

**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**

**MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DA
LAGOA DA CONCEIÇÃO - SC**

Fabio Bertini Godoy

Orientador: Davide Franco, Dr.

**Florianópolis, SC
Março, 2009**

Fabio Bertini Godoy

**MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA
CONCEIÇÃO - SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, área de concentração Hidrodinâmica Costeira.

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

**Florianópolis, SC
Março, 2009**

MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO - SC

Fabio Bertini Godoy

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade de Santa Catarina para a obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**.

Aprovado por:

Ricardo de Camargo, Dr.,
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG - USP

Rodrigo do Carmo Barletta, Dr.,
Centro de Geociências - UFSC

Masato Kobiyama, Dr.,
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC

Davide Franco, Dr,
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC

Flavio Lappoli, Dr.
(Coordenador)

Davide Franco, Dr.
(Orientador)

**Florianópolis, SC
Março, 2009**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Davide Franco, pela oportunidade oferecida, pelos conhecimentos transmitidos através da orientação e convívio, pela paciência, esperança e pela amizade.

À Nadia pelo companheirismo, amor, compreensão e força dada nos momentos difíceis, além do auxílio com os estudos hidrológicos.

Aos meus pais Michéas e Zuleica, irmãos Carla, Elcio e Luciana pelo incentivo e apoio em todos os momentos de minha trajetória estudantil.

Aos meus sobrinhos Pedro e Isabela pela esperança no futuro.

Aos colegas do LaHiMar, iniciando pelo Henrique, incansável coletor de dados de campo, ao Rodrigo parceiro de muitas horas de estudo e de MatLab, ao Gilmar, Fabiane, Sabrina, Karla, Julia, Vinicius, Rafael, Balz e principalmente ao Prof. Elói, fundador do LaHiMar, eterno inspirador do espírito investigativo e do surf.

Ao Prof. Masato Kobiyama sempre sereno e trabalhador, auxiliando a enfrentar os entraves do percurso.

Ao Prof. Péricles Medeiros por ceder espaço em seu laboratório e por incansáveis discussões científicas.

À equipe do IST de Portugal por desenvolver e disponibilizar o modelo MOHID, e ainda sempre disposta a dar suporte e esclarecer dúvidas.

Ao CNPq por financiar o projeto e a bolsa de estudo.

A toda a equipe de professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFSC.

E a Deus.

Muito Obrigado!

RESUMO: A Lagoa da Conceição (27°34'S e 48°27'O), classificada como laguna e situada no município de Florianópolis/SC conecta-se ao mar pelo Canal da Barra da Lagoa e forma um sistema estuarino caracterizado por ecossistemas localizados na interface oceano/terra; complexos e altamente produtivos. Este trabalho faz parte de um projeto que o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) vem desenvolvendo na Lagoa da Conceição, desde 2004, em uma linha de pesquisa de estudo da circulação e dispersão de poluentes em ambientes estuarinos e costeiros do litoral de Santa Catarina. A presente proposta visou estudar a circulação da Lagoa por meio da modelagem a hidrodinâmica com a utilização do MOHID. Com o intuito de verificar o comportamento da laguna frente a diferentes descargas de água doce, foram estudados de três cenários: o primeiro forçado apenas com o nível medido na estação maregráfica em mar aberto (Vazão Nula), outro com o nível medido em mar aberto associado a uma contribuição do rio João Gualberto de vazão constante e igual a $1\text{m}^3/\text{s}$ e o terceiro cenário forçado com o nível em mar aberto associado a uma vazão sintética do rio João Gualberto variando de acordo com o regime pluviométrico. Esta vazão sintética foi modelada pelo modelo Curva Número (CN) do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e ajustado para ter média igual a $1\text{m}^3/\text{s}$. Ao serem analisados os níveis médio da laguna em 3 pontos em seu interior (Norte, Centro e Sul) e a penetração da onda de maré no canal em 10 pontos ao longo do canal verificou-se uma forte elevação do nível em todos os compartimentos da laguna com uma defasagem de tempo variável em relação ao Ponto O por ocasião de um forte evento hidrológico. A análise harmônica demonstrou que os efeitos meteorológicos não se evidenciam nas altas frequências e que há uma redução da ordem de 99,5% da variância entre os sinais nos Pontos O e L e um atraso maior dos constituintes diurnos e um ligeiro aumento do número de forma. O nível meteorológico foi analisado por análise espectral. O alinhamento das séries, por correlação cruzada, possibilitou a verificação de um menor atraso de fase relativo dos Pontos O e L no cenário de vazão variável. A análise espectral do nível meteorológico demonstrou como é significativo o período de ocorrência de sistemas frontais, de cerca de 5 dias, contudo este fato ficou menos evidenciado no cenário de Vazão Variável, onde foram obtidos valores menores das funções ganho e coerência quadrática em relação às demais simulações. O modelo MOHID é uma ferramenta eficaz e permitiu alcançar resultados compatíveis com trabalhos de Andrade (2001), Pereira (2004) e Rocha (2007) que realizaram diferentes abordagens para análise do comportamento hidrodinâmico da laguna e do canal.

PALAVRAS-CHAVES: Hidrodinâmica costeira, MOHID, modelo Curva Número, Lagoa da Conceição, análise harmônica e espectral.

ABSTRACT: The Conceição Lagoon (27°34'S and 48°27'W), situated in the city of Florianópolis/SC is connected to the sea by the Barra da Lagoa Inlet, it forms an estuarine system characterized by ecosystems located in the ocean / land interface; complexes and highly productive. This work makes part of a project which the Laboratory of Maritime Hydraulics (LaHiMar) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC) is developing in the Conceição Lagoon, from 2004, inside a line of research turned to the study of the circulation and dispersal of pollutants in estuarine and coastal environments of Santa Catarina's coast. The present proposal aimed to model the hydrodynamic of the Conceição Lagoon using MOHID from three sceneries, being the first one forced only with the tide level at the open sea (Null Flow), other with the level at the open sea associated to a discharge of the João Gualberto river with a constant and equal flow of $1\text{m}^3/\text{s}$ and the third scenery forced with the sea level associated to a synthetic flow of the João Gualberto river varying in accordance with the pluviometric regime. This synthetic flow was modeled by the Curve Number (CN) model of the Native Resources Conservation Service (NRCS) of the Department of Agriculture of the United States and adjusted in order to have the mean value of $1\text{m}^3/\text{s}$. As the levels were analyzed inside the lagoon at three points (North, Central and South) and the penetration of the tidal wave in the channel at 10 points along the channel it was possible to observe a strong elevation of the level in all the compartments of the lagoon with a variable time lag towards point O for the extreme hydrological event. The harmonic analysis demonstrated that the meteorological effects do not show up in the high frequencies and that there is a variance reduction of 99,5 % between the signals at Point O and L and a greater time lag of daytime constituent and a slight increase of the number of form. The meteorological level was analyzed by spectral analysis. The alignment of the series, for crossed correlation, allowed to verify a smaller time lag between the Points O and L in the variable flow scenery. The spectral analysis of the meteorological level demonstrated the significance of the incidence of frontlets systems period, of around 5 days, nevertheless this fact was less shown up in the scenery of Variable Flow, where smaller values of the gain and square coherence functions were obtained. MOHID is an effective tool and it allowed reaching compatible results with Andrade (2001), Pereira (2004) and Rocha (2007) studies that carried out different approaches for hydrodynamic analysis of the lagoon and of the channel behaviour.

