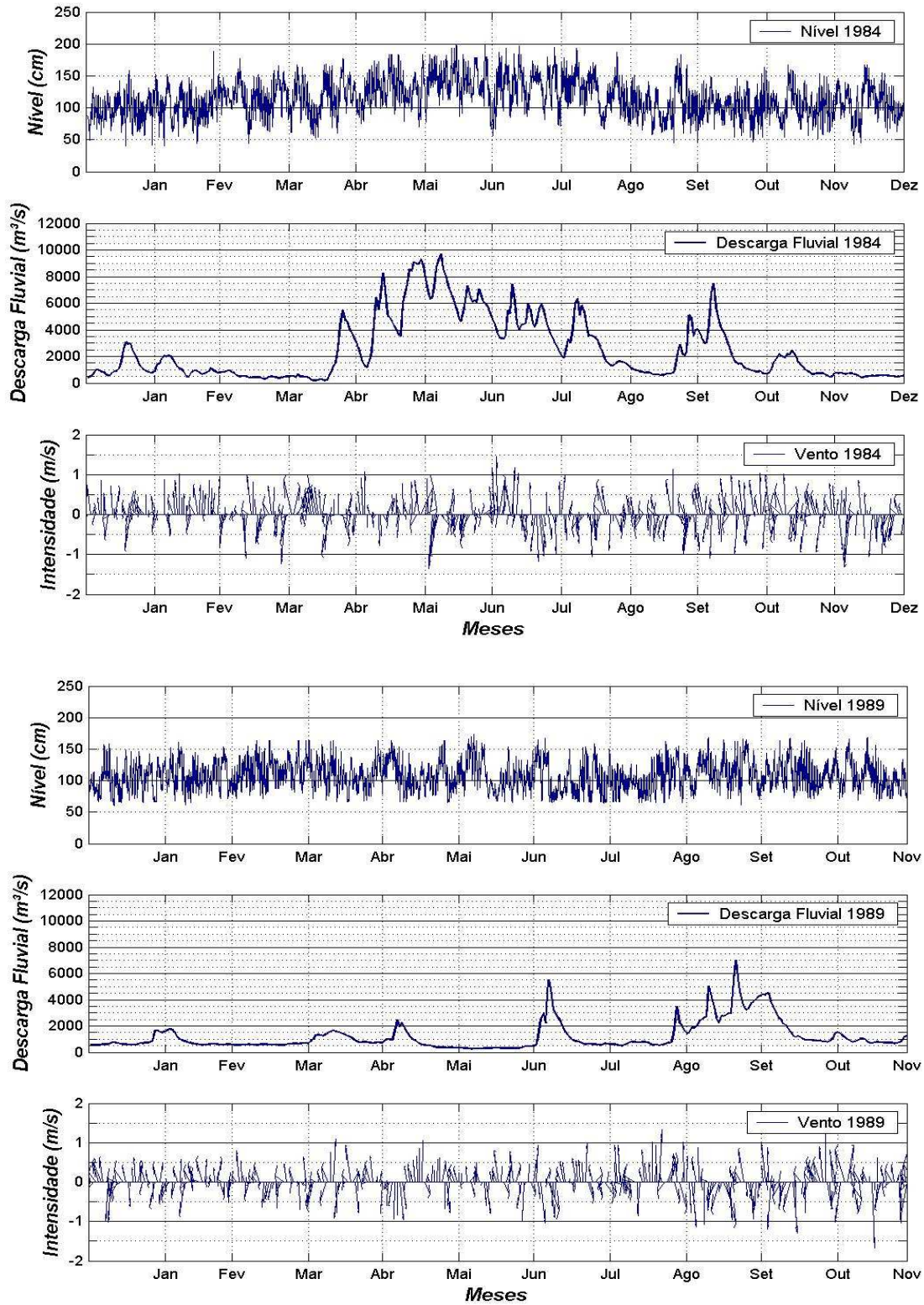


Figura 5.1 - Nível médio, descarga fluvial e intensidade e direção do vento das séries de 1984 e 1989.

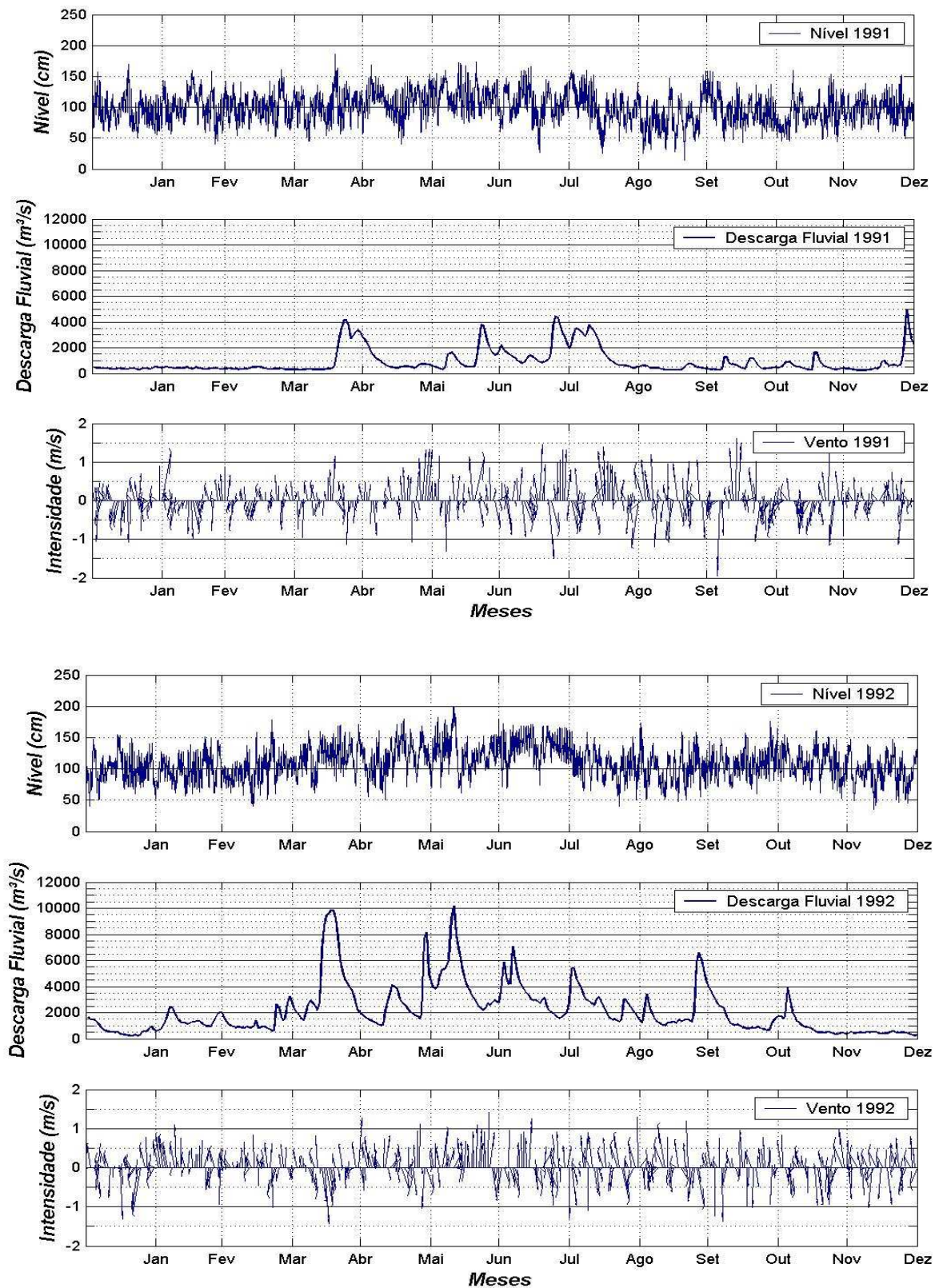


Figura 5.2 - Nível médio, descarga fluvial e intensidade e direção do vento das séries de 1991 e 1992.

5.1.2 Análise dos Componentes Principais das Séries de Nível Médio, dos Ventos e da Descarga Fluvial.

As intercorrelações existentes entre as variáveis podem explicar um conjunto reduzido de fatores comuns e por um conjunto de fatores específicos que ilustram a variação residual específica de cada variável (Maroco, 2007). A viabilidade da análise dos componentes principais está em uma primeira etapa no exame visual das correlações e na determinação daquelas que são estatisticamente significantes. Se duas variáveis estão correlacionadas ocorre à partilha de uma característica em comum. A Tabela 5.1 contém a matriz de correlações para o conjunto de variáveis e a inspeção da matriz de correlação revela que 3 (50%) das 6 correlações são significantes no nível 0,01.

Tabela 5.1 - Matriz de correlações dos ventos Longitudinal e transversal, vazão e nível médio.

	<i>Vento Longitudinal</i>	<i>Vento Transversal</i>	<i>Vazão</i>	<i>Nível</i>
<i>Vento Longitudinal</i>	1,00	**	**	**
<i>Vento Transversal</i>	-0,12	1,00	**	**
<i>Vazão</i>	0,53	-0,05	1,00	**
<i>Nível</i>	0,59	-0,14	0,75	1,00

Para avaliar a validade da matriz fatorial foi utilizado o Teste de Bartlett de Esfericidade e o critério de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) conforme indicado por Hair (2005). O resultado obtido para o Teste de Bartlett apresentou correlações significativas entre as variáveis, no nível de 0,0001 ($0,0000 < 0,0001$) e o critério de KMO, utilizado para a adequação da amostra, ocupa um intervalo aceitável (0,589), sendo que o mínimo indicado por Hair (2005) e Maroco (2007) é de 0,5. Estes parâmetros indicam que o conjunto reduzido de variáveis é adequado à análise fatorial.

A matriz fatorial das cargas não-rotacionadas das séries de 1984, 1989, 1991 e 1992 agrupados são apresentadas na Tabela 5.2. O critério seguido para extração de fatores que explicam os montantes de variância significativa foi baseado no Critério de Porcentagem de Variância, que é estruturado na conquista de um percentual cumulativo especificado pela

variância total de fatores sucessivos. Hair (2005) indica uma porcentual de variância acumulado mínimo de 95% para a obtenção dos fatores. Este mesmo autor orienta que a identificação de cargas fatoriais significantes para uma amostra com 50 elementos é de $\pm 0,75$ para um nível de significância (α) de 0,05. Em síntese, considera-se que cargas fatoriais superiores a $\pm 0,30$ atingem um nível mínimo; cargas de $\pm 0,40$ são consideradas importantes e, se são maiores que $\pm 0,50$ são consideradas com significância prática.

Tabela 5.2 - Matriz fatorial das cargas não-rotacionadas das séries de 1984, 1989, 1991 e 1992.

<i>Não-Rotacionada</i>				
	<i>Fator 1</i>	<i>Fator 2</i>	<i>Fator 3</i>	<i>Fator 4</i>
Vento Longitudinal	-0,85	-0,28	0,41	-0,17
Vento Transversal	-0,36	-0,89	-0,23	0,12
Vazão	-0,85	0,29	-0,37	-0,22
Nível	-0,87	0,36	0,05	0,34
<i>Variância Acumulada (%)</i>	58,25	85,74	94,74	100,00

A matriz de análise fatorial não-rotacionada da análise de componentes apresentou 4 fatores extraídos. O fator 1 da matriz apresenta o melhor resumo de relações lineares entre o nível, a vazão e o vento longitudinal, com cargas fatoriais $\geq -0,85$ e uma variância explicada de 58,25 %. A carga fatorial representa a correlação destas variáveis com o fator, sendo que as maiores cargas tornam a variável mais representativa dentro do fator. O fator 2 desta matriz é definido como a segunda melhor combinação linear das variáveis (85,74%), que explica a maior parte da variância residual.

A solução dos fatores não-rotacionados atinge o objetivo de redução de dados, entretanto pode não fornecer um padrão significativo de cargas das variáveis. Com base neste padrão de cargas fatoriais a interpretação torna-se mais difícil e teoricamente menos significativa, portanto a execução da rotação da matriz fatorial é imprescindível para a redistribuição da variância dos fatores (Hair, 2005). A matriz rotacionada pelo método VARIMAX da análise de componentes principais dos 4 anos agrupados é mostrada na Tabela

5.3. A quantia total de variância extraída é a mesma na solução rotacionada, entretanto a diferença visível foi que o poder explicativo dos fatores foi redistribuído.

Tabela 5.3 - Matriz rotacionada cargas rotacionadas das séries de 1984, 1989, 1991 e 1992.

<i>Rotacionada</i>				
	<i>Fator 1</i>	<i>Fator 2</i>	<i>Fator 3</i>	<i>Fator 4</i>
Vento Longitudinal	0,24	0,27	0,89	0,28
Vento Transversal	0,03	0,98	0,20	-0,02
Vazão	0,91	0,04	0,23	0,36
Nível	0,42	-0,04	0,30	0,86
Variância Acumulada (%)	<i>58,25</i>	<i>85,74</i>	<i>94,74</i>	<i>100,00</i>

De acordo com a regra do Critério de Porcentagem de Variância superior a 95% a estrutura relacional do nível médio, da vazão e do vento longitudinal/transversal é explicada por três fatores latentes. O primeiro fator é representado pela descarga fluvial, com uma carga fatorial de 0,91, e pelo nível, que embora tenha um peso fatorial menor (0,42), sofre uma influência proporcionada pela vazão e, estes dois fatores explicam 58,25% da variância total. O segundo fator com um peso elevado para o vento transversal explica 27,49% da variância total (no total, os dois fatores explicam 85,74%). O terceiro fator é caracterizado pelo vento longitudinal com uma carga fatorial de 0,89 e uma variância de 9%, somando aos outros fatores, a variância total explicada é de 94,74%. Assim, no primeiro fator, a vazão possui a maior carga fatorial, indicando que à medida que a descarga fluvial aumenta ocorre um incremento no nível médio e no terceiro fator é observado que ocorre um acréscimo do nível médio devido ao vento longitudinal.

5.2 CONSTITUINTES HARMÔNICOS.

5.2.1 Constituintes Harmônicos Anuais.

Através do resultado da análise harmônica determinada a partir das séries interanuais, foram prescritas as amplitudes e as fases dos componentes atuantes no estuário da Lagoa dos Patos. As amplitudes dos principais constituintes harmônicos anuais obtidos através das séries temporais de elevação do mar para os períodos de 1984, 1989, 1991 e 1992, são mostradas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Amplitude dos principais constituintes harmônicos anuais obtidos no estuário da Lagoa dos Patos.

	1984		1989		1991		1992	
	<i>Amplitude</i> (cm)	<i>Fase</i> (°)	<i>Amplitude</i> (cm)	<i>Fase</i> (°)	<i>Amplitude</i> (cm)	<i>Fase</i> (°)	<i>Amplitude</i> (cm)	<i>Fase</i> (°)
Q₁	2,55	25,71	2,86	46,61	3,04	32,52	2,82	33,54
O₁	11,46	69,54	10,38	74,59	11,75	68,25	11,35	70,17
P₁	1,40	117,32	1,18	139,43	1,78	121,70	1,46	121,87
K₁	4,64	131,92	3,84	135,49	4,61	127,39	4,36	135,65
N₂	4,81	193,32	3,76	203,96	4,61	189,72	4,53	193,65
M₂	3,10	225,58	2,74	228,29	3,09	227,95	2,70	232,27
S₂	4,14	39,07	3,87	50,53	4,14	36,82	3,99	40,60
K₂	1,80	35,94	1,40	31,93	1,49	24,48	1,74	37,72
MN₄	2,98	79,59	2,12	81,48	2,73	71,58	2,92	78,89
M₄	4,95	115,20	3,52	119,85	5,40	109,06	5,25	115,35
M₆	0,56	220,02	0,32	217,77	0,56	208,70	0,58	218,17
Sa	18,15	85,14	-----	-----	9,60	52,24	13,28	92,56
Ssa	7,02	181,78	7,05	26,10	6,23	176,84	7,07	147,59
Mm	-----	-----	5,65	17,05	-----	-----	-----	-----

A O_1 possui a maior amplitude dos harmônicos diurnos estudados, com uma média de 11,24 cm. A amplitude máxima ocorreu em 1991 (11,75 cm) e a mínima em 1989 (10,38 cm), representando uma variação de 11,66%. As amplitudes médias da Q_1 , da P_1 e da K_1 são 2,82 cm, 1,46 cm e 4,36 cm, respectivamente.

Dos constituintes semidiurnos estudados a N_2 e a S_2 detêm as maiores amplitudes, com amplitudes médias 4,43 cm e 4,04 cm, respectivamente. A M_2 e a K_2 têm amplitudes médias de 2,91 cm e 1,61 cm. As amplitudes máximas das semidiurnas aconteceram em 1984 e as mínimas em 1989, com exceção da M_2 que incidiu em 1992.

Os componentes de origem-não linear MN_4 , M_4 e M_6 possuem amplitudes médias de 2,69 cm, 4,78 cm e 0,51 cm, respectivamente. As amplitudes máximas ocorreram em 1984 para a MN_4 , em 1991 para a M_4 e 1992 para a M_6 e todas as mínimas ocorreram em 1989.

Os harmônicos de longo período Sa e Ssa têm amplitudes médias de 13,68 cm e 6,84 cm e o desvio padrão é de 3,50 cm e 0,35 cm, respectivamente. A ocorrência da amplitude máxima da Sa foi em 1984 (18,15 cm) e a mínima em 1991 (9,60 cm), representando uma variação de 47,11%.

5.2.2 Análise dos Componentes Principais dos Constituintes Harmônicos Mensais.

As intercorrelações existentes entre as variáveis podem explicar um conjunto reduzido de fatores comuns e por um conjunto de fatores específicos que ilustram a variação residual específica de cada variável (Maroco, 2007). A solução dos componentes principais rotacionado pelo método VARIMAX apresentou uma estrutura fatorial em que as variáveis originais foram associadas fortemente ao fator e pouco associadas aos fatores restantes. O critério utilizado para extração dos fatores foi fundamentado no Critério de Porcentagem de Variância com uma variância acumulada explicada de 95% para a obtenção dos fatores (Hair, 2005).

Através da análise dos componentes principais pôde-se identificar a estrutura das relações entre as variáveis, através das correlações existentes entre elas. A análise dos componentes principais dos harmônicos diurnos e semidiurnos apresentaram um total de 188 observações cada e os constituintes não-lineares expôs 141 observações, sendo o mínimo indicado por Hair (2005) é de 100 observações ou 5 vezes mais observações do que o número de variáveis a serem analisadas. O Teste de Esfericidade de Bartlett, que testa a presença de

correlações não-nulas, foi de 0,632, superior ao mínimo de 0,5 indicados por Hair (2005) e Maroco (2007). A medida de adequação de amostra denominada de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que testa o padrão das correlações, foi considerada aceitável ($0,0000 < 0,0001$).

A matriz de análise fatorial rotacionada da análise de componentes principais para os harmônicos Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , MN_4 e M_4 apresentou 11 fatores e 8 deles foram extraídos com uma variância acumulada explicada de 95% (Tabela 5.5). O primeiro fator tem uma carga fatorial significativa de 0,89 para o constituinte K_1 , entretanto a P_1 contribui com um peso de 0,43, sendo que estas duas variáveis explicam 34,21% da variância total. O segundo fator possui dois harmônicos semidiurnos com pesos elevados: a S_2 e a K_2 e explicam 14,17% de variância. Conforme avançam os fatores, o poder de explicação de cada um vai diminuindo, a Tabela 6.5 mostra que o terceiro fator é governado pela N_2 , com uma variação de 11,73% e os fatores 4, 5, 6, 7 e 8 são explicados pelos harmônicos M_6 (9,72%), Q_1 (8,40%), MN_4 (7,83 %), O_1 (5,76 %) e M_2 (3,32%), sendo que estes 8 fatores explicam um total de 95,13% da variância total acumulada.