KEYWORDS: Coastal Hydrodynamic, MOHID, Curve Number model, Conceição Lagoon, harmonic and spectral analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Solução gráfica da equação (4).	13
Figura 2: Hidrograma unitário adimensional.....	16
Figura 3: Esquema de uma célula no sistema de coordenadas verticais genéricas (Martins <i>et al.</i> , 2001).....	19
Figura 4: Fluxograma da metodologia de trabalho.....	28
Figura 5: Localização da área de estudo.....	29
Figura 6: Curva hipsométrica da Bacia da Lagoa da Conceição. Fonte: Bauer Neto, 2007.	36
Figura 7: Hipsometria da bacia da Lagoa da Conceição	37
Figura 8: Tempo de concentração das sub-bacias. Fonte: Bauer Neto, 2007.....	38
Figura 9: Localização da estação maregráfica de Jurerê e da Estação meteorológica da Barra da Lagoa.	40
Figura 10: Esquema de instalação do Marégrafo em Jurerê elaborado por Henrique Frasson (LaHiMar, 2007).....	41
Figura 11: Correção dos limites do canal. Em pontilhado o limite antigo e em linha cheia o limite corrigido.	42
Figura 12: Limites das microbacias com destaque para a microbacia do rio João Gualberto.....	43
Figura 13: Mapa de solos (1:100.000).....	44
Figura 14: Grade batimétrica utilizada na modelação.	47
Figura 15 - Distribuição espacial dos sedimentos na Lagoa da Conceição.....	52
Figura 16 - Pontos analisados para a influência hidrológica no comportamento hidrodinâmico..	54
Figura 17: Mapa de uso e cobertura do solo.....	57
Figura 18: Complexo hidrológico da microbacia do rio João Gualberto.	58
Figura 19: Hietograma e vazão utilizados na simulação do cenário com vazão variável.	59
Figura 20: Comparação do nível medido em Jurerê com o modelado no Ponto O.....	60
Figura 21: Correlação cruzada entre o Nível medido em Jurerê e no Ponto O.	61
Figura 22: Níveis totais nos três cenários avaliados nos pontos O e L.	62
Figura 23: Níveis totais nos três cenários avaliados nas seções Norte, Centro e Sul.....	63
Figura 24: Maré astronômica dos três cenários simulados nas seções O e L. Os dois gráficos tem diferentes escalas de ordenada.....	64
Figura 25: Constituintes significativos – Ponto O – Vazão Nula.....	66

Figura 26: Constituintes significativos – Ponto L – Vazão Nula.	66
Figura 27: Variação da amplitude dos principais constituintes Vazão Nula.....	68
Figura 28: Diferença temporal relativa à seção O para a simulação Vazão Nula.	69
Figura 29: Variação da amplitude Vazão Constante.	70
Figura 30: Variação da amplitude Vazão Variável.	70
Figura 31: Diferença temporal de fase Vazão Constante.	70
Figura 32: Diferença temporal de fase Vazão Variável.	70
Figura 33: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para a Vazão Nula. .	71
Figura 34: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para Vazão Constante.	72
Figura 35: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para Vazão Variável.	72
Figura 36: Atenuação da variância da maré astronômica para os três cenários simulados.....	73
Figura 37: Níveis Astronômicos e Meteorológicos na seção L para os três cenários simulados. .	74
Figura 38: Níveis astronômicos nos três compartimentos da laguna.	75
Figura 39: Maré meteorológica dos três cenários simulados nos seções O e L. Gráficos com diferença de escalas verticais.....	76
Figura 40: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para o Nível Jurere.	77
Figura 41: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para Vazão Constante.	77
Figura 42: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para Vazão Variável.	78
Figura 43: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Nula.	79
Figura 44: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Constante.....	79
Figura 45: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Variável.	80
Figura 46: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Nula.	81
Figura 47: Função ganho entre os Pontos O e L Vazão Nula.	81

Figura 48: Função Coerência quadrática entre os Pontos O e L Vazão Nula.	81
Figura 49: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Constante.	82
Figura 50: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Variável.	82
Figura 51: Função ganho entre os Pontos O e L Vazão Constante.	82
Figura 52: Função ganho entre as seções O e L Vazão Variável.	82
Figura 53: Função Coerência quadrática entre as seções O e L Vazão Constante.	82
Figura 54: Função Coerência quadrática entre as seções O e L Vazão Variável.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: CN para bacias urbanas e semi-urbanas	14
Tabela 2: Normais climatológicas para Florianópolis.....	31
Tabela 3: Uso e cobertura do solo referente ao ano de 2004 (Godoy, 2007).....	33
Tabela 4: Complexo Hidrológico da Microbacia do rio João Gualberto com respectivo CN e área relativa.	48
Tabela 5: Variáveis utilizadas para cálculo da vazão de descarga	49
Tabela 6: Constituintes utilizados no aquecimento do modelo.....	53
Tabela 7: Distâncias adotadas ao longo do canal.	54
Tabela 8: Áreas discriminadas de uso e cobertura.....	56
Tabela 9: Área dos diferentes tipos de solo da Lagoa da Conceição.	58
Tabela 10: Amplitude da maré astronômica nas desembocaduras externa e interna do canal para as três simulações e respectivos Número de forma.	67
Tabela 11: Comportamento das fases (em Graus) nas desembocaduras externa (O) e interna (L) do canal para as três simulações.	69
Tabela 12: Atraso médio (em horas) do nível astronômico reconstituído em relação ao ponto O para os três cenários simulados.	71
Tabela 13: Análise de variância da variação do nível do mar nas duas desembocaduras do canal para os três cenários simulados.	74
Tabela 14: Atraso (em horas) dado pela correlação cruzada entre a seção em estudo e o Ponto Oceano (O) para a maré meteorológica.....	78

SÍMBOLOS

Q - altura de precipitação efetiva;

P - altura de água precipitada;

I_a - perdas iniciais;

S - capacidade de retenção máxima;

CN - Curva Número;

q - vazão por centímetro de chuva excedente;

q_p - vazão de pico por centímetro de chuva excedente;

T_p - tempo de ocorrência do pico;

t_L - tempo de resposta da bacia;

t_c - tempo de concentração;

t_r - duração da precipitação excedente;

A_d - área de drenagem;

t - tempo;

u, v, w - componentes da velocidade;

f_c - parâmetro de Coriolis;

p - pressão;

ρ - densidade da água;

g - aceleração da gravidade;

A_H - viscosidade cinemática turbulenta na horizontal;

A_V - viscosidade cinemática turbulenta na vertical;

$X(t)$ - oscilação periódica;

H_x - amplitude da oscilação;

ω_x - velocidade angular;

g_x - diferença de fase relativa a um zero;

T_x - período;

γ - autocovariância;
 B - operador;
 Z_{t_1}, Z_{t_2} - valores reais;
 f - espectro de potência;
 A_{xy} - amplitude cruzada do espectro;
 $f_{xy}(\omega)$ - fase do espectro;
 c_{xy} - parte real do número complexo;
 q_{xy} - parte imaginária do número complexo;
 G_{xy} - função ganho;
 K_{xy} - função coerência quadrática;
 ρ_{xy} - correlação cruzada
 σ_x e σ_y - desvios padrões
 x_t e y_t - variáveis
 k - atraso entre séries;
 Dd densidade de drenagem
 Dr - densidade de rios;
 Kc - Coeficiente de compacidade;
 Kf - Coeficiente de forma;
 I - declividade;
 n - numero de elementos;
 DR - distância relativa;
 $\bar{\tau}$ - atrito de fundo;
 \bar{V} - vetor velocidade horizontal;
 C_D - coeficiente de atrito;
 z_0^b - rugosidade de fundo;
 κ - constante de von Karman;
 ε - amplitude da rugosidade equivalente;

F - número de forma;

τ_{const} - diferença de fase do constituinte no ponto estudada em relação o ponto Oceano;

φ_{const} - fase do constituinte na seção estudada;

φ_o - fase do constituinte na seção Oceano;

$freq(c/h)$ -freqüência;

A_{cn} - área ocupada por cada combinação solo-cobertura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. GERAL	5
2.2. ESPECÍFICOS	5
3. JUSTIFICATIVA	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA EM LAGUNAS COSTEIRAS	7
4.2 HIDRODINÂMICA DA LAGUNA DA CONCEIÇÃO	9
4.3 MODELO HIDROLÓGICO CURVA NÚMERO	11
4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA MOHID	16
4.4.1 <i>Generalidades</i>	17
4.4.2 <i>Malha computacional</i>	17
4.4.3 <i>Entrada e saída de dados</i>	19
4.4.4 <i>Condições de fronteira</i>	19
4.4.5 <i>Evolução das variáveis de estado</i>	20
4.5 MARÉ, ANÁLISE HARMÔNICA E ESPECTRAL	23
5. MATERIAS E MÉTODOS	28
5.1 FLUXOGRAMA	28
5.2 ÁREA DE ESTUDO	29
5.3 CARACTERÍSTICAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA	35
5.4 DADOS AMBIENTAIS	38
5.5 GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS (BDG)	41
5.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CURVA NÚMERO	47
5.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA	49
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
7. CONCLUSÕES	83
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

Florianópolis, a capital do Estado de Santa Catarina, está situada em sua maior parte na Ilha de Santa Catarina. Suas quarenta e duas praias e vegetação exuberante, típica de mata atlântica e de restinga, lhe conferem um cenário de grande beleza natural associado a um clima de verões quentes e de águas com temperatura agradável.

A Lagoa da Conceição, inserida nesta natureza e um dos principais pontos turísticos da capital, vem se consolidando também como um bairro onde as antigas casas de veraneio estão se tornando residências de moradores fixos e, em muitos casos, edifícios multifamiliares. Este crescimento urbano desordenado resulta em vários problemas decorrentes do uso das terras com agressões a natureza, que devem ser conhecidas e suas causas controladas (DUARTE, 1999).

A Lagoa da Conceição é uma laguna ligada ao mar pelo Canal da Barra da Lagoa, formando um sistema estuarino caracterizado por ecossistemas localizados na interface oceano/terra e, por isto, complexos e altamente produtivos. Nos estuários ocorrem importantes processos de mistura da água continental e oceânica. Como zonas de transição entre ambientes marinhos e fluviais, terrestres e aquáticos, estão sujeitas as transformações nas mais diversas escalas de tempo e espaço e, portanto altamente sensíveis à influência antropogênica (KRUG e NOERNBERG, 2005).

Nas diferentes regiões da Bacia Hidrográfica, as ocupações previstas nos planos específicos apenas alteram o zoneamento e transformam áreas verdes e de preservação limitada em áreas residenciais e turísticas. Estes empreendimentos expõem a Lagoa ao aumento progressivo de resíduos domésticos (lixos e esgotos) e conseqüente poluição, ao aumento do consumo de água e à maior impermeabilização do solo. Também as áreas de preservação, de mata nativa e de lazer do ecossistema lagunar – de tamanha importância ecológica e econômica, são descaracterizados diariamente por atitudes isoladas, como retirada da mata ciliar das margens da Lagoa e dos rios que nela desembocam. Barbosa (2003) em seu estudo aponta, entre outros, esgoto doméstico; poluição por embarcações; poluição por agrotóxico; poluição por sedimentos – assoreamento;

acidificação pela vegetação de *Pinus* do Parque do Rio Vermelho como os principais fatores impactantes do corpo lagunar.

Sierra de Ledo e Soriano-Serra (1999a) reuniram levantamentos técnicos e estudos científicos sobre o ecossistema da Lagoa da Conceição onde foram apresentados trabalhos referentes aos processos hidrodinâmicos como a batimetria realizada por Muehe e Caruso Jr (1999) referente ao ano de 1983, a caracterização textual dos sedimentos de fundo da laguna (GRÉ e HORN FILHO, 1999), o estudo preliminar das marés na Lagoa da Conceição (KLINGEBIEL e SIERRA de LEDO, 1999) e os atributos e processos condicionantes da hidrodinâmica na laguna (SIERRA de LEDO e SORIANO SIERRA, 1999b).

Com o intuito de estudar a circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição, através dos padrões médios de circulação e dos perfis de velocidade e determinar os principais forçantes do escoamento, Andrade (2001) comparou cenários influenciados pelo vento local e pela maré astronômica atuantes na região realizando a análise do comportamento do corpo lagunar quanto à sua oscilação natural decorrente da incidência de ventos, determinando os períodos e amplitudes dos seiches formados em seu interior.

Estudos quantitativos dos parâmetros hidrodinâmicos de direção e intensidade de corrente e físico-químicos como salinidade, temperatura, pH e turbidez das águas do Canal da Barra da Lagoa, foram realizados por Pereira (2004), que procurou avaliar o seu comportamento.

Em 2004, dando início às atividades do Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na Lagoa da Conceição, dentro de uma linha de pesquisa voltada ao estudo da circulação e dispersão em ambientes estuarinos e costeiros do litoral de Santa Catarina, Koefender (2005) realizou a análise numérica da influência batimétrica no padrão de circulação hidrodinâmica da laguna, comparando levantamentos topobatimétricos de dois períodos diferentes e Lino (2005) estudou a influência relativa das variações do nível do mar na faixa astronômica e meteorológica sobre a hidrodinâmica da Lagoa.

A implementação de um estudo hidrodinâmico com a calibração dos dados modelados foi realizada por Rocha (2007). Para esse fim, em 2006, foram realizadas várias campanhas de

duração mensal de medição de nível e corrente em pontos interiores ao corpo de água, e desde 2005, opera uma estação meteorológica automática na Barra da Lagoa.

A partir do final de 2005 os estudos se ampliaram para a bacia da Lagoa da Conceição, com o objetivo de caracterizar o uso e cobertura das terras na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição e verificar possíveis tendências na caracterização temática. Os trabalhos utilizaram técnicas de geoprocessamento a partir de fotografias aéreas da região referentes ao ano de 2004 (GODOY *et al.*, 2006; GODOY, 2007) e de 1998 (ODRESKI, 2007).

Dentro do contexto apresentado, a presente proposta visou realizar a modelagem hidrológico-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição, com base em medições meteorológicas foi criada de uma série temporal de vazões sintéticas por meio de aplicação do modelo Curva Número (CN) do *Natural Resources Conservation Service* (NRSC) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Foi realizada a análise harmônica e espectral dos níveis resultantes de simulações modeladas com o modelo hidrodinâmico MOHID. Foram simulados três cenários: o primeiro forçado apenas com o nível mareográfico medido em mar aberto, o segundo forçado com o nível medido em mar aberto e uma descarga de vazão uniforme e igual a $1\text{m}^3/\text{s}$ no rio João Gualberto e o terceiro cenário modelado foi forçado com o nível mareográfico medido e descarga variada no tempo de acordo com o regime pluviométrico com média no período igual a $1\text{m}^3/\text{s}$ no mesmo rio. A análise harmônica dos constituintes astronômicos e a análise espectral do nível meteorológico possibilitou a comparação da atenuação da onda de maré no Canal da Barra da Lagoa nas três simulações realizadas. Ao final do trabalho conseguiu-se ainda complementar o banco de dados geográfico do LaHiMar.

Ao serem analisados os níveis médios da laguna e a penetração da onda de maré no canal em 10 pontos ao longo do canal e 3 pontos (Norte, Centro e Sul) no interior da laguna verificou-se uma forte elevação do nível em todos os compartimentos da laguna com uma defasagem de tempo variável em relação ao Ponto O por ocasião de um forte evento hidrológico. A análise harmônica demonstrou que os efeitos meteorológicos não se evidenciam nas altas frequências, que há uma redução da ordem de 99,5% da variância entre os sinais nos Pontos O e L, um atraso maior dos constituintes diurnos e um ligeiro aumento do número de forma. O nível meteorológico foi analisado por análise espectral. O alinhamento das séries, por correlação cruzada, possibilitou a verificação de um menor atraso de fase relativo dos Pontos O e L no cenário de vazão variável. A

análise espectral do nível meteorológico demonstrou como é significativo o período de ocorrência de sistemas frontais, de cerca de 5 dias, contudo este fato ficou menos evidenciado no cenário de Vazão Variável, onde foram obtidos valores menos das funções ganho e coerência quadrática em relação às demais simulações. O modelo MOHID é uma ferramenta eficaz e permitiu alcançar resultados compatíveis com trabalhos de Andrade (2001), Pereira (2004) e Rocha (2007) que realizaram diferentes abordagens para análise do comportamento hidrodinâmico da laguna e do canal.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Modelar, a partir de parâmetros meteorológicos da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição e de dados oceanográficos, o comportamento hidrodinâmico do sistema estuarino com diferentes cenários hidrológicos.