Tabela 5.5 - Matriz de análise fatorial rotacionada da análise de componentes principais dos componentes harmônicos.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6	Fator 7	Fator 8	Fator 9	Fator 10	Fator 11
Q_1	0,03	0,00	-0,01	0,01	0,99	0,08	0,11	0,09	0,02	-0,03	0,00
O_1	0,01	0,10	0,10	-0,01	0,12	0,07	0,95	0,13	0,18	0,08	0,00
P_1	0,43	0,25	0,16	0,04	-0,05	0,18	0,12	0,11	0,08	0,81	0,00
K_1	0,89	0,09	0,24	0,02	0,05	0,16	0,00	0,18	0,00	0,28	0,00
N_2	0,23	0,09	0,91	0,00	-0,02	0,07	0,12	0,22	0,16	0,12	0,00
M_2	0,20	0,21	0,27	-0,06	0,14	0,10	0,17	0,86	0,17	0,10	0,00
S_2	0,03	0,95	0,09	-0,05	0,04	0,07	0,12	0,17	0,15	0,08	0,13
K_2	0,09	0,98	0,02	-0,02	-0,03	-0,03	0,01	0,04	0,03	0,11	-0,11
MN_4	0,14	0,01	0,06	-0,06	0,09	0,95	0,07	0,07	0,20	0,12	0,00
M_4	0,01	0,16	0,17	0,10	0,02	0,23	0,21	0,15	0,90	0,06	0,00
M_6	0,02	-0,05	0,00	0,99	0,01	-0,05	-0,01	-0,04	0,07	0,02	0,00
Variância (%)	34,21	14,17	11,73	9,72	8,40	7,83	5,76	3,32	2,82	1,81	0,24

5.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES HARMÔNICOS MENSAIS, DO NÍVEL MÉDIO E DA DESCARGA FLUVIAL.

Neste item serão apresentadas a sumarização das características das distribuições de frequências dos harmônicos diurnos, semidiurnos, nível médio e descarga fluvial das 4 séries agrupadas e, que têm o objetivo de quantificar alguns aspectos sobre seus comportamentos. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os histogramas e as médias móveis da elevação do nível e da descarga fluvial, assim como, dos componentes estudados: O_1 , K_1 , M_2 e S_2 , do.

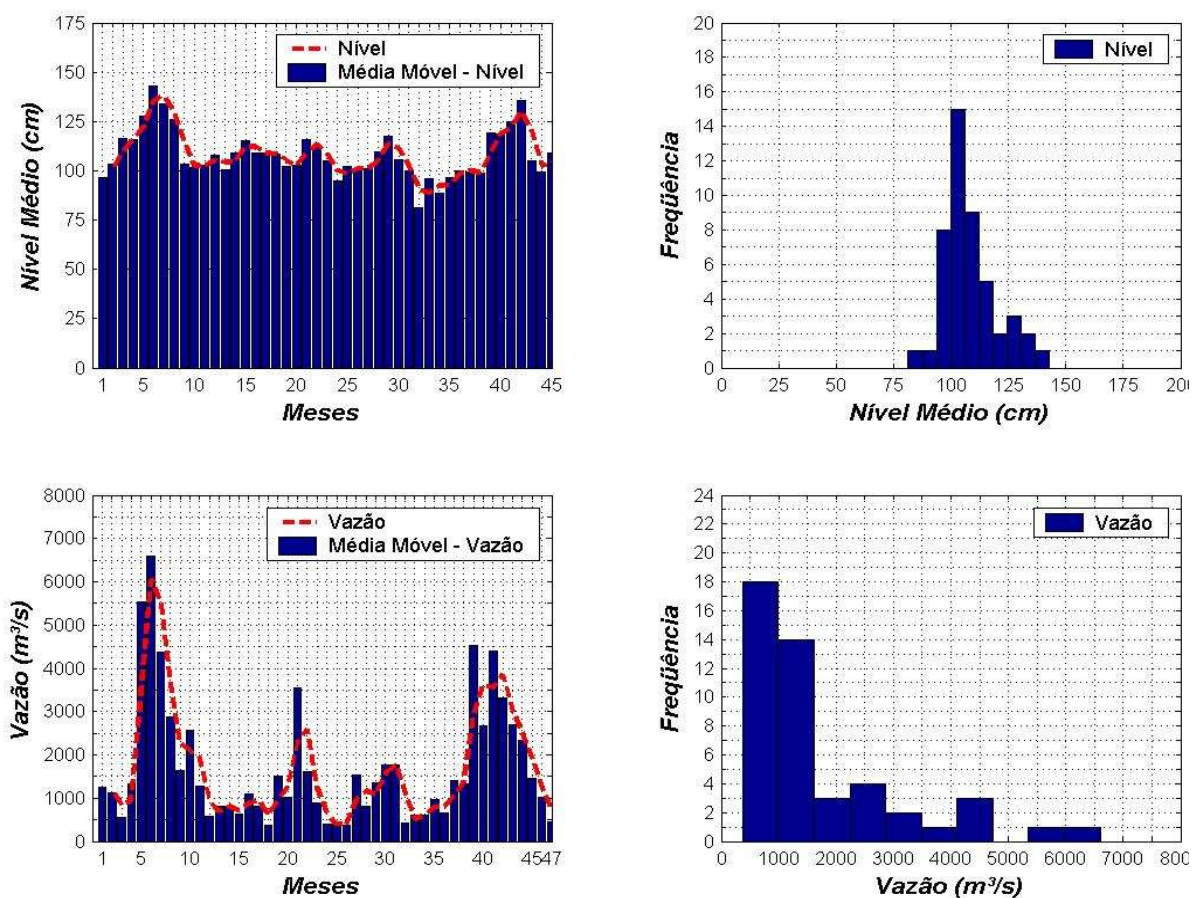


Figura 5.3 - Histogramas e médias móveis dos componentes harmônicos do nível médio e da descarga fluvial

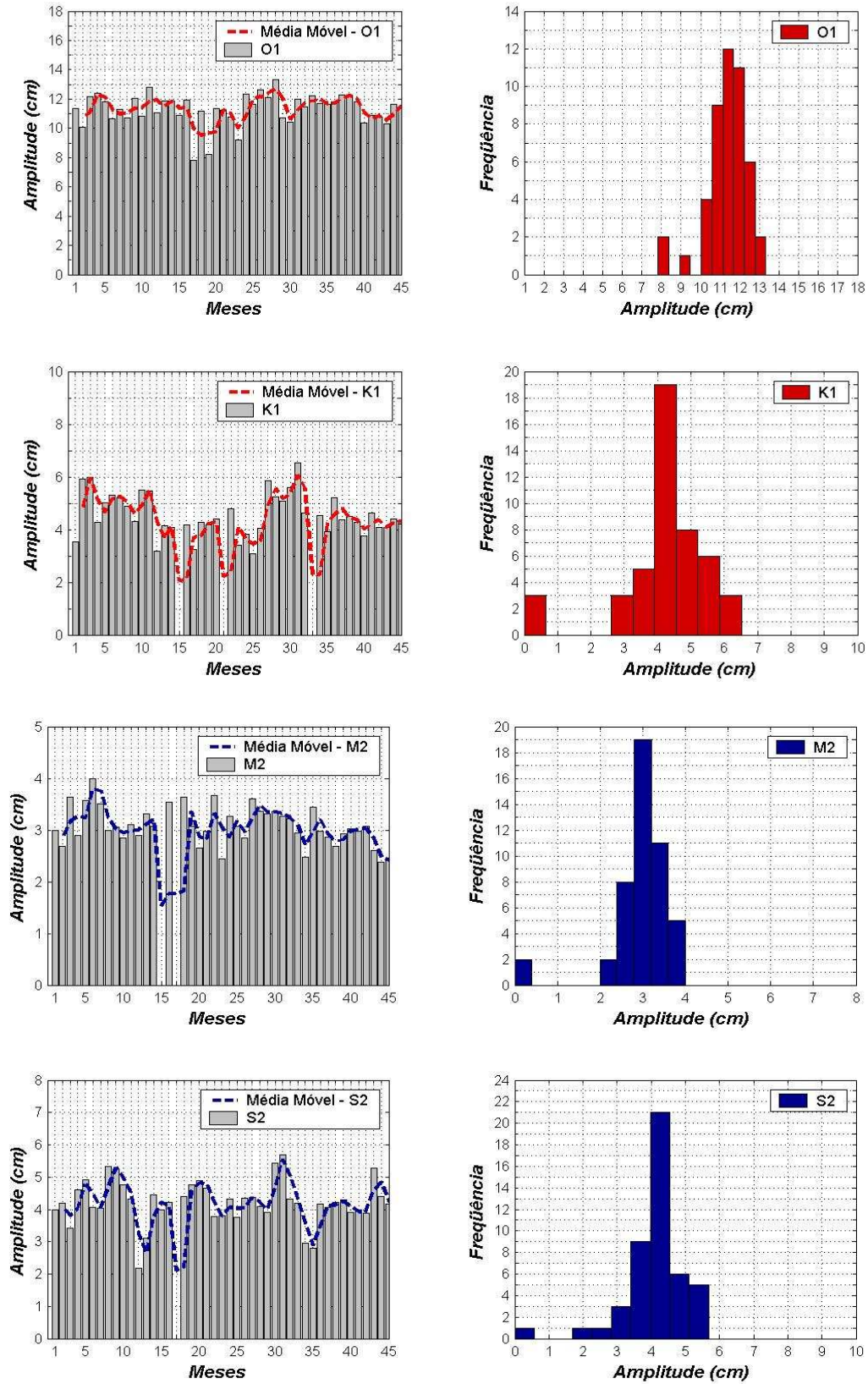


Figura 5.4 - Histogramas e médias móveis dos componentes harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 .

A média, a mediana e a moda são as três medidas de posição mais utilizadas para resumir o conjunto de valores representativos (Costa Neto, 2002). Também denominadas medidas de tendência central, em virtude da tendência dos dados observados se agruparem em torno desses valores centrais, são complementadas pelas medidas de dispersão que caracterizam a dispersão (amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação) dos dados em torno da região central (Costa Neto, 2002). Os resultados são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Análise estatística dos harmônicos estudados (O_1 , K_1 , M_2 e S_2), do nível médio e da descarga fluvial.

	O_1	K_1	M_2	S_2	<i>Nível Médio</i>	<i>Descarga Fluvial</i>
<i>Média</i>	11,33	4,24	2,92	4,09	107,97	1704,26
<i>Mediana</i>	11,49	4,30	2,99	4,19	105,13	1274,60
<i>Moda</i>	11,65	4,09	2,98	4,33	**	**
<i>Amplitude</i>	5,49	6,52	4,00	5,68	61,41	6222,97
<i>Desvio Padrão</i>	1,05	1,36	0,74	0,92	12,16	1443,80
<i>Coef. Variação</i>	0,09	0,32	0,25	0,22	0,11	0,85

A Figura 5.5 mostra o desvio médio obtido para o nível médio, para a descarga fluvial e para os ventos longitudinais e transversais durante o período de 1984. Desvios positivos são observados para a descarga fluvial no período compreendido entre maio a agosto e para o mês de outubro e para o nível médio foi constatado entre os meses de março a abril. Observam-se desvios negativos para o vento longitudinal entre abril a agosto de 1984, assim como no mês de fevereiro. O comportamento do vento transversal mostra um predomínio de ventos do quadrante Leste, apresentando uma maior quantidade de desvios positivos.

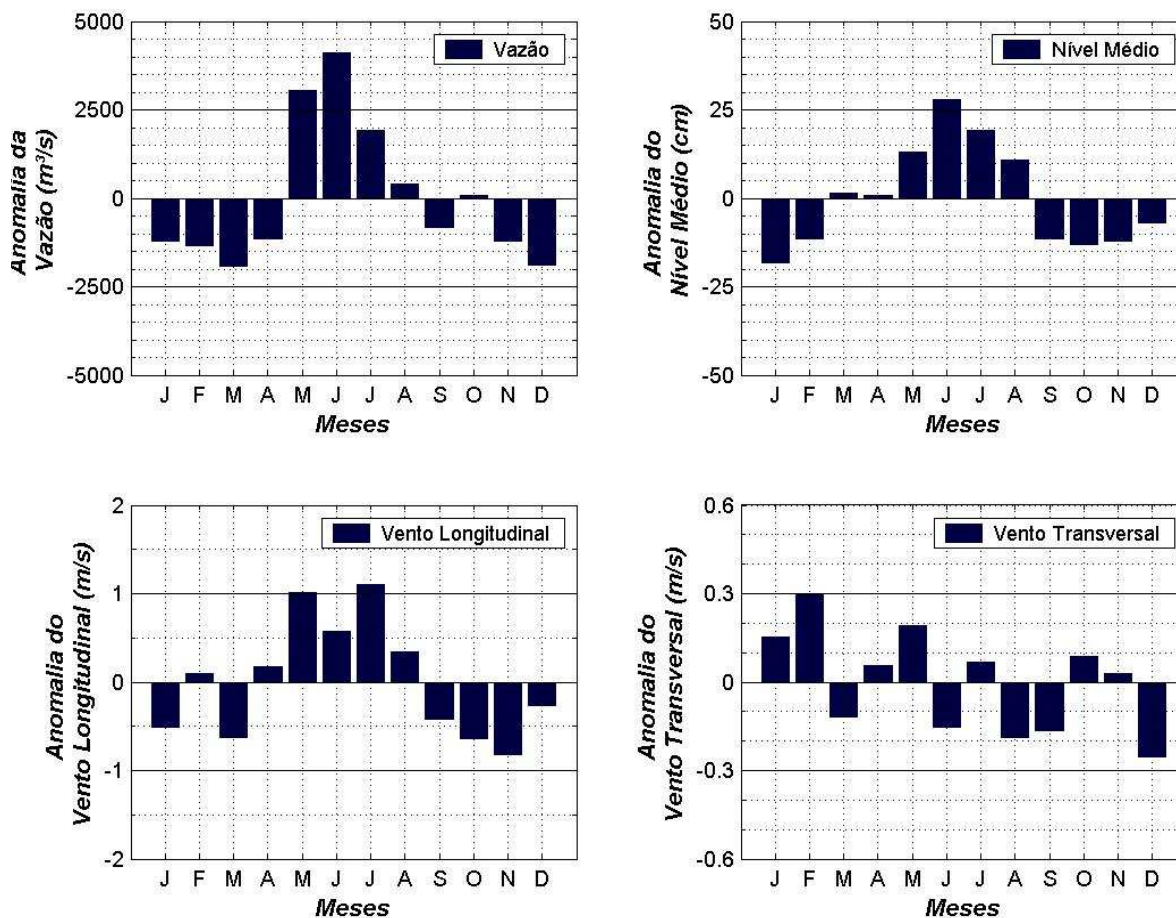


Figura 5.5 - Desvio médio obtido para a elevação do nível, para a descarga fluvial e para os ventos longitudinais e transversais durante o período de 1984.

A Figura 5.6 apresenta um gráfico de barras para as componentes diurnas O_1 , K_1 e semidiurnas M_2 e S_2 , construídos a partir dos desvios médios oriundos das suas respectivas amplitudes para a série de 1984. Para a O_1 é verificado um predomínio de amplitudes no eixo negativo do gráfico e para a K_1 e M_2 , ocorre um predomínio de desvios positivos. Em relação a S_2 , os desvios obtidos possuem uma ordem de grandeza muito pequena, com destaque para o mês de dezembro, que teve um resultado de aproximadamente 0,50 cm.

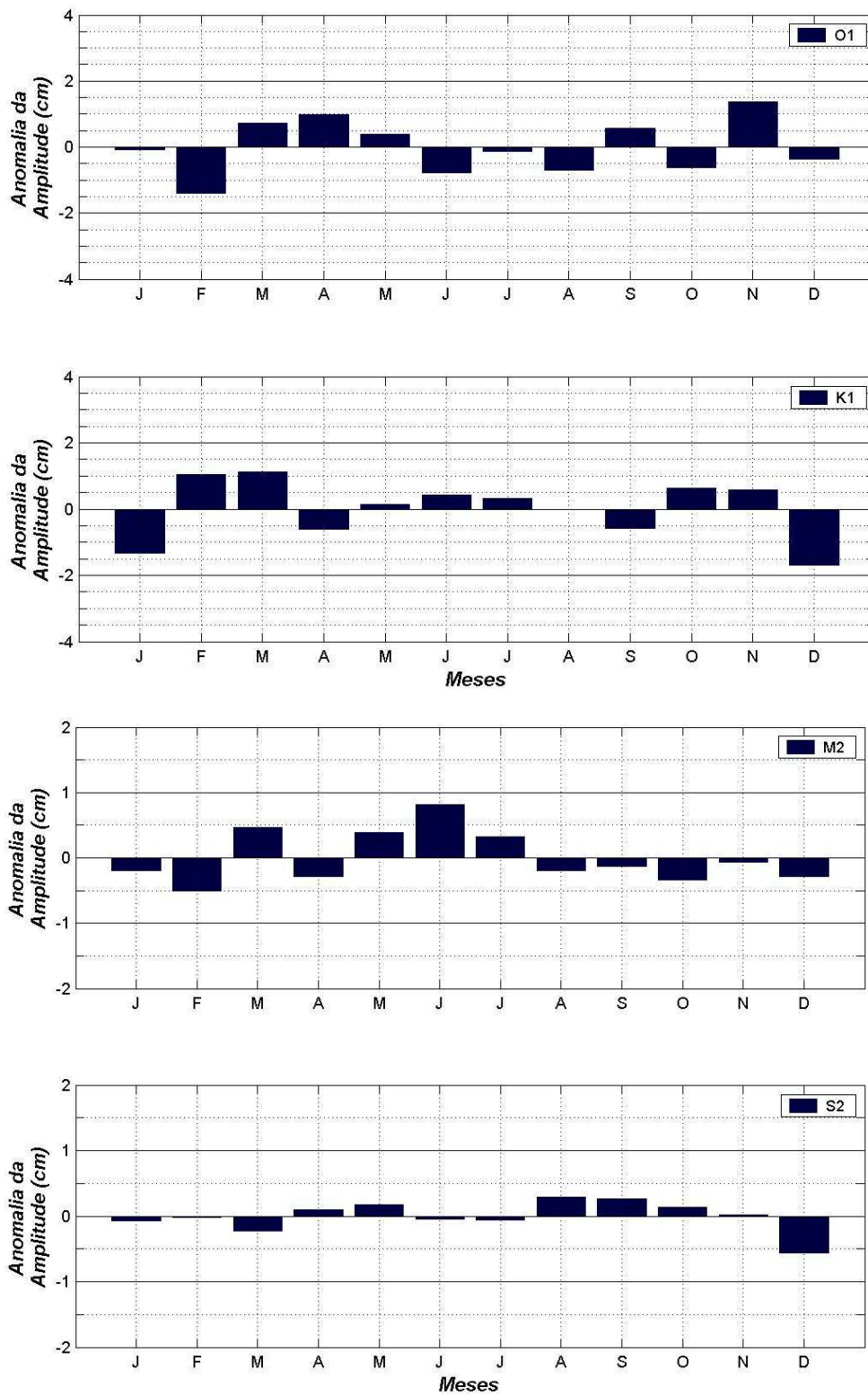


Figura 5.6 - Desvio médio obtido para os componentes harmônicos estudados durante o período de 1984.

As Figuras 5.7, 6.8 e 6.9 apresentam diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios, tendo como variável dependente as amplitudes dos harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 e como variáveis predictoras a descarga fluvial e o nível médio, com enfoque no ano de 1984. Pode-se verificar que os aumentos da descarga fluvial e do nível médio promovem uma diminuição da amplitude da O_1 . Observa-se que existe uma influência da vazão e do nível médio sobre a K_1 , promovendo aumentos na amplitude conforme aumenta o escoamento e o nível médio.