2.2. Específicos

- Quantificar descargas pontuais, por meio da aplicação do modelo Curva Número sobre a microbacia do rio João Gualberto;
- Estruturar um banco de dados geográficos dos parâmetros físicos e hidro-meteorológicos analisados;
- Caracterizar, por meio de análise harmônica e espectral, as relações de nível na desembocadura externa do Canal da Barra e em sua respectiva desembocadura interna;
- Determinar a influência relativa do nível oceânico e de forçantes hidrológicas sobre o nível médio da laguna e na penetração da onda de maré no canal.

3. JUSTIFICATIVA

O estudo da contribuição hidrológica da bacia e sua estimativa de descarga pontual no corpo lagunar é um fator importante no entendimento da influência desta forçante na hidrodinâmica da laguna. Esta componente afeta o grau de mistura de água doce e marinha, alterando características importantes como salinidade, concentração de nutrientes e sedimentos, em menor grau a temperatura.

A Lagoa da Conceição como ambiente estuarino de encontro das águas oceânicas e continentais é um corpo d'água muito ameaçado pela pressão urbana que vem sofrendo nos últimos anos. O aumento da ocupação de sua margem e a alteração na cobertura de sua área terrestre compromete os níveis de assoreamento e de contaminações diversas na laguna. Como a maior laguna da Ilha e um ambiente que já acumula alterações antrópicas o comportamento hidrodinâmico da laguna não está completamente estudado de forma que trabalhos anteriores evidenciaram a necessidade de um estudo do comportamento hidrodinâmico frente diferentes condições hidrológicas (Lino, 2005, ROCHA, 2007).

O estudo das interações entre reservatório, bacia hidrográfica e oceano é necessário para o manejo integrado deste complexo sistema estuarino, como assegurado no Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (BRASIL, 1988), na Política Nacional de Recursos Hídricos artigo 3º, item VI (BRASIL, 1997) e na Política Nacional do Meio Ambiente que possui nos seus princípios o incentivo ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas à proteção dos recursos ambientais (BRASIL, 1981).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são apresentados os fundamentos para contextualização teórica deste estudo. Foi realizada a partir de diversas bases de dados e organizados de acordo com as palavras-chave.

4.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA EM LAGUNAS COSTEIRAS

Segundo Pheleger (1969)¹ *apud* Miranda *et al.* (2002), a laguna costeira é um corpo de água marinha interior, geralmente orientado na direção paralela à costa, separado do oceano por uma barreira, mas interligando-se ao mesmo com um ou mais canais restritos.

Miranda *et al.* (2002) propuseram a seguinte definição:

“Laguna costeira é um sistema marinho raso, geralmente orientado paralelamente à costa, separado do oceano por uma barreira, interligada pelo menos intermitentemente ao oceano por um ou mais canais”.

As lagunas costeiras possuem, geralmente, de 1 a 10 metros de profundidade. As principais forçantes hidrodinâmicas das lagunas costeiras são as descargas de água doce, a tensão de cisalhamento do vento, a topografia, a maré meteorológica e, em menor intensidade, a maré astronômica. Entretanto, por tratar-se de um ambiente localizado principalmente em regiões tropicais e subtropicais, e em alguns casos com grande superfície livre, os balanços precipitação-
evaporação e de calor também podem desempenhar um papel importante na circulação. As lagunas costeiras correspondem a 13% da área costeira mundial e são constantemente impactadas

¹ PHELEGER, F. B. **Some general features of coastal lagoons.** In Ayala-Castañares A. (ed.) *Lagunas costeras*, un Simposio. México. Universidade Autónoma de Mexico, pp. 5-26. 1969

por influências naturais e antropogênicas. Dependendo das condições climáticas locais as lagunas apresentam salinidade variando de completamente doce a hipersalina (KJERFVE, 1994).

As lagunas costeiras são convenientemente caracterizadas de acordo com a quantidade de água trocada com a região costeira adjacente e, também, com a intensidade da ação de maré no seu interior e que estão dinamicamente relacionadas com as condições dos canais e aberturas para o oceano. Sendo assim as lagunas são subdivididas em três tipos: sufocadas, restritas e vazadas ou abertas.

Lagunas sufocadas são geralmente formadas por uma série de células elípticas, conectadas ao oceano adjacente por um único canal estreito, típico de regiões costeiras com alta energia das ondas de gravidade, significativa deriva litoral e maré com altura moderada. O canal atua como um filtro dinâmico e, conseqüentemente, os efeitos da oscilação da maré e das correntes associadas são muito atenuados no interior da laguna. Este tipo de laguna também se caracteriza por grandes tempos de descarga, efeito dominante o vento e variação intermitente da estratificação vertical devido ao aquecimento solar e descarga de água doce.

As lagunas restritas são ambientes costeiros amplos, geralmente orientados na direção paralela à costa, que se desenvolveram em região com suprimento moderado de sedimentos e origem marinha. A troca de água com o oceano adjacente ocorre através de dois ou mais canais estreitos e a circulação é forçada pela maré bem definida.

As lagunas vazadas ou abertas são sistemas marinhos alongados com entradas múltiplas (canais de maré) e são típicas de regiões com amplitude de maré moderada ou grande. As correntes de maré nesses canais são suficientemente intensas e inibem a sedimentação. Esse tipo de laguna caracteriza-se por fraca estratificação vertical e salinidades muito próximas às do oceano adjacente (MIRANDA *et al.*, 2002).

4.2 HIDRODINÂMICA DA LAGUNA DA CONCEIÇÃO

Conforme a classificação das lagunas costeiras descritas no item 4.1, a Lagoa da Conceição pode ser caracterizada como uma laguna sufocada devido à conexão através de um canal estreito com o oceano, orientação paralela à costa e ainda formada por células elípticas.

Um dos primeiros estudos a abordar a hidrodinâmica da laguna por meio de modelagem foi o de Andrade (2001) que utilizou a maré astronômica como forçante associada aos ventos e verificou a grande influência dos ventos sobre os padrões de circulação da Lagoa da Conceição. Esta influência ficou evidente nos compartimentos Norte e Sul, onde a maré tem uma contribuição menor. Nos trechos mais rasos o autor observou o escoamento direcionado de acordo com o vento incidente e as maiores velocidades alcançadas. Também se puderam observar elevadas velocidades no canal, observando-se ainda uma redução brusca na saída do mesmo, reduzindo bastante a intensidade no interior do corpo lagunar, proporcionando formação de pontos de estagnação em regiões mais afastadas do canal.

Para as simulações realizadas por Andrade (2001) a influência do Canal da Barra sobre a circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição se fez de maneira que as elevações máximas no interior da Lagoa ocorrem com um atraso de aproximadamente 4 horas em relação à preamar na entrada do canal. O autor observou também que o enchimento e o esvaziamento da Lagoa da Conceição ocorrem sem defasagem significativa entre os níveis em seu interior e que há uma significativa influência do Canal da Barra na redução da altura da onda de maré.

Percebe-se que tanto na situação de sizígia quanto na quadratura a redução da altura da onda de maré é da ordem de 95%, proporcionando variações no interior da laguna da ordem de 5cm. As variações do nível d'água no interior da Lagoa da Conceição são basicamente influenciadas pela maré meteorológica. Considerando os efeitos das marés astronômica e meteorológica, percebe-se uma redução da altura da onda de maré no interior do estuário de cerca de 85%, com a elevação variando em torno de 0,20 m.

Para Koefender (2005), ficou evidente que as principais influências na circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição são as mudanças abruptas do perfil batimétrico, como o canal

intralagunar e o canal da Barra da Lagoa. Estes locais acarretam uma maior perda da energia por atrito devido às menores dimensões do perfil batimétrico e conseqüentemente maiores velocidades.