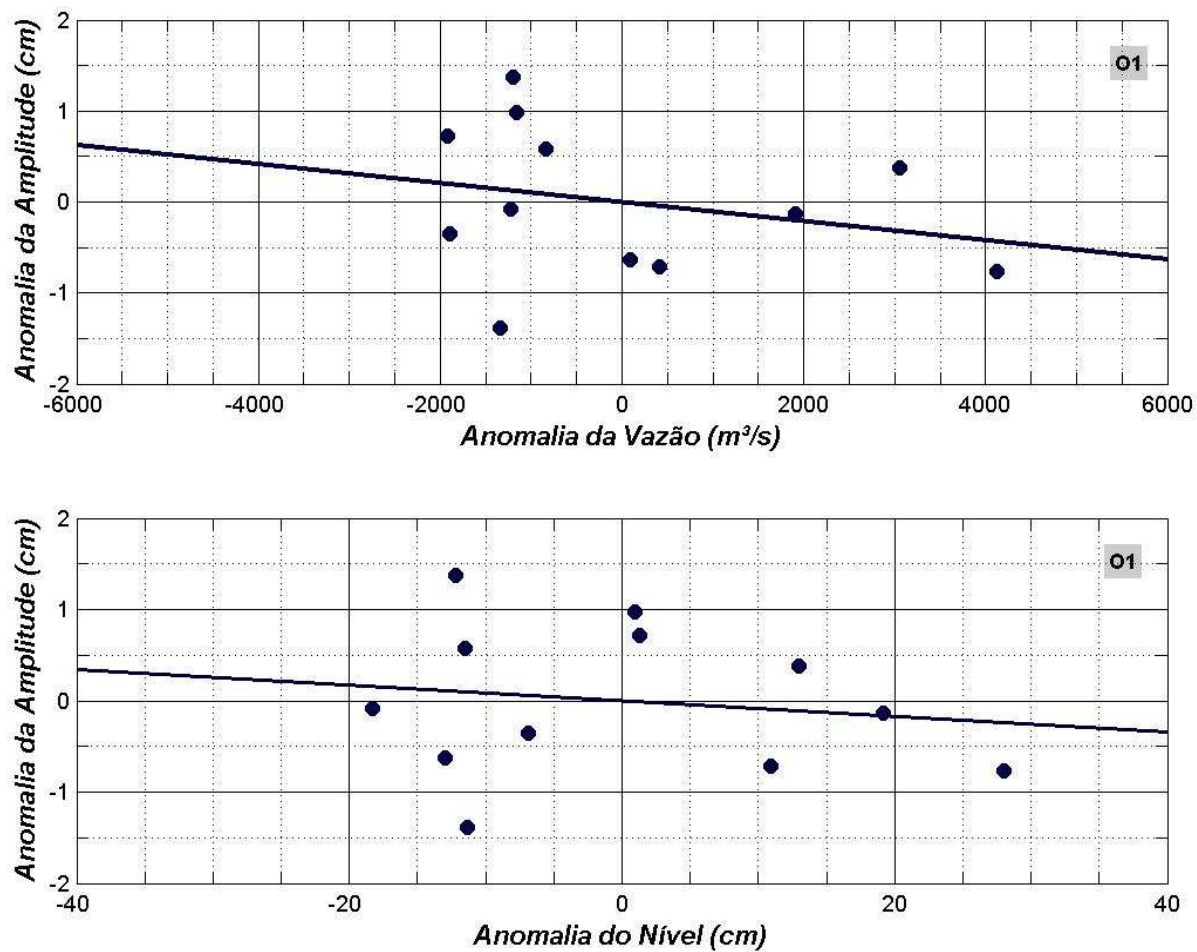


Figura 5.7 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da O_1 , da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.

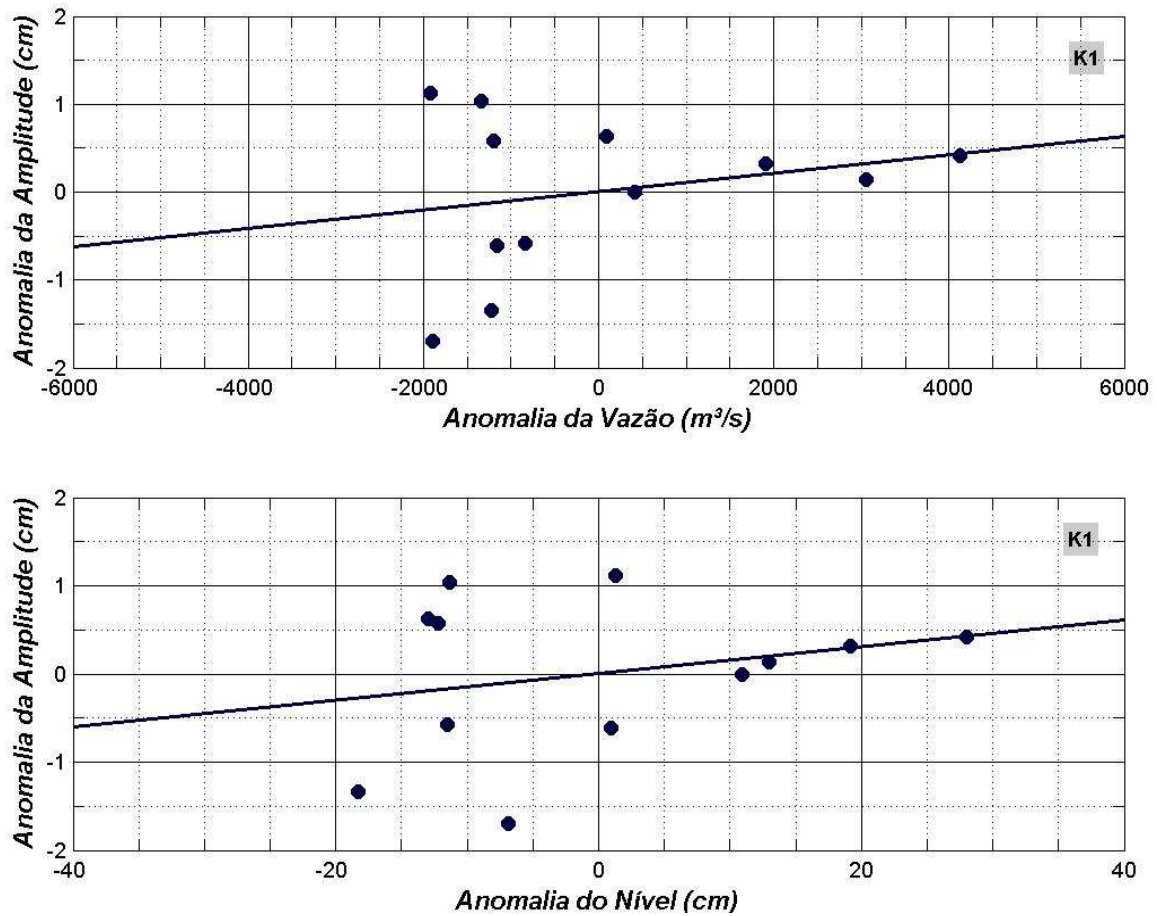


Figura 5.8 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da K₁, da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.

O harmônico semidiurno M₂ apresentou a melhor relação direta com o nível médio e com a descarga fluvial, mostrando que aumentos de fluxo e de elevação média acarretam em aumentos na amplitude, embora o vento longitudinal também influencie o seu comportamento. Através da Figura 6.9, observa-se que não existe relação entre a S₂ e o nível médio e que a variação do escoamento não interfere significativamente no comportamento desta semidiurna.

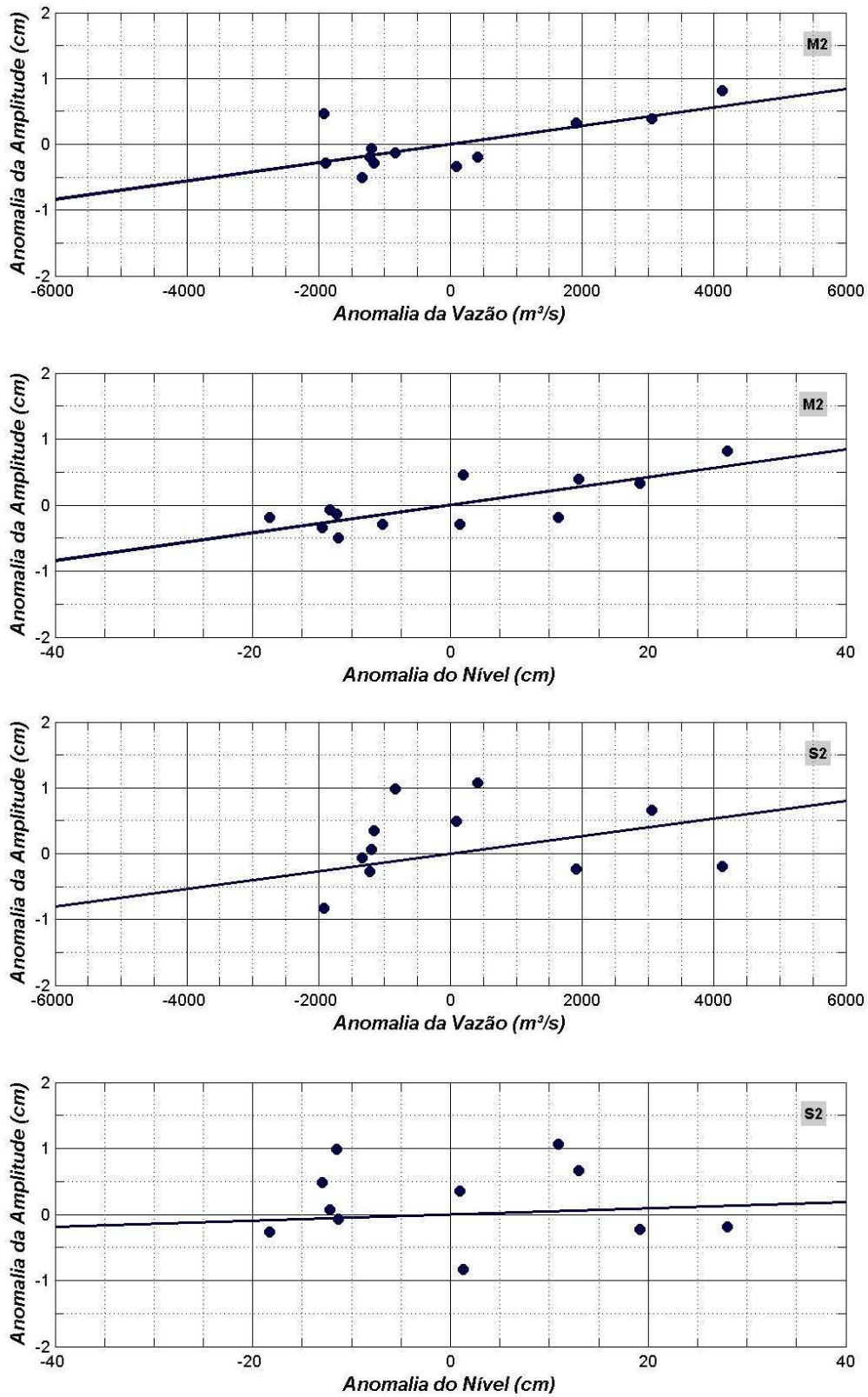


Figura 5.9 - Diagramas de dispersão das anomalias obtidas através dos desvios médios da M_2 e S_2 , da descarga fluvial e do nível médio para o ano de 1984.

As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam as correlações e as medidas de tendência central existentes entre os harmônicos e o nível médio, a descarga fluvial e ventos para o ano de 1984. O coeficiente de correlação de Pearson mede a aderência do ajuste à reta através da relação existente entre as variáveis dependentes e preditoras. Foi observada uma maior qualidade de ajustamento da reta, proposta aos pontos de dispersão, para a M_2 em relação ao nível médio ($r = 0,77$).

Tabela 5.7 - Correlações existentes entre os harmônicos e o nível médio, a descarga fluvial e ventos para o ano de 1984.

	<i>Nível Médio</i> (cm)	<i>Descarga Fluvial</i> (m ³ /s)	<i>Vento Longitudinal</i> (m/s)	<i>Vento Transversal</i> (m/s)
O_1	-0,15	-0,26	-0,24	-0,08
K_1	0,25	0,24	0,03	0,21
M_2	0,77	0,24	0,03	0,21
S_2	0,08	0,24	0,03	0,21

Tabela 5.8 - Medidas de tendência central existentes entre os harmônicos e o nível médio, a descarga fluvial e ventos para o ano de 1984.

	<i>Amplitudes (cm)</i>			
	O_1	K_1	M_2	S_2
<i>Média</i>	11,44	4,88	3,18	4,26
<i>Mediana</i>	11,34	5,11	3,02	4,26
<i>Amplitude</i>	2,76	2,82	1,32	3,14
<i>Desvio Padrão</i>	0,82	0,89	0,40	0,86
<i>Coef. Variação</i>	13,94	5,47	7,92	4,97

	<i>Forçantes</i>			
	<i>Nível Médio (cm)</i>	<i>Descarga Fluvial (m³/s)</i>	<i>Vento Longitudinal (m/s)</i>	<i>Vento Transversal (m/s)</i>
<i>Média</i>	114,82	2474,60	-0,65	0,00
<i>Mediana</i>	111,83	1477,50	-0,75	0,05
<i>Amplitude</i>	46,28	6039,95	1,93	0,55
<i>Desvio Padrão</i>	14,78	2004,03	0,68	0,18
<i>Coef. Variação</i>	7,77	1,23	-0,95	0,02

Para verificar a influência da descarga fluvial sobre os componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 , foram selecionadas 12 séries de nível médio divididas nos anos de 1984, 1991 e 1992 (Tabela 5.9) e compostas por um período mínimo de 30 dias e um máximo de 103 dias. A escolha das séries de nível foi fundamentada na intensidade do fluxo de água doce, sendo que cada uma sofreu um atraso de 15 dias em relação ao ponto referente às séries da vazão, visto que as alterações sofridas pelo nível médio em função da descarga fluvial levam aproximadamente 15 dias para ocorrer (Möller et al., 2007). Cada série foi submetida a uma análise harmônica para posterior diagnóstico do comportamento da amplitude dos constituintes estudados. A Figura 5.10 apresenta as médias móveis da descarga fluvial e do nível médio dos anos de 1984, 1991 e 1992.

Tabela 5.9 - Períodos utilizados para examinar a interferência da descarga fluvial sobre os componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 .

	<i>Período Analisado</i>	
	<i>Início</i>	<i>Término</i>
Série 1	30/03/1984	22/04/1984
Série 2	16/04/1984	09/05/1984
Série 3	05/06/1984	28/06/1984
Série 4	22/08/1984	26/09/1984
Série 5	16/04/1984	16/09/1984
Série 6	09/05/1984	13/06/1984
Série 7	22/06/1984	21/07/1984
Série 8	16/01/1991	28/04/1991
Série 9	09/04/1991	08/05/1991
Série 10	08/05/1991	06/06/1991
Série 11	05/04/1992	04/05/1992
Série 12	04/05/1992	02/06/1992

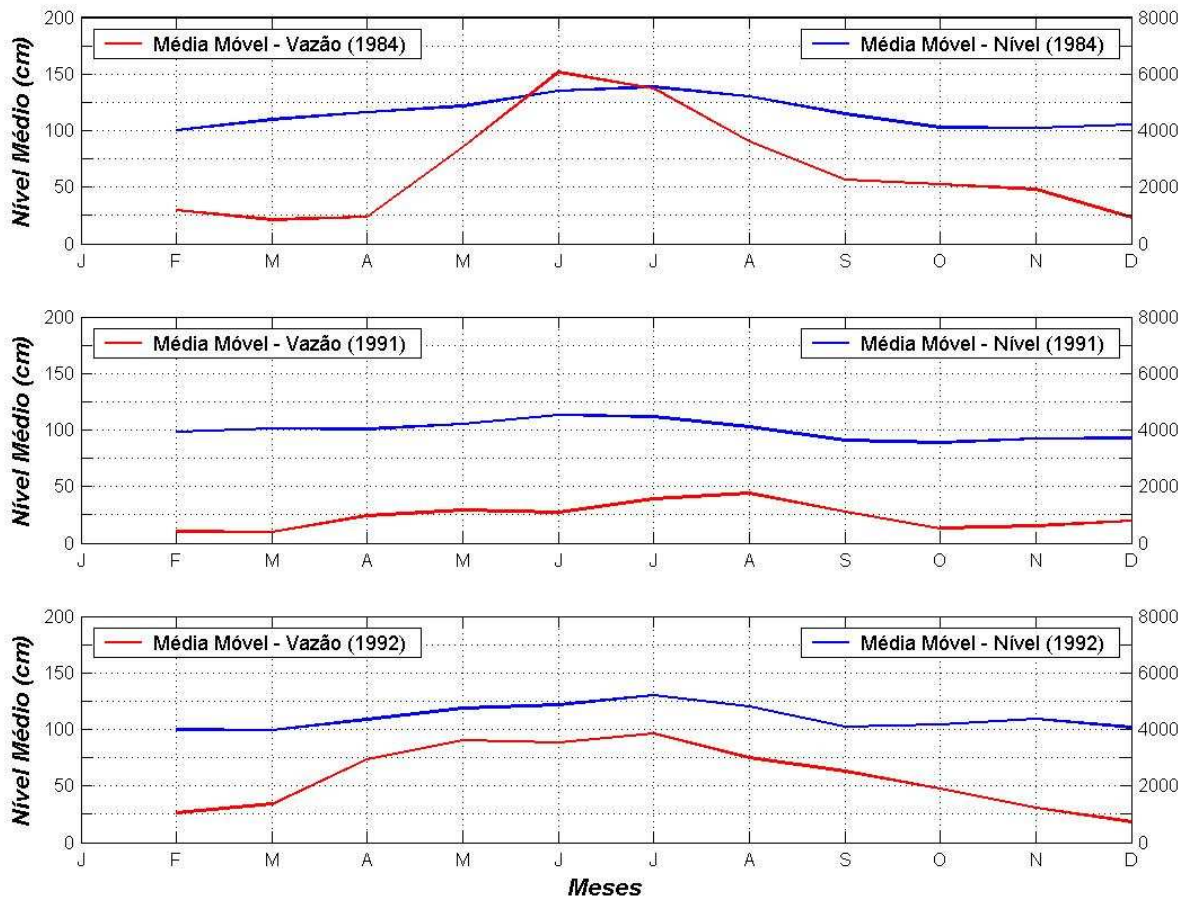


Figura 5.10 - Médias móveis da descarga fluvial e do nível médio dos anos de 1984, 1991 e 1992.

Analisando a Figura 5.11, observa-se que os aumentos do nível médio e da descarga fluvial influenciam na redução da amplitude da O_1 . A análise qualitativa destes resultados apresentou um melhor ajuste da componente M_2 , quando relacionado com a descarga fluvial e ao nível médio, proporcionando aumentos na amplitude, conforme aumenta o fluxo de água doce. É possível constatar que existe uma influência da vazão sobre a S_2 , mostrando que as variações da amplitude deste harmônico podem ser devido aos períodos de escoamento mais intenso.

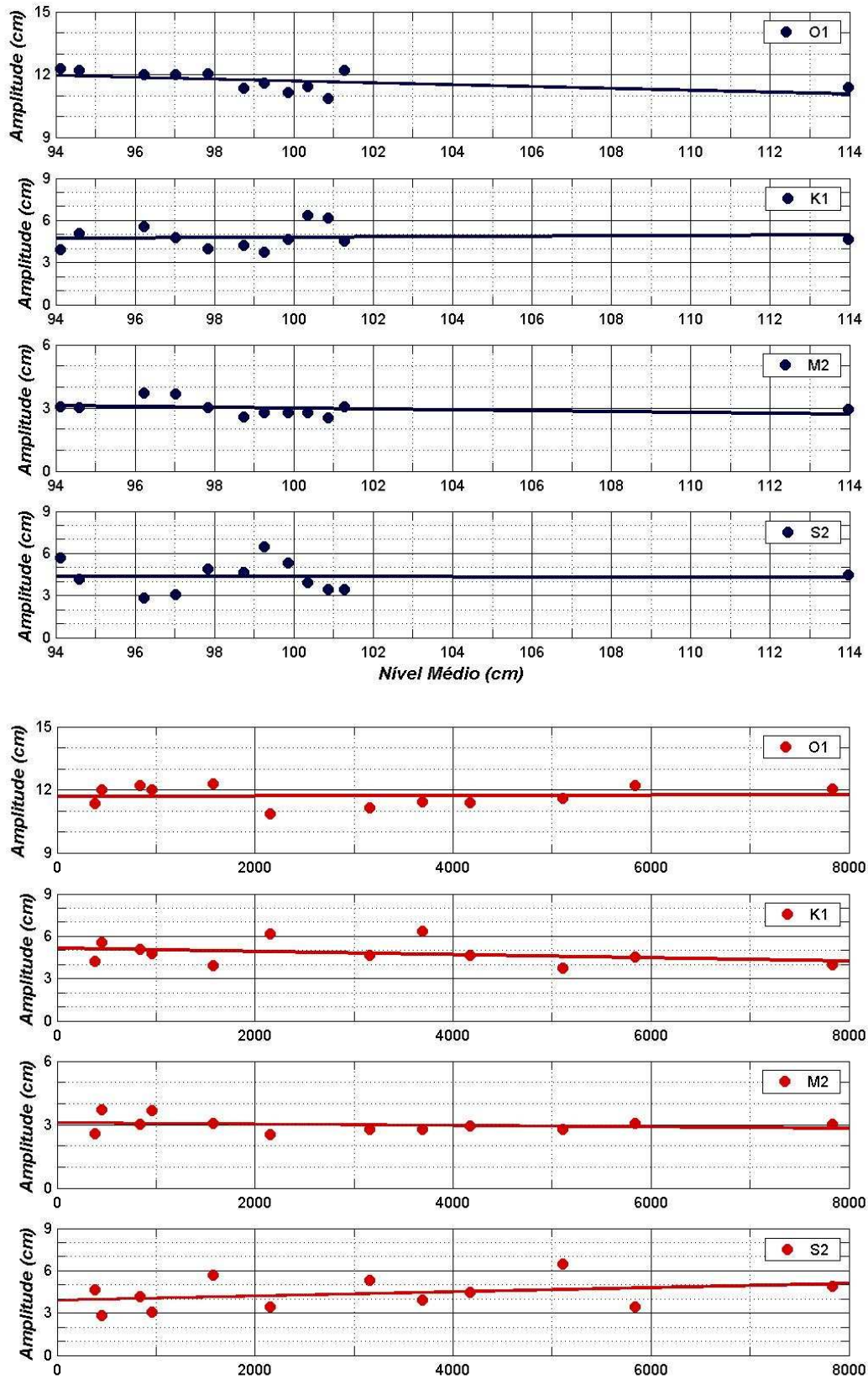


Figura 5.11 - Diagramas de dispersão obtidos através da análise das séries estudadas.

5.4 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA ENTRE OS CONSTITUINTES HARMÔNICOS MENSAIS E AS SÉRIES DE DESCARGA FLUVIAL, NÍVEL MÉDIO E VENTOS.

O objetivo da análise da regressão múltipla é prever uma única variável dependente a partir do conhecimento de uma ou mais variáveis independentes. Cada variável independente é ponderada pelo procedimento da análise da regressão e os pesos denotam a contribuição relativa das variáveis independentes para a previsão geral. A análise de regressão múltipla pelo método *Stepwise* utilizada neste trabalho empregou os harmônicos diurnos, semidiurnos e não-lineares como variáveis dependentes e, devido à multicolinearidade existente entre as variáveis independentes estudadas (nível médio nível médio, descarga fluvial e ventos longitudinais/transversais), fez uso dos escores fatoriais obtidos através da análise dos componentes principais rotacionados pelo método VARIMAX para as quatro séries estudadas (1984, 1989, 1991 e 1992).

As variáveis independentes são descritas por três fatores latentes. O primeiro fator é explicado pela vazão e pelo nível, o segundo fator apresenta o vento transversal como a variável que possui o maior peso fatorial e o terceiro fator é representado pelo vento longitudinal. A amostra em estudo possui três variáveis independentes com 47 observações cada e é capaz de detectar relações com os valores do coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 12% a um poder de 0,80 com um nível de significância fixado em 0,05. A amostra de 47 observações também atende a orientação proposta por Hair (2005) para que a estimação tenha uma razão de observações por variável independente de aproximadamente 50 para 1.

5.4.1 Regressão Linear Múltipla dos Principais Harmônicos Diurnos e Semidiurnos.

A Figura 5.12 apresenta um gráfico de barras com as anomalias da descarga fluvial, do nível médio e do vento longitudinal e transversal das 4 séries agrupadas. As séries de 1989 e 1991 possuem uma predominância de períodos inferior à média, visto que são considerados anos secos, ao contrário dos anos de 1984 e 1992, caracterizados por intensa descarga fluvial.

As Figuras 5.13 (a) e 5.13 (b) apresenta as anomalias de amplitude dos componentes O_1 , K_1 , M_2 e S_2 .

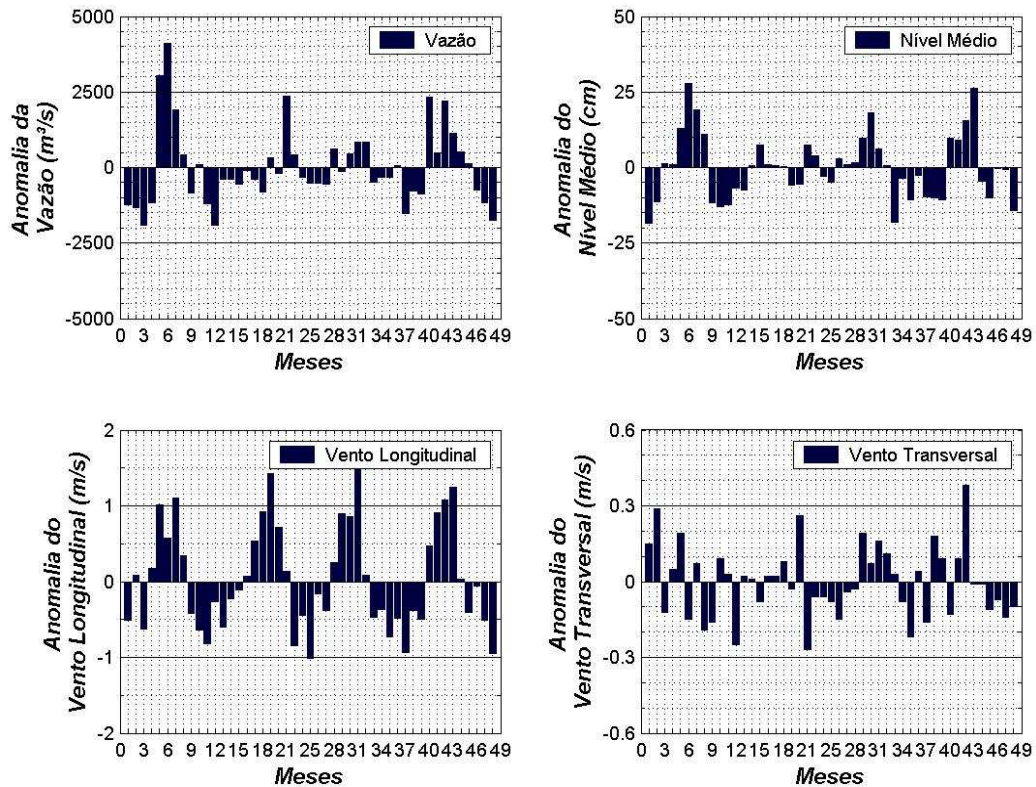


Figura 5.12 - Anomalias da descarga fluvial, do nível médio e do vento longitudinal e transversal dos anos de 1984, 1989, 1991 e 1992.

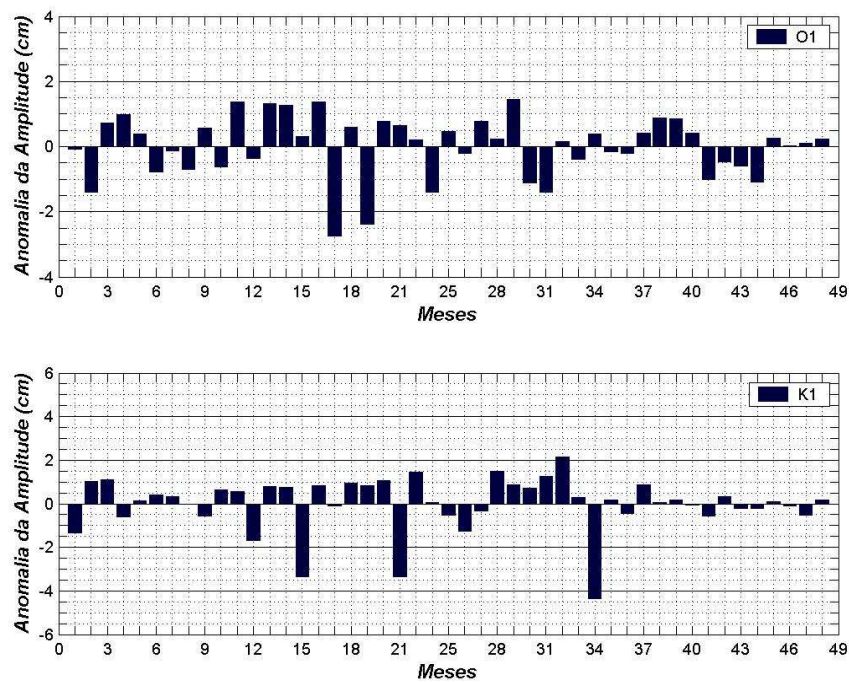


Figura 5.13 (a) - Anomalias de amplitude dos componentes diurnos e semidiurnos (O_1 e K_1).

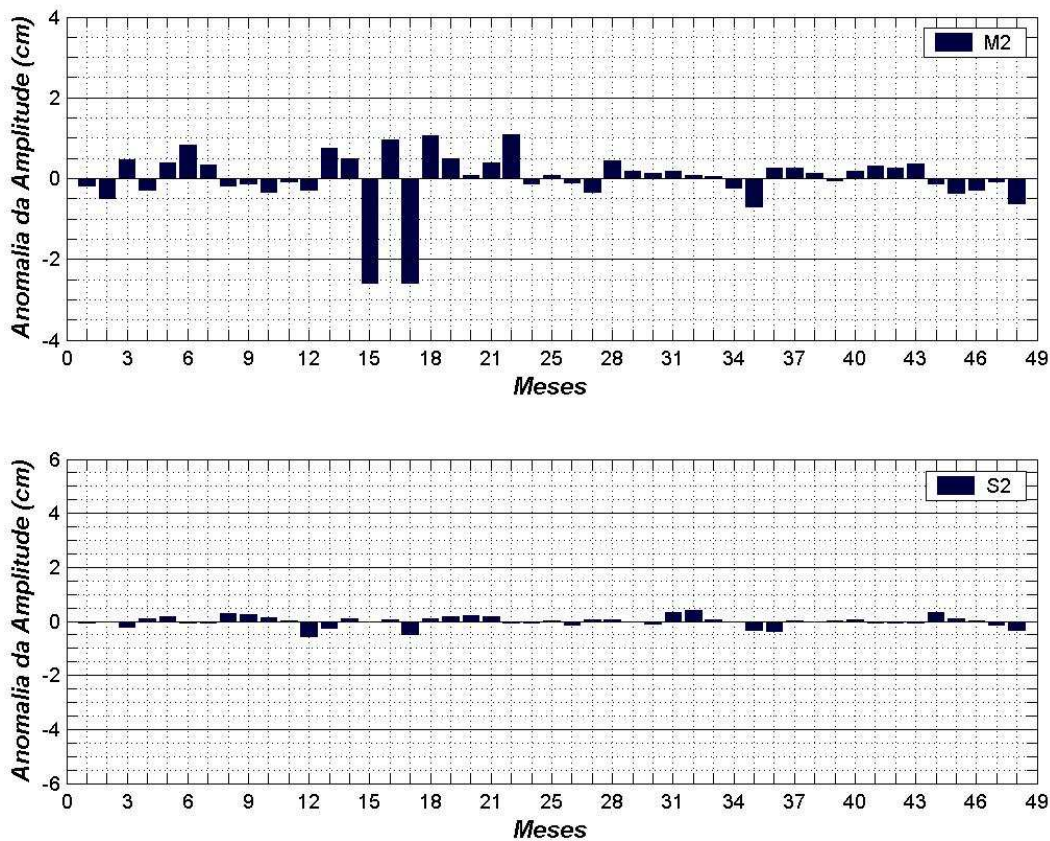


Figura 5.13 (b) - Anomalias de amplitude dos componentes diurnos e semidiurnos (M_2 e S_2).

O entendimento dos tipos de relações existentes entre as variáveis associadas a um processo contribui para aumentar a eficiência dos métodos de controle do processo em questão (Costa Neto, 2002). O diagrama de dispersão dos harmônicos O_1 , K_1 , M_2 e S_2 são mostrados nas Figuras 5.14 e 5.15, em que os valores de y indicam as anomalias das amplitudes destes harmônicos e os valores de x fazem referência às anomalias do nível médio, da descarga fluvial e dos ventos longitudinal e transversal para as quatro séries reunidas.

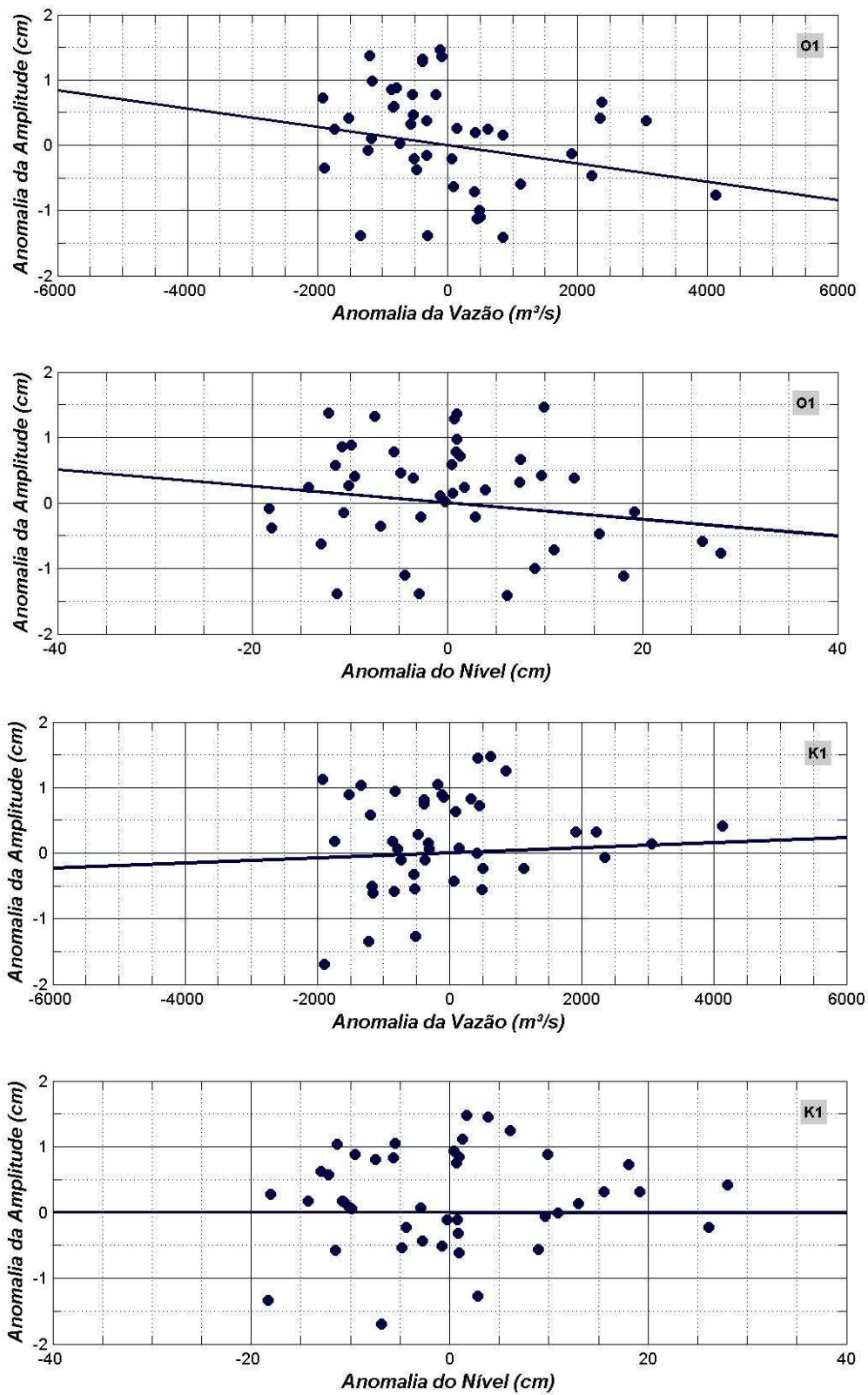


Figura 5.14 - Diagramas de dispersão das anomalias das amplitudes dos componentes O₁, e K₁, da vazão e do nível médio.

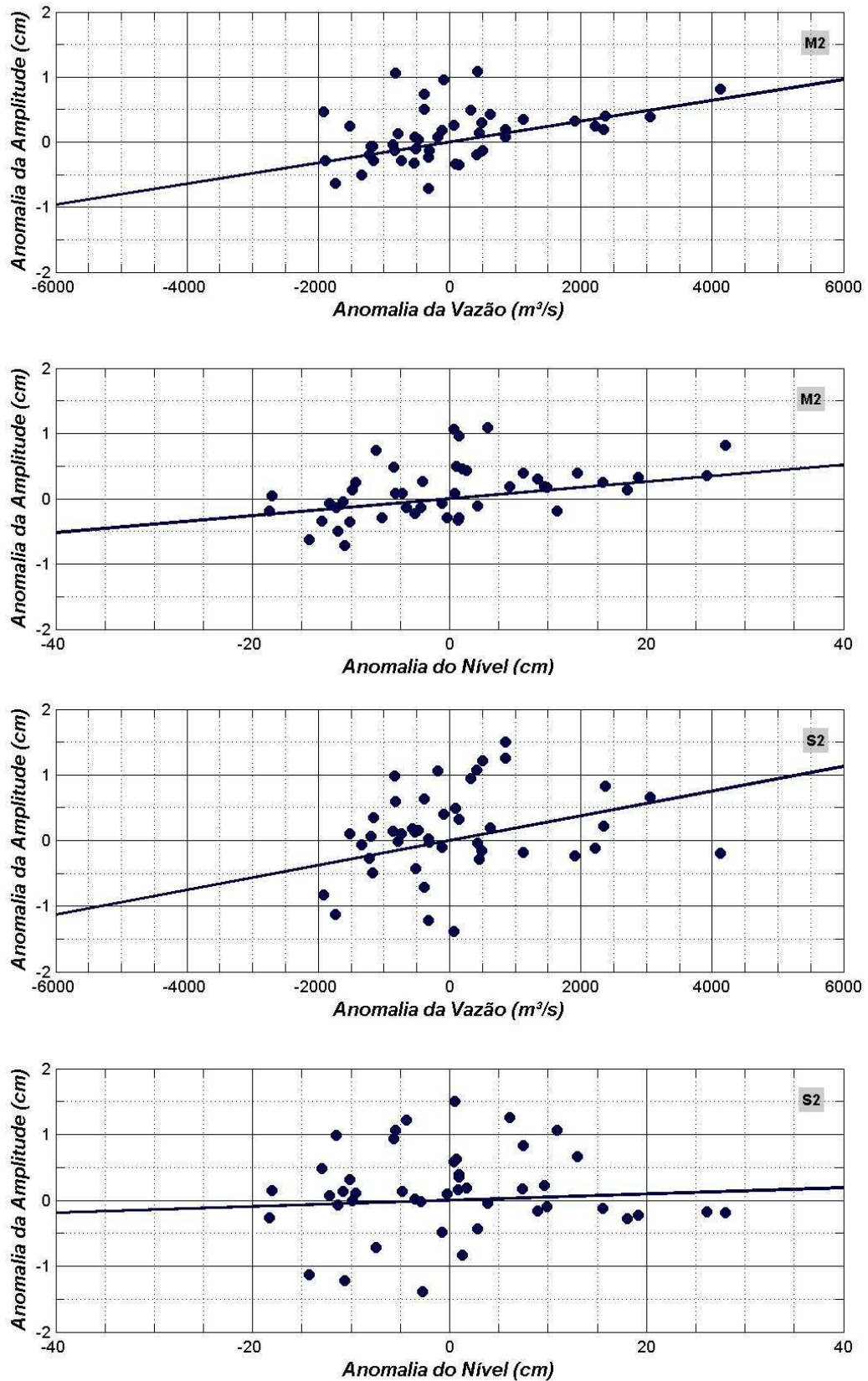


Figura 5.15 - Diagramas de dispersão das anomalias das amplitudes da M₂, e S₂, da vazão e do nível médio.