Os canais lagunares (*inlets*) são ambientes-chave no comportamento das lagunas costeiras, interferindo diretamente em condições de sedimentação e aporte de salinidade, nutrientes e outros materiais no sistema lagunar (PERILLO, 1995² *apud* PEREIRA, 2004). O fechamento do canal por bancos de sedimentos arenosos era um comportamento freqüentemente apresentado pela sua antiga hidrodinâmica, o que dificultava a navegabilidade dos pescadores e inibia os processos de trocas e renovação de águas interiores. Dragagens foram realizadas nos anos de 1954, 1955 e 1968 (as duas primeiras pelo Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis e a última pelo Departamento Nacional de Obras e Saneamentos), que foram seguidas pela obra de construção do enrocamento entre os anos de 1982 e 1985. Nova dragagem sucedeu a construção dos molhes em 1985, quando o fundo do canal, até sua conexão com a Lagoa, foi aprofundado até a cota de aproximadamente 3,00 m (FATMA, 1997³ *apud* BARBOSA, 2003).

Rocha (2007) analisou o comportamento dos níveis nas desembocaduras externa e interna do canal por meio de simulações de nível maregráfico medido em mar aberto associado a incidência de vento no corpo lagunar para calibrar o modelo Mike 21 do DHI Water & Environment. O autor simulou os cenários de: nível maregráfico medido com vento, nível maregráfico medido sem vento, nível astronômico sem vento, mudança da batimetria do canal e o tempo de residência de uma substância em diferentes concentrações.

Em seu estudo encontrou uma atenuação relativa das amplitudes de 90% para M2 e S2 e de 70% para K1 e O1, que corresponderam a 90% da energia total da maré astronômica ao longo do canal, observou que o volume de troca do nível astronômico é 37% do volume encontrado para a laguna e que o tempo de residência para o nível astronômico aumenta em 50% em relação ao nível medido com incidência de vento e que o vento influencia em 6% o tempo de residência.

² PERILLO, G. M. E.. **Geomorfology and sedimentology of estuaries**. Elsevier, Amsterdam:477, 1995.

³ FATMA - FUNDAÇÃO DE AMPARO À TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. **“Licença Ambiental de Implantação”** – (LAI n° 052/97) – Porto da Barra. Santa Catarina: 80. Florianópolis, .1997

4.3 MODELO HIDROLÓGICO CURVA NÚMERO

O modelo Curva Número (CN) é um dos métodos mais populares para computar volume de escoamento superficial para um dado evento de chuva (MISHRA, *et al*, 2005). Podemos citar como literatura o trabalho de McCuen (1982)⁴ apud Mishra, *et al* (2005) que proporciona linhas gerais para a aplicação prática do método de análise hidrológica; Steenhuis *et al.*(1995) fizeram uma revisão do modelo para a área variável do rio; Ponce and Hawkins (1996) fizeram uma revisão do modelo apontando vantagens e desvantagens enquanto Bonta (1997) realizou a determinação do valor de *CN* usando o método da distribuição derivada.

O CN estima o escoamento direto que consiste no escoamento combinado do escoamento de canais, superficial e subsuperficial em proporções desconhecidas. O escoamento de canais consiste na chuva caída diretamente sobre a superfície do córrego; o superficial corresponde ao escoamento que ocorre sobre o solo quando a taxa de chuva é maior que a taxa de infiltração do solo e o subsuperficial ocorre quando a água infiltrada encontra uma camada de condutividade hidráulica menor e caminha lateralmente na interface até aflorar. A equação de escoamento direto foi desenvolvida para estimar o escoamento total a partir de precipitação total, exclui-se assim a variável tempo e a intensidade de chuva é ignorada (NRCS, 2004a, TUCCI, 2004).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P > I_a \quad (1)$$

$$Q = 0 \quad P \leq I_a$$

em que Q é a altura de precipitação efetiva, P é a altura de água precipitada, I_a é as perdas iniciais; S é a capacidade de retenção máxima, que procura exprimir de forma empírica uma capacidade potencial máxima da bacia para absorver a água que se torna assim não utilizável para a geração de escoamento superficial. Este valor é função do Curva Número (*CN*) pela seguinte expressão.

⁴ McCuen, R. H., *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1982

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2a)$$

Para valores de retenção máxima em polegadas e pela expressão:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2b)$$

Para valores de retenção máxima em centímetros.

As perdas iniciais consistem, principalmente, na interceptação, infiltração no início da chuva e armazenamento nas depressões da superfície, e são representadas através da equação empírica que as relaciona com a capacidade de retenção máxima.

$$I_a = 0,2S \quad (3)$$

Pode-se assim calcular a estimativa de descarga em bacias perenes através da equação:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (4)$$

O valor de CN está compreendido entre 0 e 100, sendo zero correspondente a uma bacia de condutividade hidráulica infinita e cem a uma bacia totalmente impermeável. A Figura 1 ilustra a solução gráfica da equação (4).

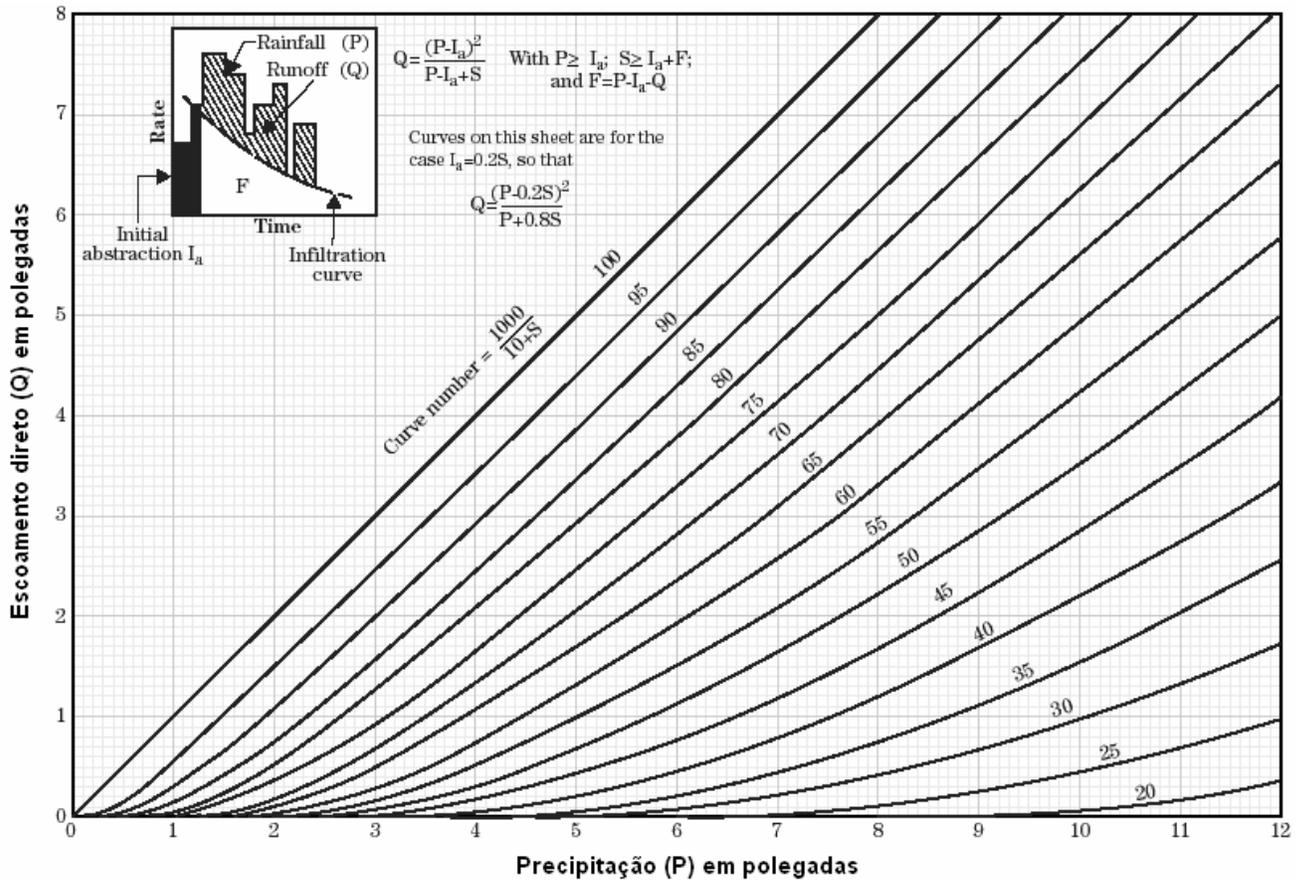


Figura 1: Solução gráfica da equação (4).