O padrão evidenciado nos diagramas de dispersão forneceu informações sobre o tipo de relacionamento existente entre as variáveis consideradas. Os pontos dos diagramas de dispersão mostrados nas Figuras 6.14 e 6.15 referentes à descarga fluvial indicam a existência de uma correlação linear negativa para O_1 e correlações positivas para K_1 , M_2 e S_2 . A amostra forneceu uma correlação total para a O_1 de -0,14 para os quatro anos agrupados, entretanto ocorre uma oscilação desta correlação, variando de 0,03 em 1989 a -0,44 em 1991 e 1992. A K_1 também apresenta uma relação baixa com a vazão ($r = 0,15$) com correlações variando positivamente (1984 e 1991) e negativamente (1989 e 1992) em cada série analisada. Os harmônicos semidiurnos M_2 e S_2 apresentaram um melhor relacionamento monotônico com o fluxo de água doce ($r = 0,27$) e, embora a correlação total tenha não tenha sido expressiva para a M_2 , a análise individual das séries apontou uma correlação superior a 0,50, com exceção de 1989. A S_2 apresentou relações particulares acima de 0,30 para as séries, alcançando uma correlação de 0,50 em 1991.

Conforme se observa na Figura 6.14, a distribuição da nuvem de pontos entre a O_1 e o nível médio foi estatisticamente mais significativa e também apresenta tendência de comportamento decrescente, com uma correlação total obtida de -0,33. Durante o ano de 1992 foi constatada uma maior evidência desta relação ($r = -0,61$) e a ano de 1989 apresentou a segunda melhor correlação ($r = -0,41$). Embora a correlação de Pearson obtida para a K_1 tenha sido inexpressiva ($r = 0,11$) é importante ressaltar que durante as séries de 1991 e 1992 as relações possuíram o mesmo valor absoluto ($r = 0,42$) e sentidos opostos, nas séries restantes o comportamento não foi estatisticamente significativo. O vento longitudinal intervém de forma menos expressiva no comportamento da S_2 com uma correlação total para estas duas variáveis de 0,20, sendo a série de 1991 responsável pela maior relação individual obtida ($r = 0,45$). A presença da relação causa-efeito entre os harmônicos K_1 e S_2 e o vento transversal foram as mais evidentes, com correlações totais obtidas de 0,33 e 0,18, respectivamente. A resposta individual das séries apresentou melhores resultados em 1991, com correlações de 0,51, 0,67 e 0,52 para a K_1 , M_2 e S_2 , respectivamente.

O diagrama de dispersão construído de forma que o eixo horizontal representa a anomalia do nível médio e o eixo vertical representa a anomalia da amplitude, formaram um padrão de agrupamento, indicando uma relação negativa para a O_1 ($r = -0,14$) e positiva para a K_1 ($r = 0,15$), M_2 ($r = 0,26$) e S_2 ($r = 0,27$). A interpretação particular das séries apresentou uma maior correlação para a M_2 , com comportamentos positivos em 1984 ($r = 0,77$), 1991 ($r = 0,39$) e 1992 ($r = 0,66$) e negativos em 1989 ($r = -0,31$). A associação dos harmônicos diurnos com o nível médio também oscilou no que tange o comportamento, sendo detectados

crescimentos negativos para a O_1 em todos os anos, com exceção de 1989, a correlação máxima obtida ocorreu em 1992 ($r = -0,56$) e a K_1 com correlações positivas observadas em 1984 ($r = 0,25$) e 1991 ($r = 0,24$) e negativas em 1989 ($r = -0,69$) e 1992 ($r = -0,37$).

Na tentativa de realizar a construção de um modelo matemático que expresse a relação de tipo linear existente entre duas variáveis, tendo por base os valores correspondentes amostrais por meio de uma equação simples foi efetuada a regressão linear múltipla entre os principais componentes harmônicos (O_1 , K_1 , M_2 e S_2) e os escores fatoriais rotacionados do nível médio, da descarga fluvial e dos ventos longitudinais e transversais. A Tabela 6.10 apresenta um sumário do modelo de regressão linear entre o constituinte diurno O_1 (variável dependente) e os escores fatoriais do nível médio, da descarga fluvial e dos ventos longitudinal e transversal, utilizados como variáveis predictoras. A estimação do modelo determinou que as observações que influenciam a O_1 estão contidas no Fator 3, explicado pelo vento longitudinal, e propõe a seguinte equação:

$$O_1 = 11,33 - 0,37 * Fator\ 3 \quad (5.1)$$

O coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), considerado uma medida relativa de qualidade de ajustamento, apresentou um valor de 0,10, ou seja, 10 % da variação que ocorre na O_1 é devido ao vento longitudinal, sendo a variação restante (90 %) é explicada por outros fatores não especificados e que estão incluídas no resíduo. A qualidade de ajustamento da regressão também deve ser analisada através dos testes de inferência estatística, que permitem o conhecimento das relações entre a variável dependente e o conjunto das variáveis independentes, esta análise é feita através. O F_{teste} consiste na razão entre a variância explicada pela regressão e a variância não-explicada e está calculado no quadro da Análise da Variância (Tabela 5.10) como sendo 6,21 e o $F_{crítico}$, obtido através da tabela da *Distribuição F*, foi de 4,06. Como $F_{teste} = 6,21 > F_{crítico} = 4,06$, implica na região de rejeição do teste, então rejeita-se a hipótese nula de que $R^2=0$ e por conseguinte considera-se que a regressão como um todo é significativa. Outra forma para julgar o resultado do *Teste F*, seria a utilização do *Valor p* e observa-se que o *Valor F* de significância 0,02, o que é muito menor que o nível de significância do teste de 0,05, o que novamente conduz à rejeição da hipótese nula.

Tabela 5.10 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico O₁.

R Múltiplo	0,35					
R ² Múltiplo	0,12					
R ² Ajustado	0,10					
Erro Padrão de Estimativa	0,99					
Análise da Variância						
	Soma dos Quadrados	DF	Quadrado Médio	Razão F	Valor p	
Regressão	6,13	1,00	6,13	6,21	0,02	
Resíduo	44,42	45,00	0,99			
Variáveis na Equação						
Variáveis	Beta	Erro padrão de Beta	B	Erro padrão de B	Valor t	Significância Estatística (p-level)
Intercepto			11,33	0,14	78,17	0,00
Fator 3	-0,35	0,14	-0,37	0,15	-2,49	0,02

A regressão linear entre o harmônico K₁ e os escores fatoriais do fatoriais do nível médio, da descarga fluvial e dos ventos longitudinal e transversal, utilizados como variáveis independentes são apresentadas na Tabela 5.11. O modelo estimou que o Fator 2, composto pelo vento transversal, tem um poder de explicação de 9 % sobre a variação da amplitude da K₁ e sugere a seguinte equação:

$$K_1 = 4,24 + 0,46 * Fator 2 \quad (5.2)$$

Tabela 5.11 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico K_1

R Múltiplo	0,37					
R^2 Múltiplo	0,13					
R^2 Ajustado	0,09					
Erro Padrão de Estimativa	1,29					
Análise da Variância						
	Soma dos Quadrados	<i>df</i>	Quadrado Médio	Razão <i>F</i>		<i>p</i>
Regressão	11,34	2,00	5,67	3,40		0,04
Resíduo	73,37	44,00	1,67			
Variáveis na Equação						
Variáveis	Beta	Erro padrão de Beta	B	Erro padrão de B	Valor <i>t</i>	Significância Estatística (<i>p-level</i>)
Intercepto			4,24	0,19	22,53	0,00
Fator 2	0,34	0,14	0,46	0,19	2,40	0,02
Fator 1	0,14	0,14	0,20	0,19	1,03	0,31

O $F_{\text{crítico}}$ obtido através da Tabela de Distribuição F com 2 e 44 graus de liberdade é de 3,21 e como é menor que a *Razão F* (3,40), rejeita-se a hipótese nula e considera-se que a regressão múltipla é significativa. O *Valor p* foi de 0,04 o que leva outra vez a rejeição da hipótese nula.

Os harmônicos semidiurnos M_2 e S_2 , ao contrário dos diurnos, apresentaram o Fator 1, explicado pela descarga fluvial e pelo nível médio, como o responsável pelas variações nas amplitudes. O coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) apresentou um poder de explicação de 5% e 7% para a M_2 e S_2 , sendo que a variação restante está contida no resíduo. As equações propostas pelo modelo de regressão linear múltipla para a M_2 e S_2 são:

$$M_2 = 2,92 + 0,20 * \text{Fator 1} \quad (5.3)$$

$$S_2 = 4,09 + 0,28 * \text{Fator 1} \quad (5.4)$$

A regressão múltipla realizada para estes harmônicos não conseguiu representar de maneira adequada às variações de amplitude observadas. Através da *Razão F* por meio da Tabela de Distribuição F, verificou-se que ambos os harmônicos tiveram a hipótese nula aceita e o *Valor p* da M_2 e S_2 , mostrado no quadro da Análise de Variância das Tabelas 5.12 e 5.13, apresentaram um *Valor p* de significância 0,07, sendo um pouco maior que o nível de significância do teste de 0,05, fazendo com que novamente seja aceita a hipótese nula. A análise qualitativa apresenta uma relação entre a descarga fluvial e os harmônicos semidiurnos, entretanto a análise quantitativa revela que apesar de existir uma afinidade entre eles, esta relação não é significativa estatisticamente suficiente para provar esta interação, podendo ser atribuída ao acaso.

Tabela 5.12 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico M_2

R Múltiplo	0,27					
R ² Múltiplo	0,07					
R ² Ajustado	0,05					
Erro Padrão de Estimativa	0,72					
Análise da Variância						
	Soma dos Quadrados	<i>df</i>	Quadrado Médio	Razão <i>F</i>	<i>Valor p</i>	
Regressão	1,80	1,00	1,80	3,51	0,07	
Resíduo	23,12	45,00	0,51			
Variáveis na Equação						
Variáveis	Beta	Erro padrão de Beta	B	Erro padrão de B	Valor <i>t</i>	Significância Estatística (<i>p-level</i>)
Intercepto			2,92	0,10	27,98	0,00
Fator 1	0,27	0,14	0,20	0,11	1,87	0,07

Tabela 5.13 - Resultados da regressão múltipla para o harmônico S₂

R Múltiplo	0,33
R ² Múltiplo	0,11
R ² Ajustado	0,07
Erro Padrão de Estimativa	0,89

Análise da Variância

	Soma dos Quadrados	<i>df</i>	Quadrado Médio	Razão <i>F</i>	<i>Valor p</i>
Regressão	4,36	2,00	2,18	2,78	0,07
Resíduo	34,56	44,00	0,79		

Variáveis na Equação

Variáveis	Beta	Erro padrão de Beta	B	Erro padrão de B	Valor <i>t</i>	Significância Estatística (<i>p-level</i>)
Intercepto			4,09	0,13	31,63	0,00
Fator 1	0,30	0,14	0,28	0,13	2,13	0,04
Fator 3	0,14	0,14	0,13	0,13	1,01	0,32

5.5 ANÁLISE DAS PREVISÕES DAS SÉRIES DE NÍVEL MÉDIO

As previsões apresentadas foram calculadas com base nas análises harmônicas das séries referentes aos anos de 1984, 1989, 1991 e 1992 (Figura 5.16 e 5.17). Foram geradas previsões com os constituintes obtidos da própria série e com os componentes fornecidos dos demais anos, totalizando 16 previsões. A primeira estimativa da eficácia da previsão dos harmônicos foi avaliada de forma que a subtração entre as séries de nível e suas respectivas previsões, denominadas de resíduos, gerassem componentes com amplitudes que sejam zero ou estejam próximas deste valor.

Os constituintes harmônicos das séries de 1984 e 1992 conseguiram prever em sua totalidade os principais componentes diurnos (O_1 , K_1 e P_1) dos anos de 1984, 1991 e 1992, visto que os componentes não foram inferidos análise harmônica proveniente do resíduo entre as séries. Os constituintes semidiurnos (M_2 , S_2 , N_2 e K_2), por sua vez, foram incluídos na análise harmônica oriunda da subtração entre as séries e suas previsões correspondentes, entretanto as amplitudes obtidas nas análises não ultrapassaram 0,50 cm. A componente de longo período (Sa), que tem uma amplitude média de 13,70 cm, apresentou em todas as análises harmônicas geradas através dos resíduos, amplitudes superiores a 5,30 cm, alcançando o seu limite na previsão de 1984 realizada com componentes de 1991, com 11,40 cm.

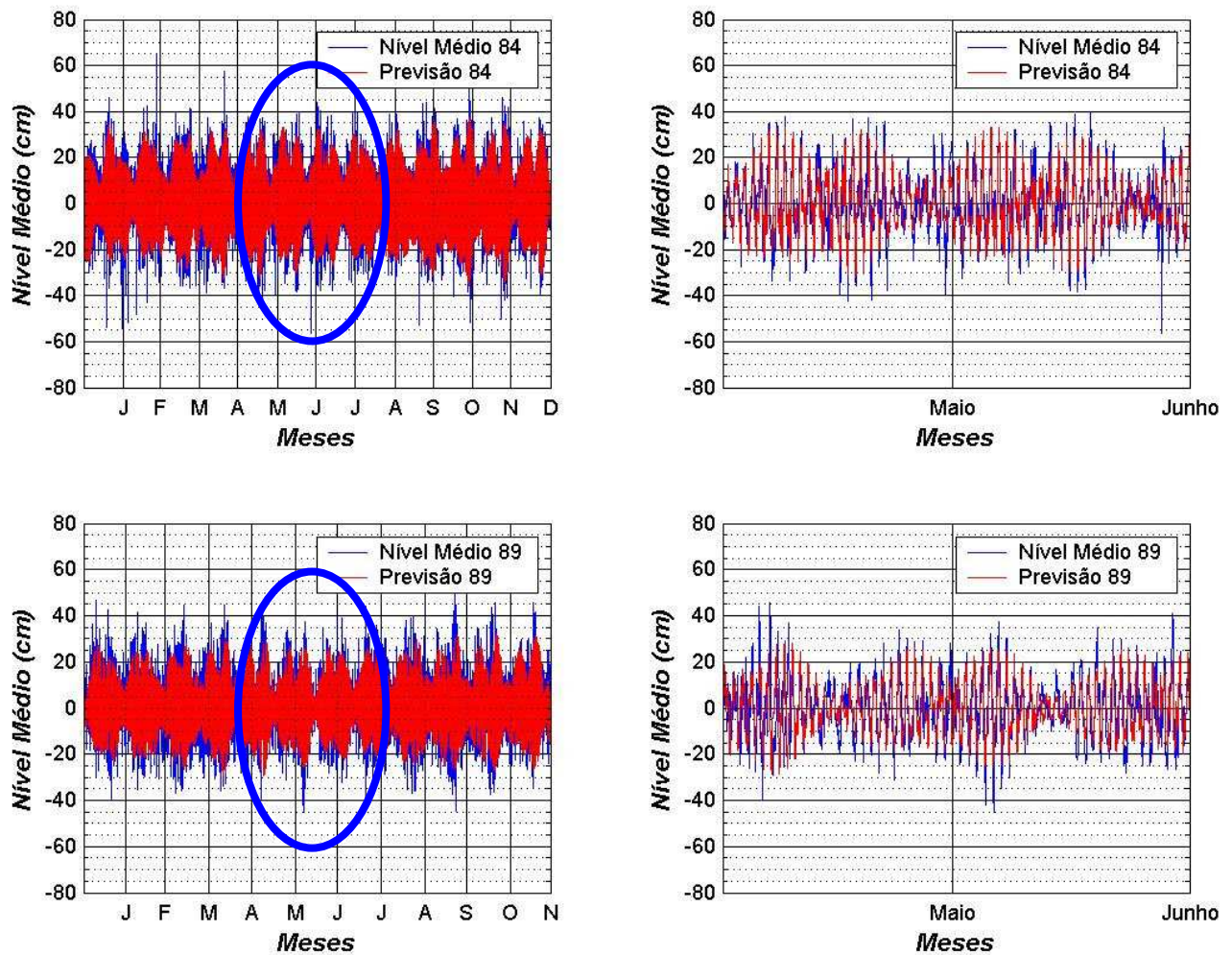


Figura 5.16 - Séries dos anos de 1984 e 1989 e suas respectivas previsões.

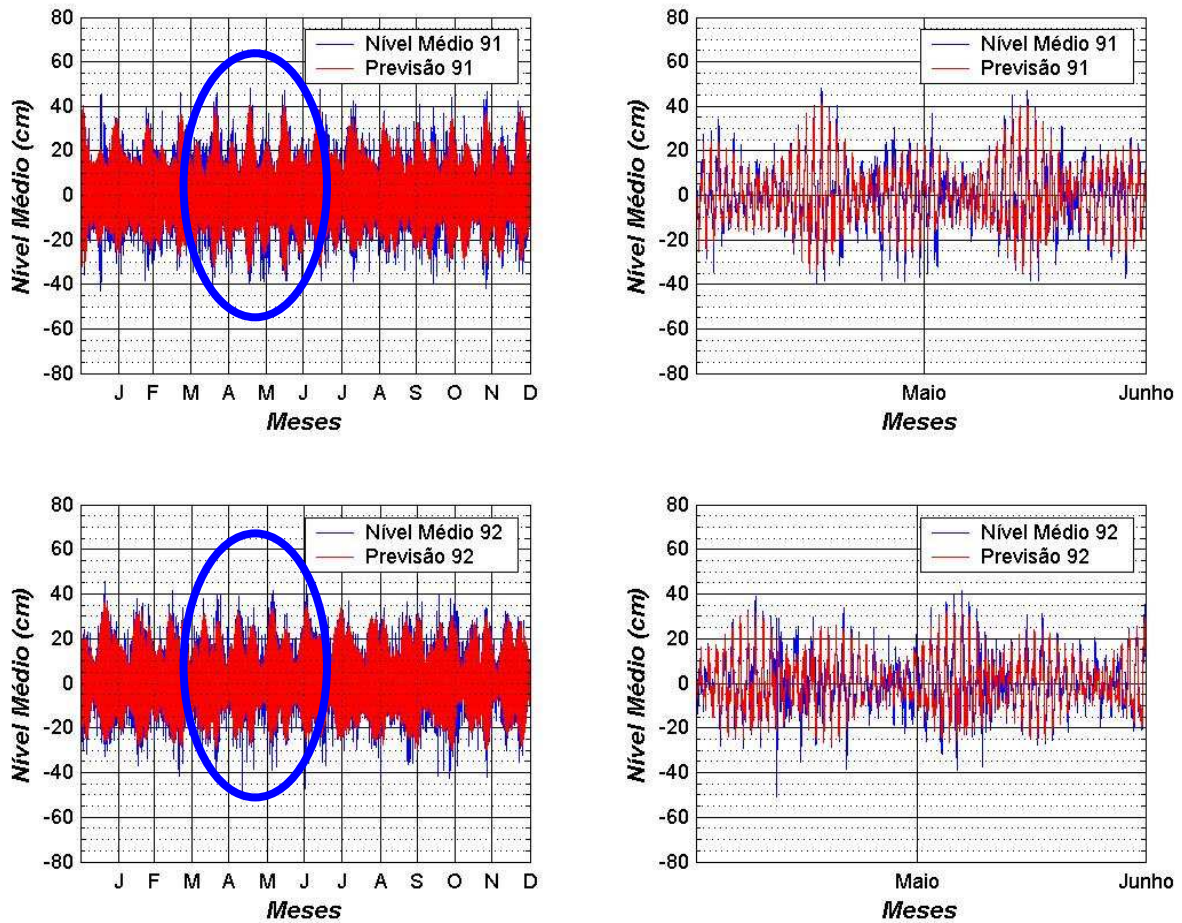


Figura 5.17 - Séries dos anos de 1991 e 1992 e suas respectivas previsões.