Fonte NRCS (2004a).

Os valores de *CN* estão associados à combinação do tipo do solo e do uso/cobertura que a área possui. Os solos considerados são de quatro grupos hidrológicos distintos (MOCKUS, 1972, NRCS, 2007a).

Tipo A – Solos que originam baixo potencial de escoamento direto ou que apresentam permeabilidade bastante elevada. Inclui areias profundas com muito pouco limo ou argila. Um solo típico deste grupo contém menos de 10% de argila e mais de 90% de areia ou cascalho com textura arenosa ou de cascalho.

Tipo B – Solos neste grupo têm um potencial de escoamento moderadamente baixo. Os solos típicos deste grupo contém entre 10% e 20% de argila e 50% a 90% areia.

Tipo C – Solos originando escoamentos diretos superiores à média e superiores aos originados pelos tipos anteriores. Solos típicos deste grupo contêm entre 20% e 40% de argila e menos que 50% de areia.

Tipo D – Solos contendo argilas expansivas e alguns solos pouco profundos com sub-horizontes quase impermeáveis que originam elevados escoamentos diretos. Solos com mais que 40% argila e menos que 50% de areia com textura argilosa.

A Tabela 1 apresenta os valores de *CN* para complexos hidrológicos solo-cobertura para bacias urbanas e semi-urbanas segundo NRCS (2004b).

Tabela 1: *CN* para bacias urbanas e semi-urbanas

Utilização ou Cobertura do solo		Tipo de solo			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas: Sem medidas de conservação do solo		72	81	88	91
Com medidas de conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou baldios: Em más condições		68	79	86	89
Em boas condições		39	61	74	80
Bosques ou zonas Florestais: Cobertura má		45	66	77	83
Boa cobertura		25	55	70	77
Espaços abertos relvados, parques cemitérios					
Boas condições: relva cobrindo 75% da área		39	61	74	80
Condições razoáveis: relva recobrimdo de 50% a 75%		49	69	79	84
Zonas residenciais					
Áreas médias dos lotes	Porcentagem média impermeável				
<500 m ²	65%	77	85	90	92
1000m ²	38%	61	75	83	87
1300m ²	30%	57	72	81	86
2000m ²	25%	54	70	80	85
4000m ²	20%	51	68	79	84
Arruamentos e estradas					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Gravilha		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Adaptado de NRCS (2004b).

Os valores de *CN* apresentam uma variabilidade em razão da intensidade e duração da precipitação total, das condições de umidade do solo, da densidade de cobertura e da temperatura. Estas causas da variabilidade estão reunidas na Condição Antecedente ao Escoamento (CAE), que é dividida em três classes: II para condições médias, I para condições secas e III para condições mais úmidas. A Tabela 1 é referente à CAE II. Para este trabalho, os escoamentos diretos foram calculados utilizando-se esta condição como referência.

Patil, *et al.* (2008) utilizou o modelo CN modificado integrado a interface GIS para avaliar a previsão de vazão para locais não monitorados a partir de uma série de chuva-vazão. Foi utilizada uma série de chuva e vazão de nove anos para validar a interface de estimativa de escoamento superficial que foi comparada, por meio de testes estatísticos de significância aos valores previstos no modelo CN e suas três modificações. Os autores concluíram que para diferentes condições antecedente ao escoamento há diferentes desempenhos do modelo e de suas modificações. A modificação do modelo CN também tem sido objeto de outros estudos como Mishra, *et al* (2003), Mishra *et al.* (2004) e Mishra *et al* (2008).

Hidrograma Sintético Unitário

O escoamento de uma bacia ocorre em diferentes padrões afetados por fatores como distribuição espacial e temporal da chuva, hidráulica dos canais, retenção da bacia e dos canais, características geomorfológicas e do solo ademais das condições de cobertura e uso do solo.

Denomina-se hidrograma ao gráfico de vazão pelo tempo em uma seção do canal. Os métodos computacionais para cálculo da vazão de pico são baseados em relações empíricas, começando pelo método racional para descarga de pico no século XIX, progredindo para o hidrograma unitário e os mais recentemente utilizados hidrogramas adimensionais.

O hidrograma natural pode ser definido como aquele obtido de medidas de vazões em um ponto de monitoramento; o hidrograma sintético como o obtido por meio de parâmetros da bacia e das precipitações para simular o hidrograma natural; o hidrograma unitário resulta de uma precipitação unitário distribuída uniformemente sobre a bacia e o hidrograma adimensional representa uma média de um grande número de hidrogramas unitários de bacias de diferentes características (NRCS, 2007b, CANHOLI, 2005).

O hidrograma unitário adimensional está representado na Figura 2, onde q é a vazão por centímetro de chuva excedente ($m^3/s.cm$); q_p é a vazão de pico por centímetro de chuva excedente ($m^3/s.cm$) e T_p é o tempo de ocorrência do pico (h). Pode-se converter esse hidrograma adimensional em um hidrograma unitário para uma duração desejada, desde que q_p e T_p sejam conhecidos. O hidrograma total de um dado evento pode ser construído por meio da soma dos hidrogramas parciais obtidos para cada bloco de chuva excedente, correspondente a cada intervalo de tempo e calculados através do CN. O tempo de ocorrência da vazão de pico T_p e a vazão de pico podem ser calculados por:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_L \quad (5)$$

$$t_L = 0.6 \cdot t_c \quad (6)$$

$$q_p = \frac{2.08 \cdot A_d}{T_p} \quad (7)$$

Em que: t_L é o tempo de resposta da bacia (h); t_c é o tempo de concentração (h); T_p é o tempo de ocorrência do pico (h); t_r é a duração da precipitação excedente (h) e A_d é a área de drenagem (km^2).

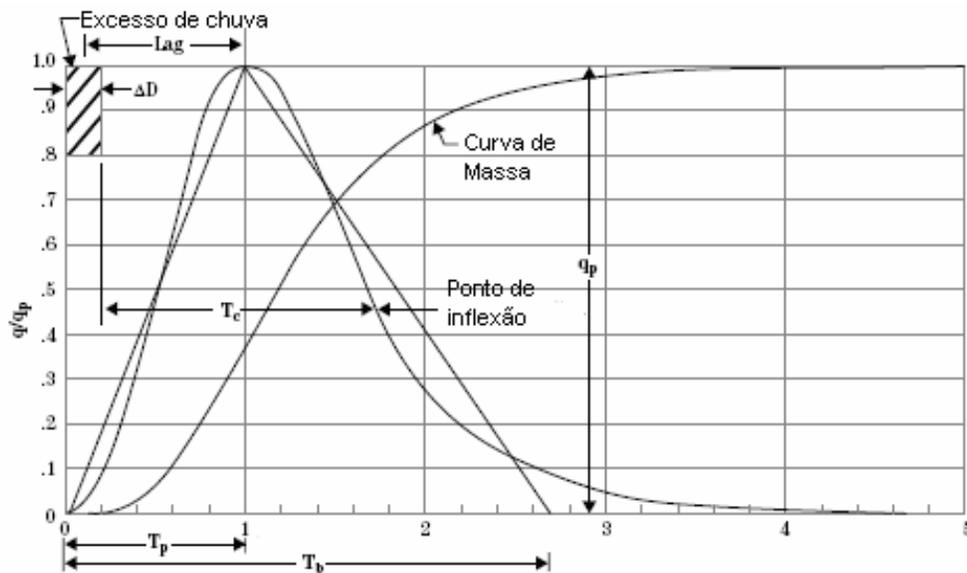


Figura 2: Hidrograma unitário adimensional.

Adaptado de: NRCS, 2007b

4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA MOHID

A descrição do sistema de modelagem MOHID foi retirada de seus manuais (MARETEC, 2007a e MARETEC, 2007b), bem como de trabalhos realizados pelo Instituto Superior Técnico da

Universidade Técnica de Lisboa como Braunschweig (2001) e Leitão (2002), entre outros citados ao longo do texto.

4.4.1 Generalidades

O sistema de modelagem *Mohid 2000* é constituído por aproximadamente 40 módulos, cada um responsável por uma tarefa específica. Estes módulos dividem-se em 4 grandes tipos: os módulos que estão relacionados com a descrição da malha computacional, os módulos que gerenciam a entrada e saída de dados numéricos, os módulos que são responsáveis pelas condições de fronteira do modelo e por último os módulos que modificam as variáveis de estado do modelo.

4.4.2 Malha computacional

No grupo dos módulos relacionados com a malha computacional incorporam-se os seguintes módulos:

O módulo *Bathymetry* tem como principal função a leitura do arquivo que contém os dados batimétricos e a organização desta informação sob a forma matricial. O módulo *Horizontal Grid* constrói, sob a forma matricial, a malha computacional em planta, usando para isso a informação batimétrica. Esta informação é posteriormente disponibilizada para todos os módulos de nível superior na hierarquia.

O módulo *Horizontal Map* gera a informação associada ao mapeamento horizontal da malha computacional. Este módulo disponibiliza aos outros módulos informação sobre a condição dos vários pontos e das várias faces da malha computacional, sob a forma de matrizes lógicas (p.e. ponto de terra, ponto de água, face com a fronteira aberta, etc.) O *Mohid 2000* suporta fronteiras móveis, conceito implementado no modelo para simular as zonas intertidais dos estuários. No modelo foi definido um parâmetro que indica a partir de que altura da água uma célula deve ser considerada descoberta. Quando um ponto tiver uma altura de água inferior a este parâmetro, todos os processos simulados neste ponto são “congelados”. A evolução temporal das fronteiras móveis justifica a existência de um processo eficaz de mapeamento.

O módulo *Geometry* calcula a partir da informação da malha horizontal e da discretização vertical do domínio do cálculo a geometria dos volumes finitos do modelo. Esta implantação da geometria vertical é genérica e podem ser definidas várias discretizações verticais do domínio.

Coordenada Vertical no Sistema Mohid 2000

A abordagem adotada neste modelo foi a de permanecer no domínio real resolvendo as equações pelo método do volume finito. Utilizam-se para isso células de cálculo retangulares na horizontal mas com os vértices livres para se mover no sentido vertical. Com isto consegue-se implementar qualquer tipo de coordenada vertical atuando unicamente sobre a geometria das células de cálculo, sem necessidade de alterar as equações hidrodinâmicas que desta forma não incluem termos relacionados com a forma da malha. Os processos físicos tornam-se também mais perceptíveis uma vez que tudo se passa no domínio real.

Este tipo de implementação permite também utilizar simultaneamente vários tipos de coordenadas em zonas distintas do domínio de cálculo (zonas estas denominadas sub-domínios).

O Volume de Controle

A malha adotada é uma malha descentrada do tipo C de Arakawa sendo as células de cálculo hexaedros. Os vértices destes hexaedros são coplanares na vertical definindo por isso de forma unívoca os planos que compõem as faces verticais. As faces superior e inferior de cada hexaedro são definidas pelos quatro vértices superiores e inferiores respectivamente, não são coplanares na horizontal, não definindo por isso univocamente uma superfície.

No modelo optou-se por uma superfície composta por quatro triângulos definidos pelo centro da superfície em questão (média vetorial das posições dos vértices) e por cada uma das quatro arestas. O cálculo do volume da célula e a determinação dos fluxos através das superfícies ficam facilitados pelo fato de a superfície ser composta setorialmente por planos. A Figura 3 mostra uma célula de cálculo utilizada no modelo *Mohid 2000* (Martins *et al.*, 2001).

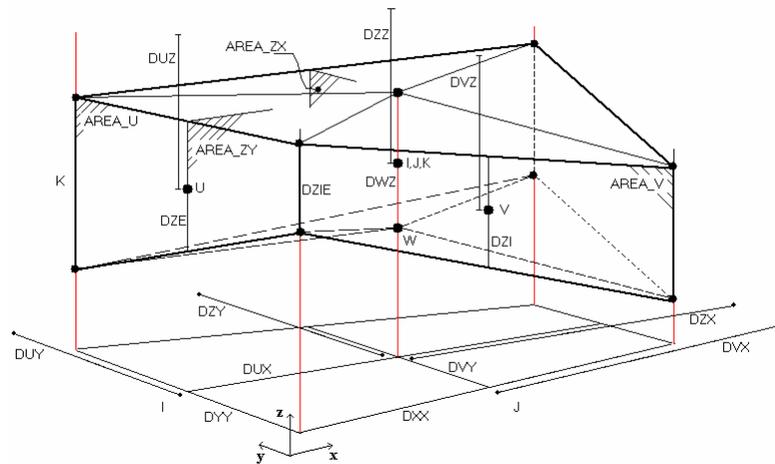


Figura 3: Esquema de uma célula no sistema de coordenadas verticais genéricas (Martins *et al.*, 2001).

Toda a informação relacionada com os volumes finitos é disponibilizada pelo módulo *Geometry* aos outros módulos e atualizada ao longo do tempo.

Por último, o módulo *Map* gera a informação do mapeamento tridimensional do modelo, em um processo idêntico ao módulo *Horizontal Map*.

4.4.3 Entrada e saída de dados

No grupo dos módulos relacionados com a entrada e saída de dados incorporam-se os seguintes módulos:

EnterData - Módulo que permite a leitura de arquivos ASCII, recorrendo a uma metodologia muito parecida ao XML.

HDFOutput - Gera a saída de resultados produzidos pelos vários módulos no formato HDF.

TimeSerie - Módulo que permite a entrada e a saída de séries temporais de dados numéricos.

4.4.4 Condições de fronteira

A simulação de sistemas regidos por equações às derivadas parciais exige condições de fronteira nos limites do modelo. O modelo *Mohid 2000* contém quatro módulos que simplificam a imposição das condições de fronteira ao modelo. O módulo *OpenBoundary* fornece as condições do modelo na fronteira aberta. O módulo *Discharges* é responsável pela entrada e saída de massas de água por processos não determinados pela solução no interior do domínio de cálculo (p.e. descargas de rios, descargas de efluentes ou vazões turbinadas em barragens). A estas

massas de água podem ser associadas propriedades transportadas pela água (p.e. concentrações ou temperaturas). O módulo *InterfaceWaterAir* fornece ao modelo fluxos através da superfície livre (p.e. quantidade de movimento, calor, fluxos de água, oxigênio). O módulo *InterfaceSedimentWater* fornece ao modelo fluxos através do fundo, de modo semelhante ao módulo *InterfaceWaterAir*.

4.4.5 Evolução das variáveis de estado

No grupo dos módulos relacionados com as variáveis de estado incorporam-se todos os módulos que fazem evoluir as propriedades da água e podem ser considerados como o núcleo central do modelo *Mohid 2000*.

Módulo Hydrodynamic

Gera e atualiza a informação do escoamento. Utiliza as condições da fronteira aberta (*Openboundary*), da superfície (*InterfaceWaterAir*), do fundo (*InterfaceSedimentWater*) e das descargas (*Discharges*) para obter as condições de fronteira. No caso do forçamento baroclínico recebe ainda a densidade da água do módulo *Waterproperties*.

O módulo *hydrodynamic* do modelo *Mohid 2000* resolve a forma primitiva tridimensional das equações do movimento. As únicas aproximações admitidas são a de Boussinesq e a hidrostática (Santos, 1995⁵ e Martins, 1999⁶ citados por MARETEC 2007a).

As equações de balanço da quantidade de movimento nas três direções espaciais e da continuidade em coordenadas cartesianas podem ser escritas segundo as Equações 8, 9, 10 e 11:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f_c v = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_c u = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (9)$$

⁵ SANTOS, A. J. - **Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e Estuarina**. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 1995.