5.5.1 Análise Espectral Cruzada entre as Séries de Nível Médio e as Previsões

A Figura 5.18 apresenta os espectros de potência cruzado entre as séries de nível médio e as respectivas previsões obtidas através dos harmônicos correspondentes a cada série. Foi utilizado um filtro passa-alta nas séries de nível, com uma frequência de corte de 30 e 60h. Através do espectro de potência é possível visualizar os picos das bandas diurnas, semidiurnas e quarto-diurnas, caracterizando o estuário da Lagoa dos Patos do tipo misto com predominância diurna.

Os espectros de potência cruzada entre o nível médio e as previsões apresentam diferentes picos de energia, de acordo com a frequência de corte utilizada. A frequência de

30h mostrou os picos mais elevados de energia da análise cruzada nos anos de 1984 e 1991, todavia não ultrapassaram 80 variância/cph. A utilização do filtro com frequência de corte de 60h levou a obtenção de energias mais elevadas na análise cruzada em todos os anos, observa-se que em 1984 e 1991 esta energia ficou próxima de 100 variância/cph. Foram constatadas diferenças de energia na análise espectral entre as séries de nível e a previsões em todas as análises, sendo mais evidentes nos espectros com uma frequência de corte de 60h.

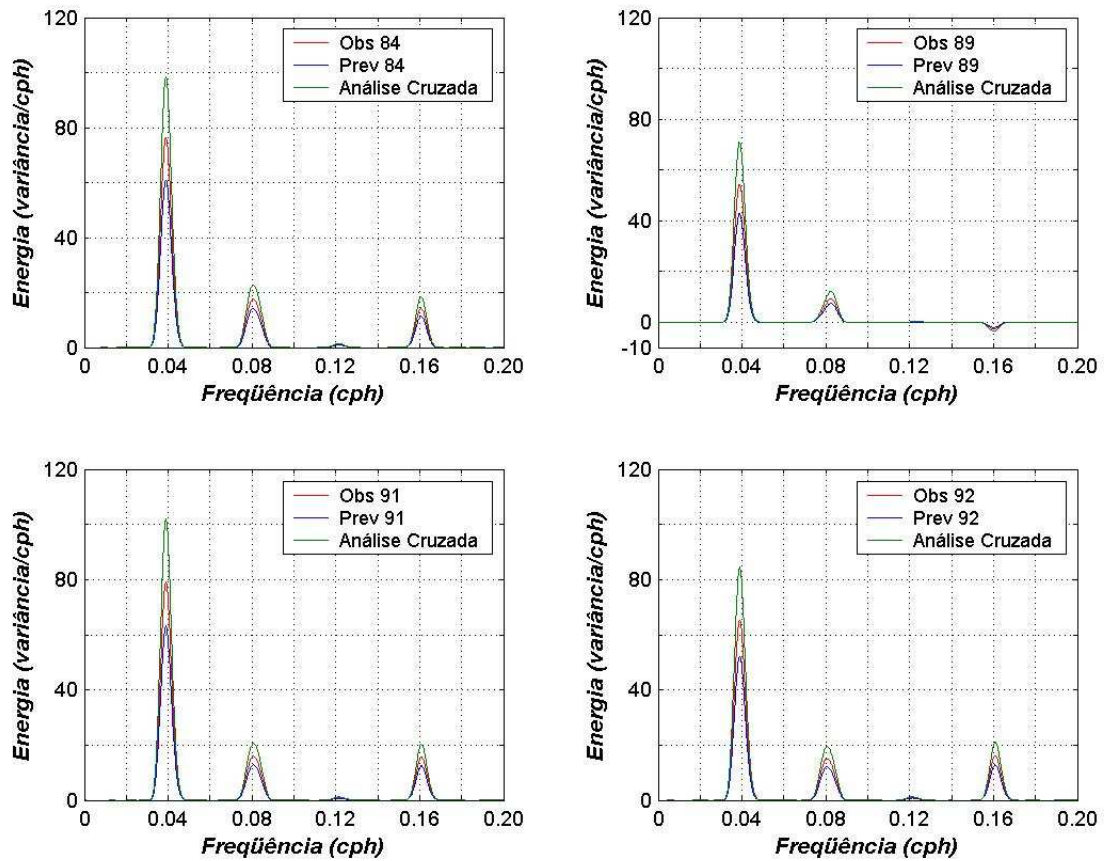


Figura 5.18 - Análise espectral cruzada entre as séries de nível médio e as previsões das séries.

As análises de coerência são apresentadas na Figura 5.19. Os resultados das correlações obtidos entre as séries de nível e as previsões indicam uma melhor correlação nos anos de 1991 e 1992 para os harmônicos diurnos e semidiurnos. Os espectros de fase referentes às análises cruzadas procedentes entre as séries de nível e suas previsões apresentaram defasagens para os componentes diurnos de aproximadamente 180° e para os constituintes quarto-diurnos de 90°, já os harmônicos semidiurnos permaneceram em fase em todas as análises.

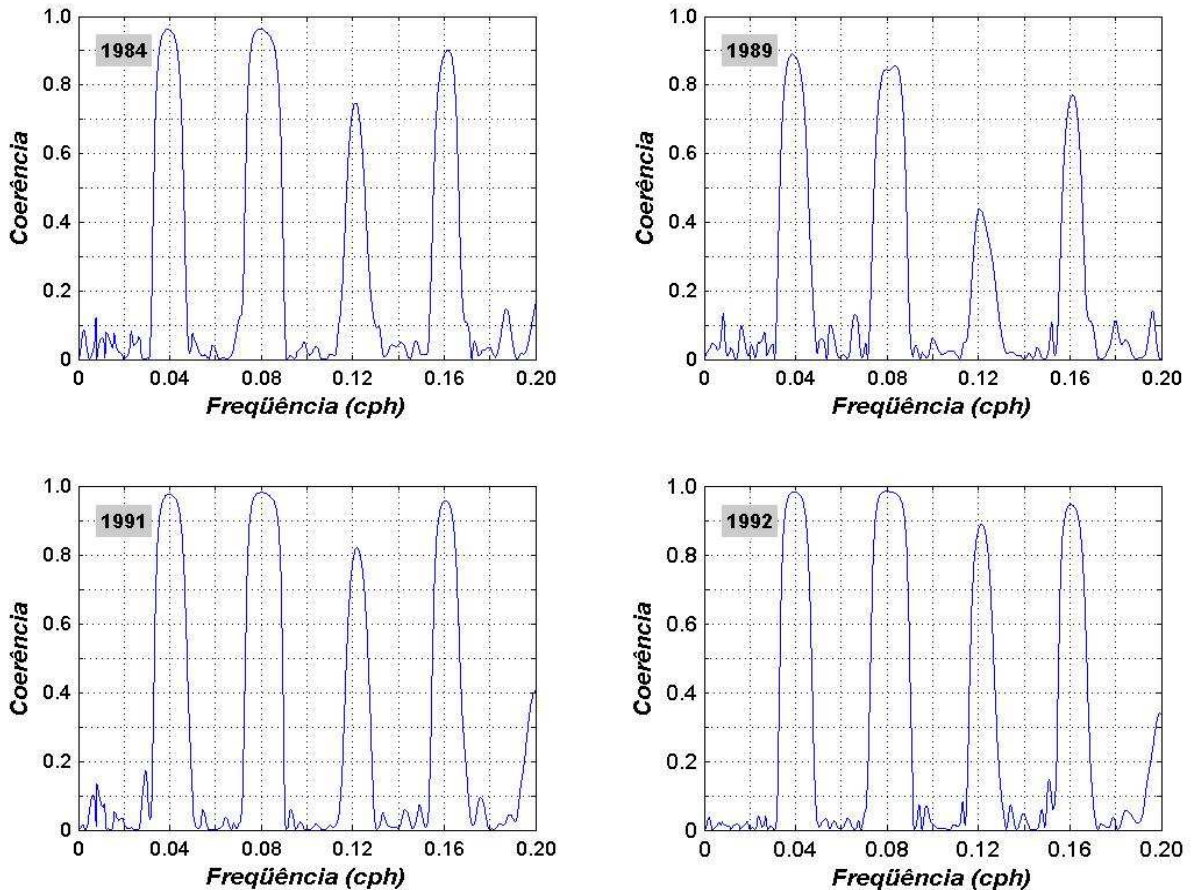


Figura 5.19 - Análise de coerência entre as séries de nível médio e as previsões das séries.

5.6. SIMULAÇÃO DOS HARMÔNICOS.

A simulação dos principais harmônicos diurnos (O_1 e K_1) e semidiurnos (M_2 e S_2) foi realizada em 3 pontos (Séries 7, 8 e 9) no interior do estuário e 6 pontos na costa, sendo 5 localizados no limite da grade batimétrica (Séries 1, 2, 3, 4 e 6), conforme mostra a Figura 5.20. Os resultados são apresentados para os pontos referentes às séries 2, 5 e 9. Os resultados extraídos nos demais pontos localizados na região costeira apresentaram resultados semelhantes aos expostos neste estudo, já os dados obtidos no interior do estuário serviram para observar o comportamento dos componentes harmônicos ao longo do canal.

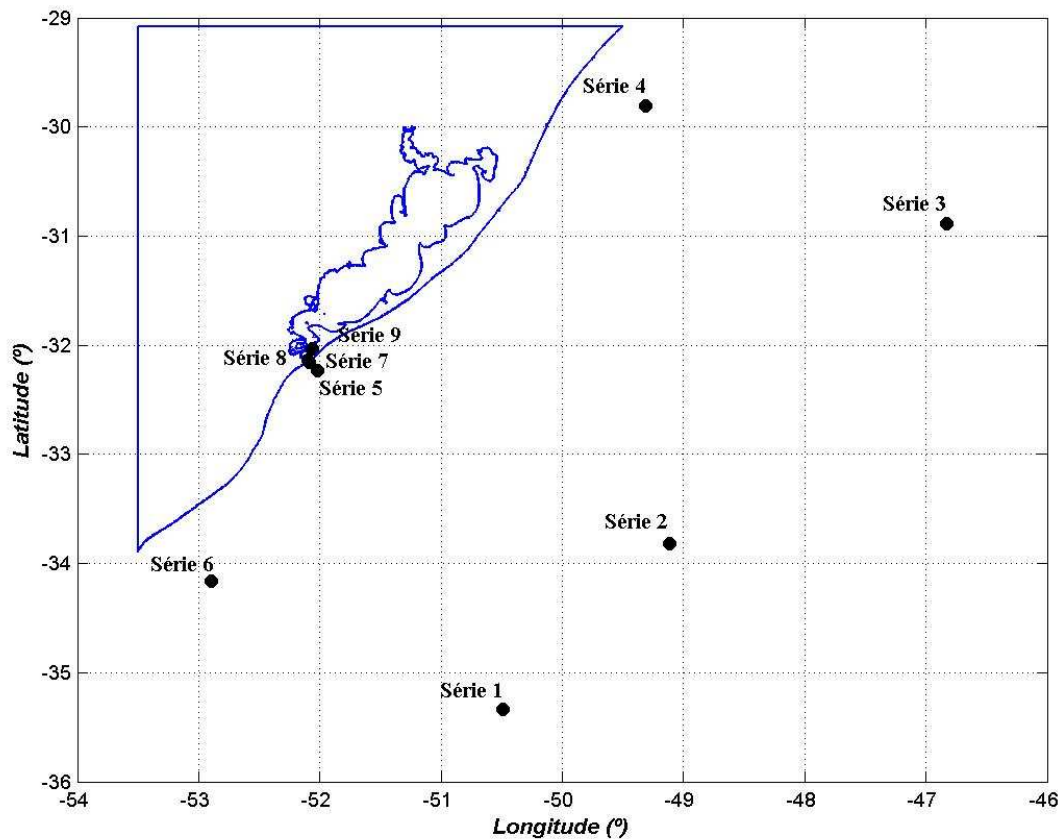


Figura 5.20 - Localização dos pontos em que foram realizadas as simulações.

As simulações foram realizadas para um período de 29 dias, sendo criados 3 cenários diferentes cada uma delas. A primeira foi composta pela variação do nível médio (30, 60 e 110 cm), a segunda pela oscilação da descarga fluvial (1.000 e 5.000 m³/s) e a terceira pela presença do efeito da Força de Coriolis. Um trabalho semelhante foi realizado por Möller et al. (2007) que para observar o comportamento da maré diurna, foi empregado um modelo numérico para simular o comportamento da lagoa, sendo utilizado como forçantes as ondas de maré. A descarga fluvial foi desconsiderada durante todo o processo.

5.6.1 Variação do Nível Médio para os Componentes Diurnos O_1 e K_1 .

5.6.1.1 Variação do Nível Médio (30 cm).

Os harmônicos avaliados para este cenário foram os constituintes diurnos O_1 e K_1 . A Figura 5.21 apresenta a amplitude destes componentes para os pontos 2, 5 e 9. Observa-se que existe uma redução da amplitude da O_1 e da K_1 conforme vão se aproximando da costa. A O_1 no ponto 2 é de 9,40 cm e quando chega no ponto 5 passa para 7,90 cm, representando uma variação aproximada de 52% na amplitude, com um desvio médio de 0,75 cm. Entre os pontos 5 e 9 a amplitude da O_1 reduz cerca de 20%. No ponto 5 a amplitude da K_1 é de 4,50 cm diminui para 3,80 cm no ponto 2, evidenciando uma variação menor (16%). Ocorre uma oscilação maior da amplitude da K_1 na parte interna do estuário, sendo registrado 2,80 cm no ponto 9.

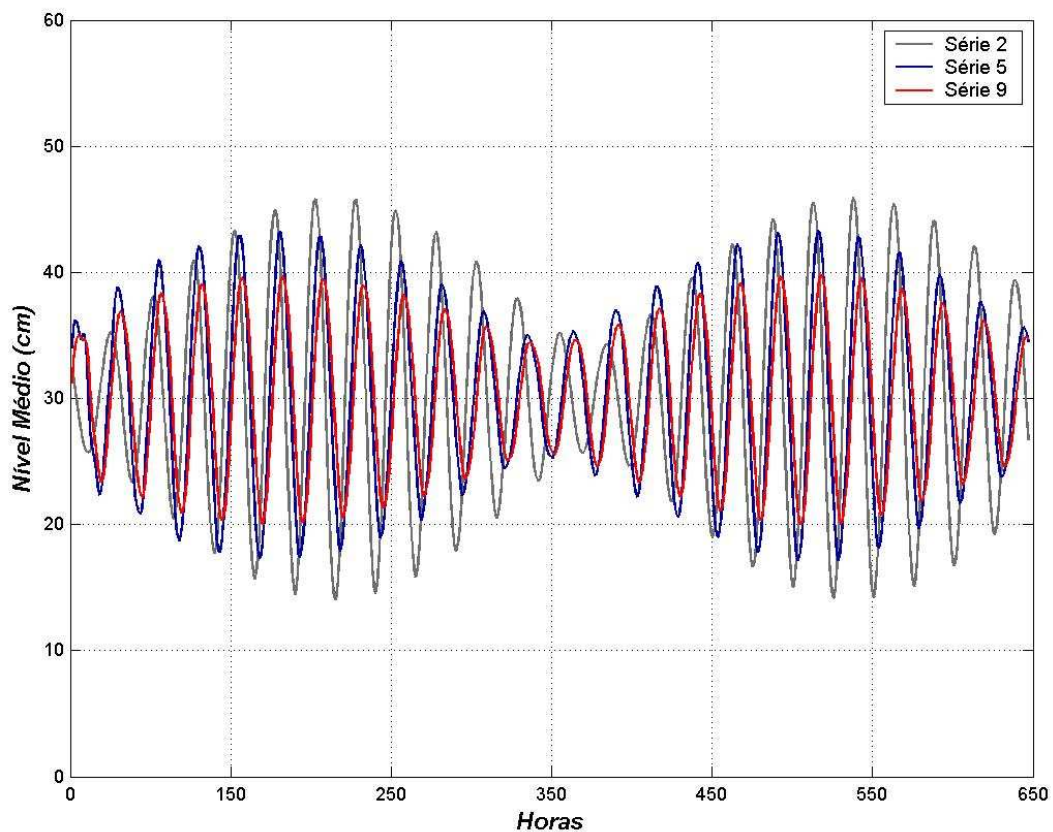


Figura 5.21 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 30 cm.

5.6.1.2 Variação do Nível Médio (60 cm).

Quando os harmônicos O_1 e K_1 foram simulados com um nível médio de 60 cm (Figura 5.22) a variação da amplitude foi mais evidente para a K_1 , oscilando aproximadamente 20% variando de 4,50 cm no ponto 2 para 3,60 cm no ponto 5. Se tratando dos pontos no interior do estuário (pontos 5 e 9), a K_1 sofreu uma redução na amplitude de 1 cm. Comparando com a simulação anterior, a K_1 teve uma oscilação da amplitude de 4% superior quando simulada com 60 cm para os pontos 5 e 9 e 2 e 5. A amplitude da O_1 permaneceu inalterada no ponto 2 (9,40 cm) e não ocorreu diminuição desta ao aproximar-se da costa (ponto 5). A O_1 diminuiu cerca de 2 cm entre os pontos 5 e 9, variando 22,50 %.

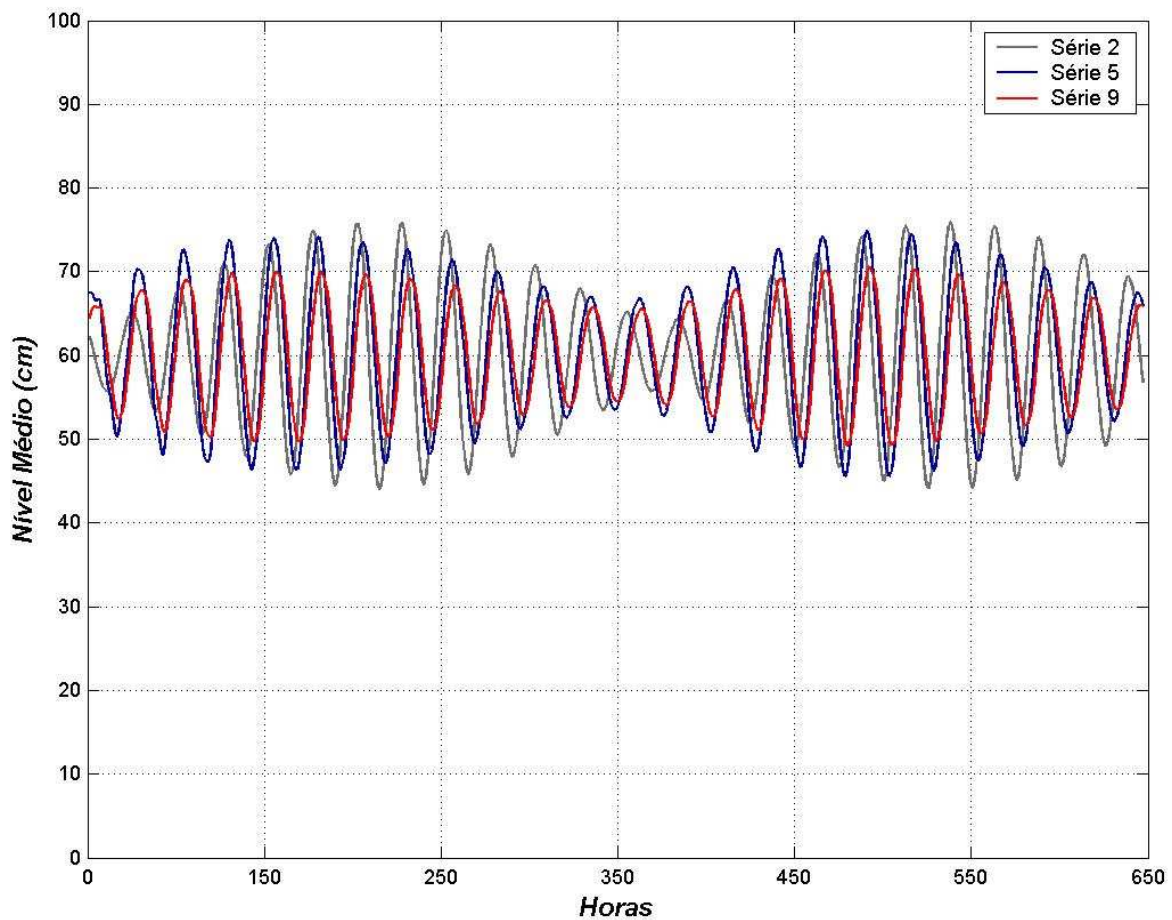


Figura 5.22 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 60 cm.

5.6.1.3 Variação do Nível Médio (110 cm).

A simulação realizada com os componentes diurnos O_1 e K_1 com um aumento do nível médio para 110 cm apresentou a mesma amplitude (9,40 cm) obtida nas simulações anteriores dos harmônicos no ponto 2. Ao ingressar no interior do estuário a O_1 reduziu de 6,70 cm (ponto 5) para 5,15 cm (ponto 9), representando uma variação de 24%, se tratando da K_1 a variação foi de 30% para os mesmos pontos, oscilando 3,15 cm no ponto 5 para 2,20 cm no ponto 9. A Figura 5.23 mostra as variações das amplitudes da O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9.

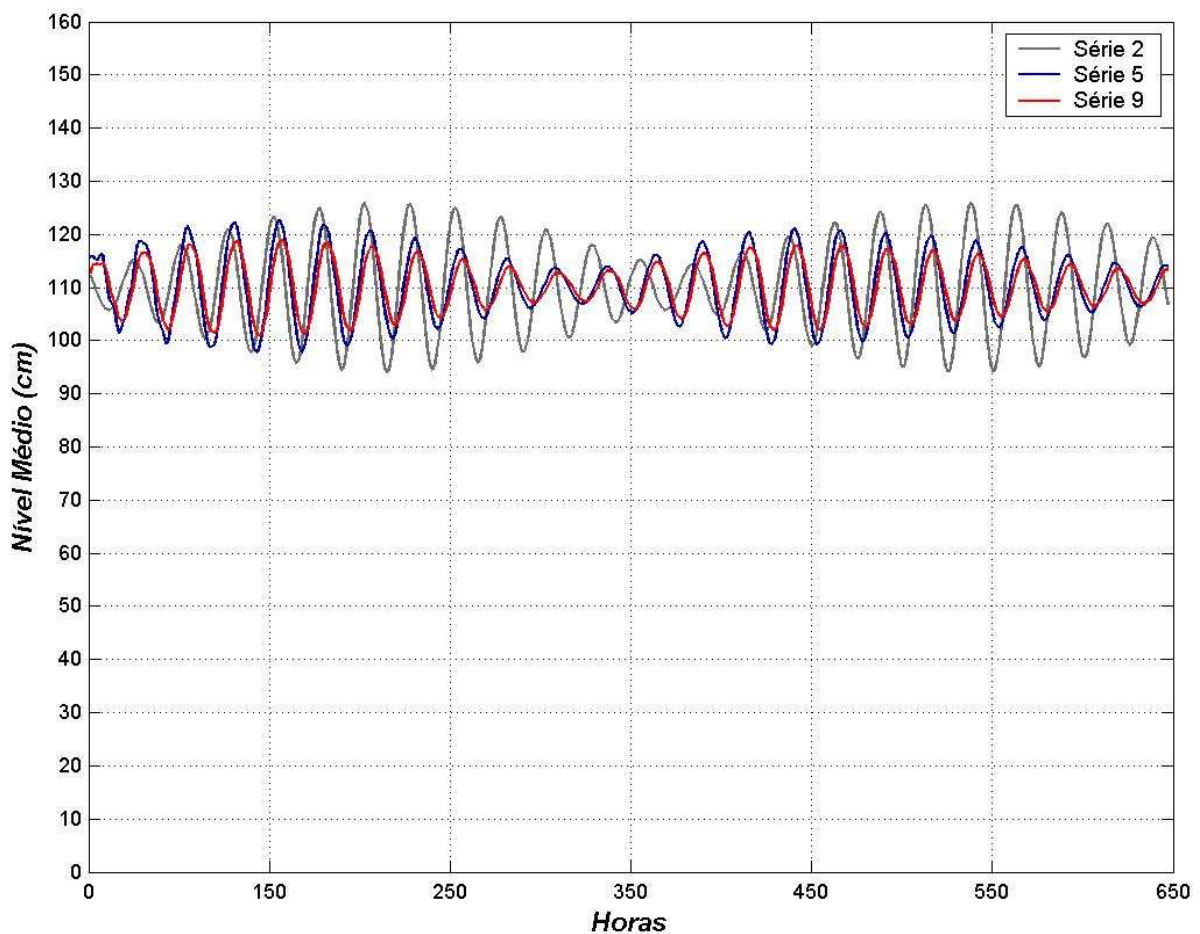


Figura 5.23 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 110 cm.

5.6.2 Variação da Descarga Fluvial para os Componentes Diurnos O_1 e K_1 .

A variação da descarga fluvial em níveis extremos de 1.000 e 5.000 m^3/s durante a simulação dos componentes O_1 e K_1 , apresentou a mesma amplitude para estes constituintes nos pontos 2 e 5. Ao penetrar no estuário, a amplitude da O_1 teve uma redução de 23 % com a descarga fluvial de 1.000 m^3/s e de 37% com uma vazão de 1.000 m^3/s . A K_1 teve uma interferência maior do escoamento de água doce, reduzindo 30 e 42%, com os fluxos de 1.000 e 5.000 m^3/s , respectivamente, entre os pontos 5 e 9. A Figura 5.24 (a) apresenta a oscilação dos componentes diurnos estudados para um escoamento de 1.000 m^3/s e a Figura 5.24 (b) mostra a variação destes constituintes para uma descarga de 5.000 m^3/s .

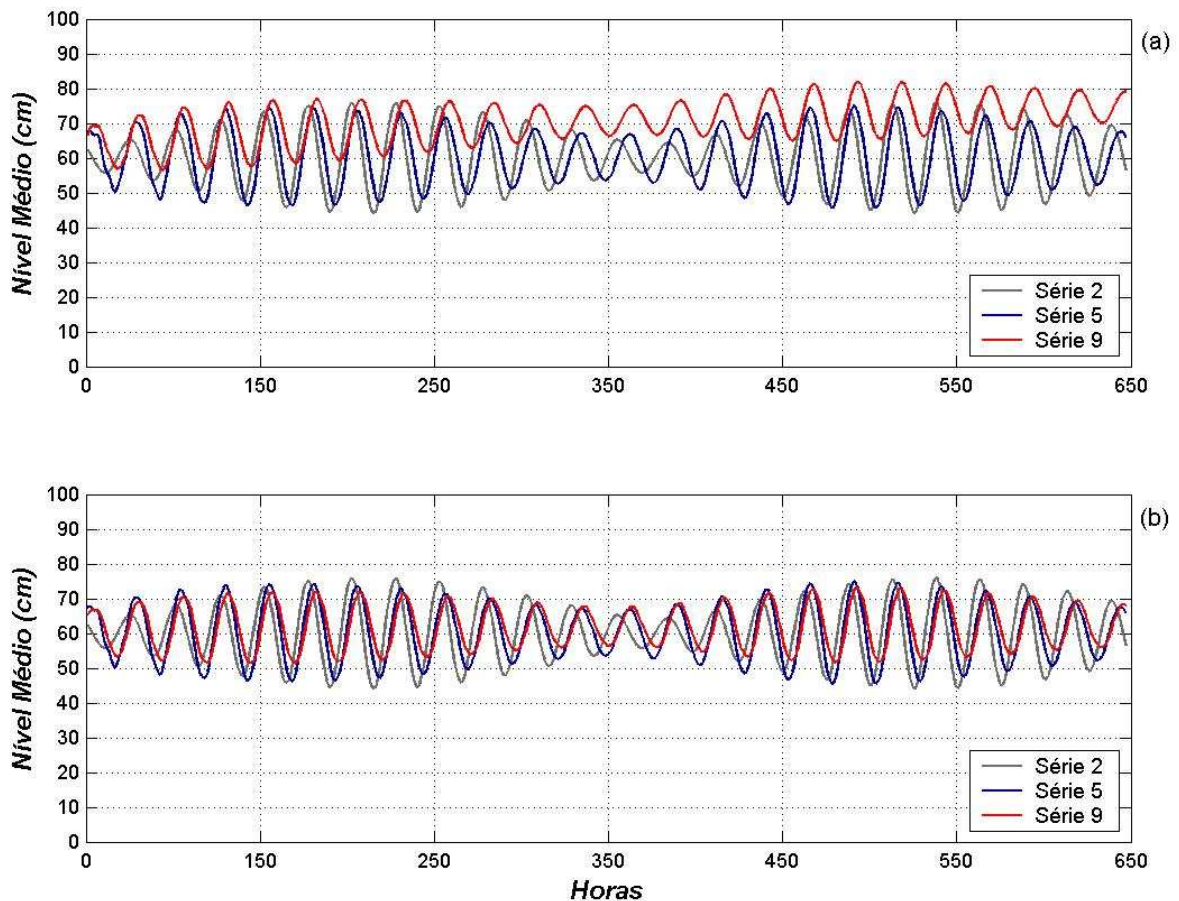


Figura 5.24 - Amplitudes dos componentes diurnos O_1 e K_1 nos pontos 2, 5 e 9. (a) Descarga fluvial de 1.000 m^3/s . (b) Descarga fluvial de 5.000 m^3/s .

5.6.3 Simulação dos Componentes Semidiurnos M_2 e S_2 .

A simulação dos componentes semidiurnos M_2 e S_2 com um nível médio de 60 cm sem a presença da descarga fluvial (Figura 5.25), apresentou um aumento de amplitude para a M_2 entre os pontos 2 e 5, variando de 3,60 cm no ponto 2 para 5,50 cm no ponto 5. A S_2 teve uma variação aproximada de 90% entre os mesmos pontos, oscilando de 1,53 cm no ponto 2 para 0,20 cm no ponto 5. A amplitude deste harmônico volta a aumentar conforme avança o estuário, chegando a 2,30 cm no ponto 9. A amplitude da M_2 diminuiu para 2,20 cm no ponto 9, representando uma queda na amplitude de 35% entre os pontos 5 e 9.

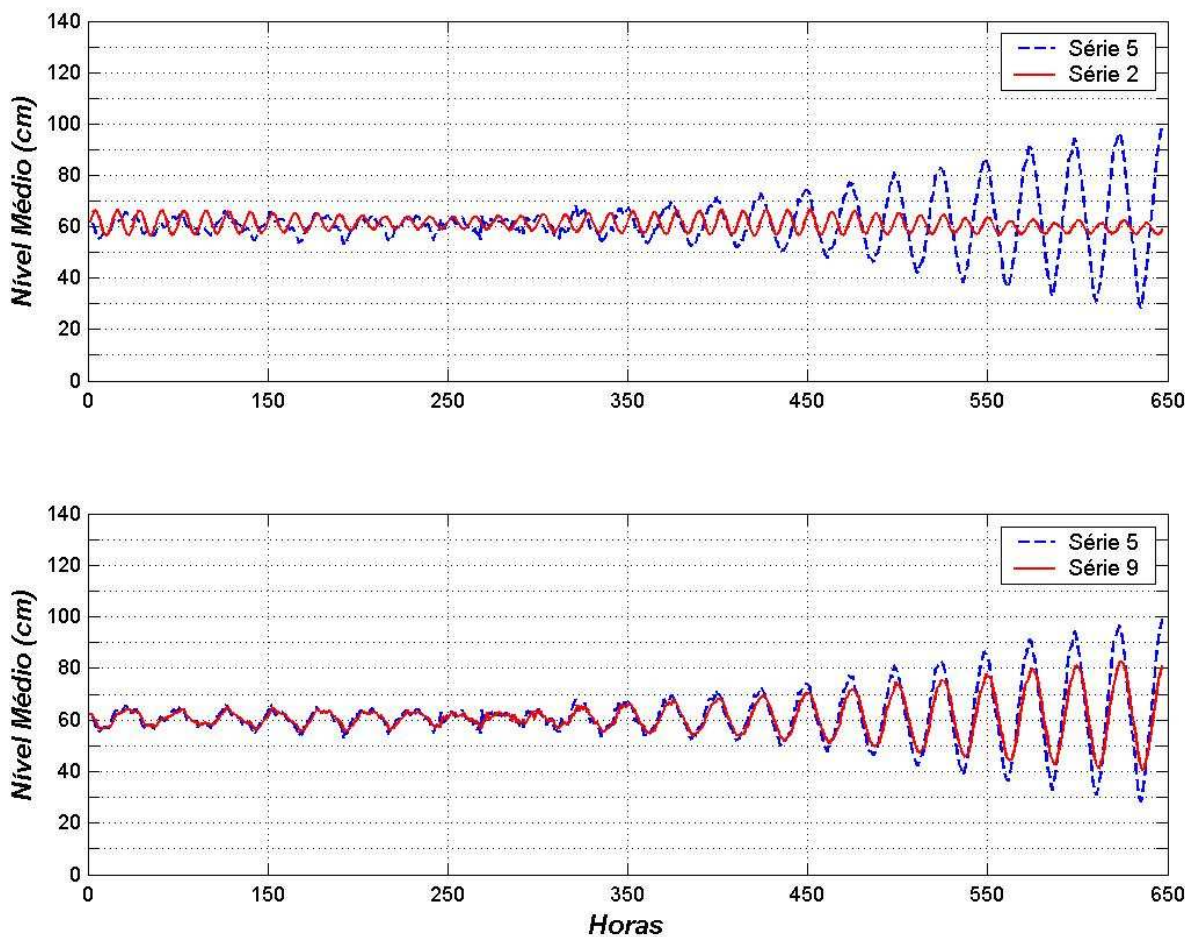


Figura 5.25 - Amplitudes dos componentes semidiurnos M_2 e S_2 nos pontos 2, 5 e 9 para um nível médio de 60 cm.

5.6.4 Influência do Efeito da Força de Coriolis.

A análise harmônica das séries obtidas para a M_2 e a S_2 acusou a presença da componente diurna O_1 , isto fez com que fosse realizada uma nova simulação para os harmônicos M_2 e S_2 , sem a presença do efeito de Coriolis (Figura 5.26). Foi observado que existe uma componente inercial que afeta a O_1 , a M_2 , a S_2 e a M_4 , pois na análise harmônica feita com os dados obtidos através da simulação para este caso, observa-se a influência do efeito de Coriolis sobre estes constituintes. A presença do efeito de Coriolis provocou um aumento da amplitude da M_2 e da S_2 . Melo F^o (2002) indica que as forças de inércia aumentam à medida que:

- Diminui o atrito do rio;
- Aumenta o período de oscilação;
- Aumenta a vazão específica;
- Diminui a declividade do rio.

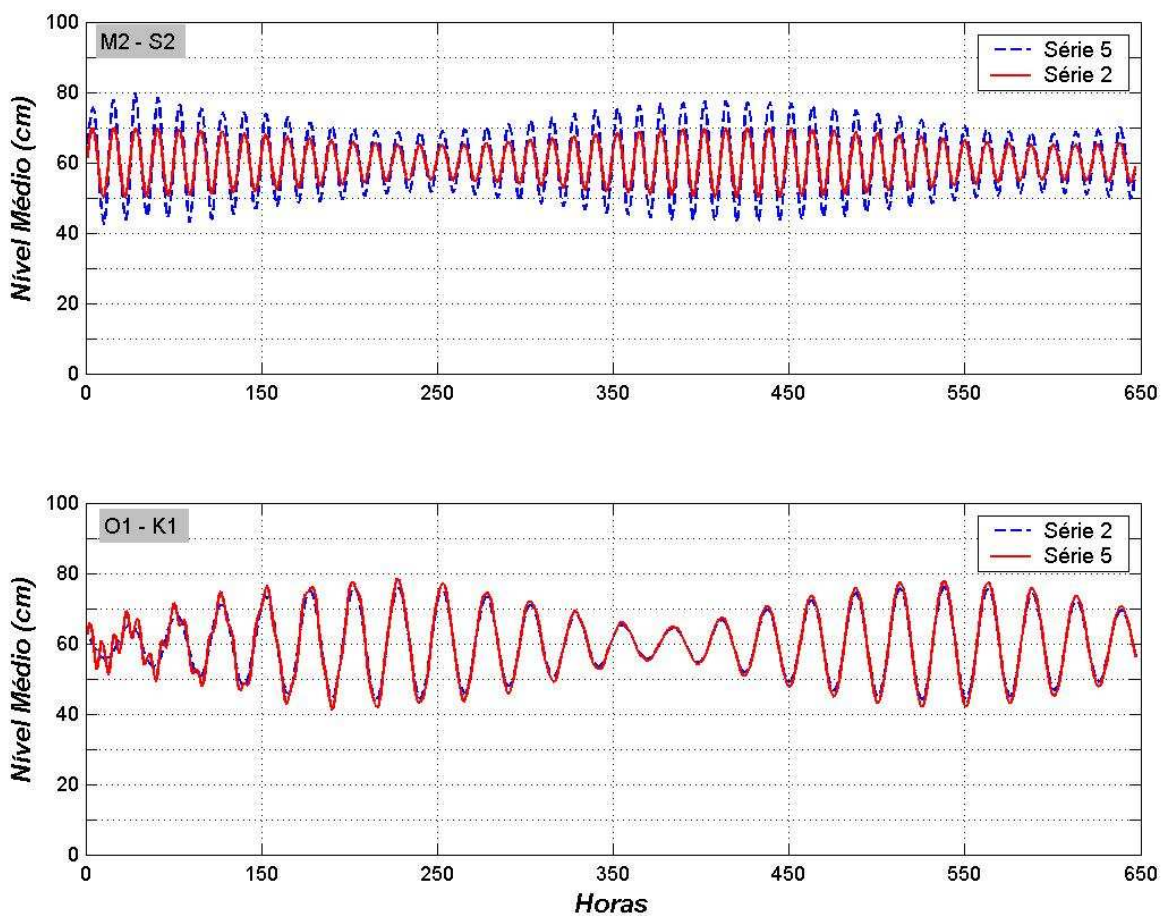


Figura 5.26 - Estudo dos componentes semidiurnos sem a presença do efeito de Coriolis.

A M_2 teve um acréscimo de 4,00 cm nos pontos 2 e 5. Considerando a presença desta força no ponto 2, a amplitude obtida para a S_2 foi de 1,50 cm, o acréscimo obtido para componente foi de 1,40 cm, pois quando foi simulada sem o efeito de Coriolis a amplitude passou para 2,90 cm. Através da comparação feita entre as simulações realizadas sob o efeito de Coriolis, foi constatado que a M_4 somente é produzida sob o efeito desta força. Os registros deste harmônico foram obtidos nos pontos localizados no interior do canal. A O_1 sem a presença de Coriolis foi simulado nos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Os pontos que contornam a grade batimétrica (1, 2, 3, 4 e 6) apresentaram uma amplitude aproximada de 9,50 cm para a O_1 e 4,50 cm para a K_1 , todavia ao aproximar-se da entrada do canal a O_1 aumentou para 10,50 cm e a K_1 para 5,10 cm.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Estuários são caracterizados por modificar o sinal da maré oriundo do oceano, sendo que cada um produz uma resposta individual, que depende de fatores como a morfologia e profundidade do canal, efeitos meteorológicos e descarga fluvial. Devido a menor importância das marés, a maioria dos estudos têm se concentrado nos efeitos que o vento e a descarga fluvial exercem sobre a hidrodinâmica da lagoa (Motta 1969; Costa et al., 1988; Möller et al., 1991).

Diversos estudos mostram que a onda de maré no estuário da Lagoa dos Patos está diretamente relacionada com o aporte de água doce proveniente da região continental e com a ação dos ventos (Fernandes et al., 2004, Möller et al. (2006; 2007)). De maneira análoga os resultados obtidos mostraram uma forte relação entre o comportamento dos componentes harmônicos com a descarga dos rios e a com os ventos. Alguns trabalhos sobre a oscilação dos constituintes harmônicos no estuário da Lagoa dos Patos já observaram modificações na amplitude da onda de maré nos principais componentes diurnos e semidiurnos (Möller et al., 2007). Este autor mostra que a frequência da maré na Lagoa dos Patos é governada pelos efeitos astronômicos da maré e pela ação dos ventos.

Diferenças entre os valores da amplitude para componentes diurnos e semidiurnos foram observadas em períodos diferentes (Möller et al., 2007). Como a Lagoa dos Patos é caracterizada por uma micromaré, dirigida pelo sistema de ventos, estas variações podem ocorrer devido a estes forçantes que agem nesta área. Möller et al. (2006), Fernandes et al. (2004), Smith (1977) também observaram estas variações na amplitude dos constituintes harmônicos. A interferência da descarga fluvial sobre a amplitude dos componentes harmônicos da maré produz diferentes análises harmônicas, de acordo com o fluxo de água doce (Melo F°, 2002).

Constatou-se que os aumentos do nível médio e da descarga fluvial influenciaram na redução da amplitude da O_1 . A análise de regressão linear múltipla mostrou que 10% da variação que ocorre na O_1 é devido ao vento longitudinal e 90% é explicado por fatores não especificados e que estão incluídos no resíduo. As simulações para a componente O_1 apresentaram reduções na amplitude desta componente nos pontos localizados na região costeira quando o nível médio foi de 30 e 100 cm. Nos pontos localizados no interior do

estuário ocorreu uma diminuição mais acentuada quando o cenário da simulação abrangeu uma descarga fluvial de 5.000 m³/s, embora também tenham ocorrido abatimentos da amplitude nas demais ocasiões. Möller et al. (2007) determinou em trabalho recente que variabilidade da O₁ pode ser explicada pela brisa e pelo período de oscilação da lagoa, que possuem períodos similares, e pelos efeitos da descarga fluvial e dos ventos.

Os diagramas de dispersão mostraram que o nível médio e a descarga fluvial promovem um acréscimo na amplitude da K₁, entretanto a regressão linear múltipla apresentou o vento transversal como o principal responsável pelas oscilações de amplitude que ocorrem neste harmônico. Durante o verão e primavera a região da Lagoa dos Patos é marcada pela presença de ventos do quadrante Leste, que indicam a presença da influência da brisa (Möller et al., 2001). Este mesmo autor mostra que as oscilações de 24 h na brisa podem promover variações na amplitude da K₁. O período natural de oscilação da Lagoa dos Patos é de 24 h, que coincide com o período da maré dominante na região, assim como o período da brisa (Möller et al., 2006). Muitos destes efeitos são observados na variabilidade da amplitude da K₁. As séries simuladas na costa apresentaram uma redução mais intensa na amplitude da K₁, quando o cenário foi de 110 cm. Ao ingressar no estuário as variações da amplitude deste componente ocorreram em todas as situações em que se promoveram variações do nível com diminuições mais acentuadas para 110 cm. Entretanto, reduções mais significativas foram obtidas quando a simulação foi realizada com uma descarga fluvial de 5.000 m³/s.

A análise de regressão múltipla indicou que a descarga fluvial e o nível médio são responsáveis pelas variações de amplitudes nestes harmônicos. O coeficiente de determinação ajustado (R² ajustado) apresentou um poder de explicação de 5% e 7% para a M₂ e S₂, sendo que a variação restante está contida no resíduo. Este poder de explicação não é considerado significativo do ponto de vista estatístico, pois sua representatividade foi considerada muito baixa. Os componentes semidiurnos também indicaram variações nas simulações, a M₂ teve um acréscimo de aproximadamente 35% ao aproximar-se estuário e a S₂ de 90% para os mesmos pontos, quando a simulação foi feita com 60 cm. Mao et al. (2004) determinou que a variação do nível médio provocada pela descarga fluvial no Pearl River Estuary, localizado no sul da China, resulta no aumento das amplitudes nas bandas dos constituintes semidiurnos.

Ao contrário da relação encontrada da amplitude deste harmônico com o nível médio e a descarga fluvial, existem trabalhos que mostram a relação contrária. Jones e Davies (2007) verificaram, através de um modelo de elementos finitos, que o aumento da fricção aparentemente reduz a amplitude da M₂. Gallo e Vinzon (2005) indicam que o termo da fricção é a principal contribuição para os harmônicos originados pelas águas rasas na parte

superior do estuário do rio Amazonas até a desembocadura, devido à forte influência da descarga fluvial.

A simulação dos constituintes semidiurnos M_2 e S_2 apresentou a componente M_4 na análise harmônica quando simulado com um nível médio de 60 cm e com o efeito da Força de Coriolis, sugerindo que exista uma influência da componente inercial sobre este harmônico. Em trabalho recente, Möller et al. (2007) apresentam resultados que mostram que a energia da banda quarto-diurna é a mesma da banda semidiurna, quando comparados com as amplitudes dos componentes M_2 e M_4 . A amplitude dos harmônicos diurnos e de alta frequência é reduzida de 1 a 11% dos valores correspondente obtidos no oceano, enquanto que as amplitudes de baixa frequência são pouco afetadas pelo filtro que o canal provoca nos componentes (Fernandes et al., 2004). Melo F^o (2002) mostra que as forças de inércia provocam um aumento substancial da velocidade de propagação da onda de maré.

Melo F^o (2002) indica que a previsão dos componentes harmônicos pode ser afetada devido à influência da descarga fluvial. A análise harmônica obtida oriunda da subtração entre a série de elevação do nível e a sua previsão respectiva mostrou que os anos de 1984 e 1992 foram aqueles que melhor conseguiram prever as séries. Todavia, a análise de coerência entre as séries de elevação e as suas previsões mostrou que além das séries de 1984 e 1992, o ano de 1991 também é considerado satisfatório no que tange a previsão.

7. CONCLUSÕES.

O presente trabalho teve como objetivo analisar os efeitos da descarga fluvial, do vento longitudinal e transversal sobre as principais constantes harmônicas diurnas (O_1 e K_1) e semidiurnas (M_2 e S_2). Após a análise de dados e a simulação, foi possível concluir que:

- A descarga fluvial e os ventos longitudinais e transversais provocam variações nas amplitudes dos componentes diurnos e semidiurnos.
- A análise de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados para componentes estudados:
 - a) O vento longitudinal predomina sobre as variações na amplitude da componente diurna O_1 , embora existam outros fatores que provoquem esta alteração e que estão incluídos no resíduo.
 - b) O vento transversal é o principal responsável pelas oscilações nas amplitudes do constituinte K_1 .
 - c) Embora os diagramas de dispersão tenham apresentado uma forte influência da elevação do nível médio e da descarga fluvial sobre os componentes M_2 e S_2 , o estudo estatístico não apresentou uma análise consistente para que pudessem ser atribuídas as variações das amplitudes a estas forçantes.
- A previsão das séries foi mais eficaz quando foram utilizados os anos de 1984 e 1992 para realizar as previsões. A análise espectral cruzada e de coerência apresentaram resultados mais satisfatórios para estes anos.
- As simulações dos harmônicos diurnos (O_1 e K_1) e semidiurnos (M_2 e S_2) realizada nos pontos localizados na região costeira apresentaram os seguintes resultados:
 - a) A amplitude da O_1 oscilou com as variações de elevação de nível de 30 e 110 cm.
 - b) A K_1 teve a amplitude reduzida em todos os cenários realizados com a variação do nível, contudo as maiores oscilações foram registradas com elevações de 110 cm.
 - c) Foi observado um aumento nas amplitudes dos semidiurnos M_2 e S_2 de 35% e 90%, respectivamente quando simulado com um nível médio de 60 cm.

- As simulações realizadas nos pontos localizados no interior do estuário para os harmônicos diurnos (O_1 e K_1) e semidiurnos (M_2 e S_2) apresentaram resultados semelhantes ao da regressão linear múltipla. São eles:
 - a) A variação na amplitude da O_1 foi maior para a elevação de nível de 110 cm (24%), seguido da variação de 60 cm (22%) e finalizando com 30 cm (19%).
 - b) A K_1 teve a maior redução registrada com uma oscilação do nível de 110 cm (30%) e a menor com a variação da elevação de 30 cm (25%).
 - c) A O_1 e a K_1 tiveram uma redução maior nas suas amplitudes quando o escoamento de água doce foi de 5.000 m³/s, embora a vazão de 1.000 m³/s provoque diminuições significativas.
 - d) A amplitude da M_2 teve uma queda de 60% entretanto e a S_2 sofre um aumento de 90% na sua amplitude conforme avançam o estuário.
 - e) Foi verificada a presença de uma força inercial que age sobre as componentes M_2 e S_2 no interior do estuário, pois quando simulado com a presença da Força de Coriolis, a análise harmônica apresentou componentes diurnos. Ao retirar a Força de Coriolis da simulação, estes componentes passaram a não existir na análise harmônica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

ANTIQUERA, J. A. F., CALLIARI, L. J. Características Sedimentares da desembocadura da Laguna dos Patos. **Gravel**, Porto Alegre, v.3, p. 30-46, 2005.

CALLIARI, L. J. Aspectos sedimentológicos e ambientais na região estuarial da Laguna dos Patos. Porto Alegre, 1980. M.S. Thesis, Comissão de Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAMERON, W. M., PRITCHARD, D. W. Estuaries. The Sea. John Wiley and Sons, New York, v.2, p.306-324, 1963.

CASTELÃO, R., MÖLLER, O. O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. **Atlântica**, Rio Grande, RS, v.25, n. 2, p. 91-106, 2003.

CASTAING, P. Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. Thèse d'Etat, 1981. Université Bordeaux I, France, n° 701, 530 p.

CARTWRIGHT, D. E., EDDEN, A. C. Corrected tables of tidal harmonics. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**. v.33, p. 33: 253-264, 1973.

CECILIO, R. O. Identificação de zonas de erosão e deposição de sedimentos finos devido a forçante barotrópica no estuário da Lagoa dos Patos. Rio Grande, 2004. Monografia de conclusão do curso de Oceanologia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

CLOSS, D. Foraminíferos e tecamebas da Lagoa dos Patos. **Boletim da Escola de Geologia**. Porto Alegre, v.11, p.1-130, 1962.

COSTA, C. S. B., SEELIGER, U., KINAS, P. G. The effect of wind velocity and direction on the salinity regime in the Lower Patos Lagoon Estuary. **Ciência e Cultura**, v.9, p.909-912, 1988.

COSTA NETO, P., L., O. Estatística. São Paulo: Edgar Blucher, 2002. 266p.

DAVIS, J. L. Geographical Variations in Coastal Development. New York: Hafner, 1973. 204p.

DOODSON, A. T., WARBURG, H. D. Admiralty Manual of Tides. Hydrographic Department, Admiralty, United Kingdom, 1964, 270 p.

DYER, K.R. Estuaries: a physical introduction. Imprenta London. J.Wiley, 1979, p.140.

EMERY, W. J., THOMSON, R. E. Data analysis methods in physical oceanography. Elsevier, Amsterdam. 2 ed., 2001, 638p.

FERNANDES, E. H. L., DYER, K. R., MOLLER, O. O. Spatial gradients in the flow of the southern Patos Lagoon. **Journal of Coastal Research**, n.40, p.1-10, 2005.

FERNANDES, E. H. L., K. R. DYER., MÖLLER, O. O. The Patos lagoon hydrodynamics during an El-Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, Inglaterra, v. 22, n.1699, p.123-135, 2002.

FERNANDES, E. H. L., DYER, K. R., MOLLER, O. O. Morphological influence on the formation of spatial gradients in the southern Patos Lagoon. In: *Iahr symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics*. Barcelona, Sept.1-5, 2003. p.504-515

FERNANDES, E. H. L., DYER K.R., NIENCHESKI, L. F. H. TELEMAC-2D calibration and validation to the hydrodynamics of the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI 34: 470-488, 2001.

FERNANDES, E. H. L., MARIÑO-TAPIA, I., DYER, K. R., MOLLER, O. O. The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. *Ocean Dynamics*, v.54, n.3-4, p.348-359, 2004.

FRANCO, A. S. Tides - Fundamentals, Analysis and Prediction. 2nd. Ed., FCTH. São Paulo, 1988.

GALLO, N. G., VINZON, S. B. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. **Ocean Dinamcs**, v.55, p.441-448, 2005.

HAIR, J. F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L., BLACK, W.C., SANT'ANNA, A. S. Análise Multivariada de Dados. Porto Alegre: Bookman, 2005. p.593.

HARARI, J., MESQUITA, A. R. Tábua de Marés para Ubatuba, Santos e Cananéia. Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico - USP, v.81, p.1-17, 2007.

HARTMANN, C., SCHETTINI, C.A.F. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. . **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.21, n.4, p.371-377, 1991.

<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis>. Acesso em: abril 2007.

JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 3th.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992. p.503.

JONES, E. J., DAVIES, A. M. A high-resolution finite element model of the M_2 , M_4 , M_6 , S_2 , N_2 , K_1 and O_1 tides off west coast Britain. **Ocean Modelling**, v.19, p.70-100, 2007.

KJERFVE, B., KNOPPERS, B. Tidal Chocking in a Coastal Lagoon. Tidal Hydrodynamics. New York: John Wiley and Sons, p.169-179, 1991.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In Estuarine Variability. D.A. Wolfe (ed.). Orlando, Fl.: Academic Press, p. 63-81, 1986.

MAO, Q., SHI, P., YIN, K., GAN, J., QI, Y. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary. **Continental Shelf Research**. v.24, p.1797-1808, 2004.

MAROCO, J. Análise Estatística com Utilização do SPSS. Lisboa: Silabo, 2007. 822p.

MARQUES, W. C. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande, 2005. Dissertação de mestrado, FURG - Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

MARQUES, W. C., MONTEIRO, I., MÖLLER, O. O., FERNANDES, E. H. L. A dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos. In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2006, Rio Grande. Anais do II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2006. p.1-12.

MATA, M. M., MÖLLER, O. O. Sobre o tempo de descarga do estuário da lagoa dos patos. **Atlântica**, v.15, p. 37-48, 1993.

MELO Fº. E. Marés fluviais. Parte 1: Teoria. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.7, p.135-145, 2002.

MELO Fº. E. Marés fluviais. Parte 2: Aplicações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.7, 147-165, 2002.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. Princípios de oceanografia física de estuários. Universidade de São Paulo, 2002. São Paulo, 469p.

MÖLLER, O. O. Hydrodynamique de La Lagune dos Patos. Mésures et modelisation. DSc. Thesis, 1996, Université Bordeaux I, France.

MÖLLER, O. O., CASTAING, P. Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon. In: G. M. Perillo, M. C. Piccolo, M. Pino. (Org.). *Estuaries of South America: Their Geomorphology and Dynamics*. Berlin: Springer Verlag, 1999, p.83-99.

MÖLLER, O. O., CASTAING, P., SALOMON, J.C., LAZURE, P. The influence of local and non local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v.24, n.2, p.75-289, 2001.

MÖLLER, O. O., CASTAING, P., FERNANDES, E. L., LAZURE, P. Tidal frequency dynamics of a Southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. **Estuaries**, v.30, p.311-320, 2007.

MÖLLER, O. O., LORENZZETTI, J. A., STECH, J. L., MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, Inglaterra, v.16, n.3, p. 335-351, 1996.

MÖLLER, O. O., PAIM, P. S., SOARES, I. D. Facteurs et mecanismes de la circulation des eaux dans l'estuaire de la Lagune dos Patos (RS, Bresil). Bull. Inst. Geologie Basin d'Aquitaine, Bordeaux - França, v.49, p.15-28, 1991.

MOTTA, V. F. Relatório diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do canal de acesso pela barra do Rio Grande. Technical Report. Porto Alegre, 1969. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

NICHOLS, M. M., ALLEN, G. Sedimentary processes in coastal lagoons. Coastal Lagoon Research, Past, Present and Future. **Unesco - Technical Report in Marine Science**. v.33, p.27-80, 1981.

PARKER, B. B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions, in Tidal Hydrodynamics, edited by B. B. Parker, John Wiley, New York, 1991, p.237-268.

PIOVESAN, R. B., ALVES, F. N. A., SOARES, I. D. Aplicação de um modelo de transporte de partículas para determinação da trajetória de manchas de óleo na Lagoa dos Patos - RS. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador. Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro: Editora do IBP, 2005.

PRANDLE, D. Classification of tidal response in estuaries from channel geometry. **Geophysical Journal International**, 1985, p.209-221.

PUGH, D.T. Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists. Chichester: John Wiley & Sons. 1987, 472p.

SALLES, F. J. P., BENTES, C. M. B., SANTOS, J. A. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. FEMAR, Rio de Janeiro. 1ª ed., 2000, 280p.

SCHILLER, R.V. Influência de alterações morfológicas sobre a hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos. Rio Grande, 2004. 84p. Monografia de conclusão do curso de Oceanologia. FURG - Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

SMITH N. P. Meteorological and tidal exchange between Corpus Christi Bay, Texas and the northwestern Gulf of Mexico. **Estuarine and Coastal Marine Science**. p.511-520, 1977.

SMITH, N. P. The Laguna Madre of Texas: Hydrography of a hypersaline lagoon. In: KJERFVE, B. (Ed.) Hydrodynamics of Estuaries. Boca Raton. v.2, p.31-40, 1988.

TABACHNICK, B., FIDELL, L. S. Using multivariate statistics. New York: Harper Collins. 1996.

VITTA, A., MÖLLER, O. O., MARQUES, W., HIRATA, F. E., RIBEIRO, C. R., SARAIVA, A. M. R. Hydrodynamical processes of the entrance channel of Patos Lagoon. In: The 18th Conference of the Estuarine Research Federation, 2005, Norfolk. Abstracts of the 18th Conference of the Estuarine Research Federation. Norfolk. 2005. v.1, p.187-187.

WANG, J. D., J. J. CONNOR. Mathematical modeling of near coastal circulation. Technical Report. R. M. Parsons Laboratory Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1975.

WONG, K. C., THROWBRIDGE, J. H. Some observational evidence on the effect of atmospheric forcing on tidal variability in the upper Delaware Bay. **Journal of Geophysical Research**. 1990, v.95, p.16229-16240.