⁶ Martins, F.– **Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica**. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. 1999

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

sendo: t o tempo; u, v, w as componentes da velocidade; f o parâmetro de Coriolis; p a pressão; ρ a densidade da água; g a aceleração da gravidade; A_H e A_V a viscosidade cinemática turbulenta na horizontal e vertical respectivamente.

As velocidades horizontais são calculadas com base nas equações do movimento enquanto a localização da superfície livre e a velocidade vertical são calculadas por continuidade. As equações são aplicadas explicitamente a cada volume de controle num referencial tridimensional (MARETEC, 2007a, MARETEC, 2007b).

A discretização temporal utilizada no modelo é semi-implícita do tipo ADI “*Alternate Direction Implicit*” a qual minimiza as restrições de estabilidade. Este mesmo esquema foi utilizado na primeira versão 2D do módulo hidrodinâmico (Neves, 1985). Os termos que introduzem maiores restrições de estabilidade foram discretizados implicitamente (pressão barotrópica, atrito, convecção e difusão vertical) enquanto que para os restantes optou-se por uma abordagem explícita. Foram adotados dois tipos de discretizações semi-implícitas: uma que necessita da resolução de 6 equações em cada passo temporal, conhecido pelo esquema de Leendertse (Leendertse, 1967⁷ apud MARETEC, 2007a), e uma segunda baseada no esquema S21 (Abbott *et al.*, 1973⁸ apud MARETEC, 2007a) que envolve a resolução de 4 equações.

As condições de fronteira abertas podem ser do tipo fluxo imposto, nível imposto, radiativas ou mistos. As fronteiras também podem ser fechadas, através das quais as trocas de massa são nulas, e fronteiras móveis. As fronteiras móveis são fronteiras fechadas cuja posição evolui no tempo. Este tipo de fronteira é utilizado para simular zonas intertidais nos estuários. O modelo verifica em cada passo de tempo quais os pontos inundados.

⁷ LEENDERTSE J., 1967. **Aspects of a computational model for long water wave propagation**, Memorandum RH-5299-RR Rand Corporation, Santa Monica, 1967.

⁸ ABBOT M.B., DAMSGAARD AND A., RODENHUIS G.S., **System 21, Jupiter, a design system for two-dimensional nearly-horizontal flows**, J. Hyd. Res. 1 (1973) 1-28.

Módulo Waterproperties

O módulo *Waterproperties* (propriedades de água) coordena toda a evolução das propriedades da água na coluna de água. A evolução das propriedades depende dos transportes advectivo e difusivo, das condições de fronteira e das fontes e sumidouros do módulo da qualidade de água. Este módulo utiliza a informações dos seguintes módulos para coordenar a evolução das propriedades de água:

- módulo *Hydrodynamic* para obter os fluxos entre as células;
- módulo *Turbulence* para obter as viscosidades e difusividades;
- módulo *InterfaceWaterAir* para obter os fluxos entre a atmosfera e a coluna de água;
- módulo *InterfaceSedimentWater* para obter os fluxos entre o fundo e a coluna de água;
- módulo *AdvectionDiffusion* para resolver o transporte das propriedades;
- módulo *WaterQuality* para calcular as fontes e os poços;
- módulo *Geometry* para conhecer a malha de cálculo.

Este módulo gerencia as propriedades que descrevem a qualidade de água (oxigênio dissolvido, nitrato, nitrito, etc.), o forçamento baroclínico do módulo hidrodinâmico (temperatura e salinidade) e propriedades genéricas (idade, coliformes). Neste trabalho é utilizada apenas a densidade da água como propriedade a ser considerada.

Módulo lagrangiano

O módulo lagrangiano simula o deslocamento de partículas e a evolução das propriedades de água associadas a estas partículas, recorrendo ao módulo das propriedades de água e ao módulo da qualidade de água. Neste trabalho o módulo *Lagrangiano* não é utilizado.

Módulo Waterquality

O módulo *Waterquality* (da qualidade de água) simula a produção e destruição de uma propriedade em cada ponto (formulação zero dimensional) baseado num modelo inicialmente desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (Bowie *et al.*, 1985⁹ apud Braunshweig,

⁹ Bowie, G. L., W. B. Mills, D. B. Porcella, C. L. Cambell, J. R. Pagendorf, G. L. Rupp, K. M. Johnson, P. W. Chan, S. A. Gherini, and C. E. Chamberlin – **Rates, Constants and Kinetic Formulations in Surface Water Quality Modeling**. U. S. Environmental Protection Agency. 1985

2001) e sucessivamente melhorado por Portela (1996)¹⁰, Miranda (1999)¹¹ e Pina (2001)¹² conforme Braunschweig (2001). Naqueles trabalhos foi simulada a dinâmica do zooplâncton (consumo primário), do fitoplâncton (produção primária) e dos nutrientes. Neste trabalho o módulo *Waterquality* também não é utilizado.

Módulo de turbulência

O módulo de turbulência implementado no modelo *Mohid 2000* fornece aos outros módulos a energia cinética turbulenta, o comprimento de mistura, as viscosidades horizontais e verticais, assim como as difusividades. O sistema *Mohid 2000* inclui modelos empíricos, de comprimento de mistura e modelos que resolvam equações para a energia cinética turbulenta e para o comprimento de mistura. Estes últimos são utilizados na generalidade dos escoamentos turbulentos. Todos os modelos usam o conceito de viscosidade turbulenta e são forçadas em função do escoamento médio.

4.5 MARÉ, ANÁLISE HARMÔNICA E ESPECTRAL

Franco (1981) refere-se a maré como a variação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas. Pugh (1987) de maneira mais detalhada define as marés como movimentos periódicos diretamente relacionados em amplitude e fase com algumas forças geofísicas periódicas. As forças geofísicas dominantes são função das variações no campo gravitacional da Terra, causadas pelos movimentos regulares dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol. As marés gravitacionais ou astronômicas são forçados por estes movimentos e se distinguem de movimentos menores causados por ação de forças meteorológicas, que ocorrem com períodos diretamente correlacionado com o dia solar, chamadas marés meteorológicas. Neste trabalho

¹⁰ Portela, L. S. – **Modelação Matemática de Processos Hidrodinâmicos e de Qualidade da Água no Estuário do Tejo**. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior. 1996.

¹¹ Miranda, R. – Nitrogen **Biogeochemical Cycle Modeling in the North Atlantic Ocean**. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. 1999

¹² Pina, P. M. N – **An Integrated Approach to Study the Tagus Estuary Water Quality**. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. 2001

analisaremos a maré a partir destes dois aspectos, não abordando os movimentos de maré causados por variações sazonais de níveis e variações no clima ao longo do ano.

Oscilações periódicas são descritas matematicamente em termos de amplitude e frequência:

$$X(t) = H_x \cos(\omega_x t - g_x) \quad (12)$$

H_x é a amplitude da oscilação, ω_x a velocidade angular que é relacionada ao período T_x pela equação

$$T_x = \frac{2\pi}{\omega_x} \quad (13),$$

com ω_x em radianos por unidade de tempo e g_x é a diferença de fase relativa a um zero definido, no caso do T_Tide a diferença é relativo ao meridiano de Greenwich (PAWLOWICZ, *et al*, 2002). A base da análise harmônica é fundamentada em assumir que as variações de marés podem ser expressas por um numero N , de termos harmônicos da forma da Equação 12.

Por convenção chama-se M2 a principal maré lunar semidiurna, onde o índice 2 denota aproximadamente duas marés em um dia, sendo também convencionadas as marés N2 e L2 pelas suas similaridades em velocidade. As marés com índice 1 representam as marés diurnas, as marés com índice 3 apresentam aproximadamente três marés em um dia. Em água rasa o avanço da onda de maré é modificado pelo atrito de fundo, sem entrarmos nos méritos algébricos dos componentes harmônicos de água rasa tem-se o M4 e S4, com frequências do tipo quarto-diurna, o componente MS4 é originária da combinação da M2 e S2, cuja interação também gera a mudança no nível médio do mar com longos períodos, como o componente MSF de período de 14,77 dias.

Para Franco (1981) a análise cruzada é uma ferramenta utilizada para correlacionar duas séries de dados observados, como por exemplo, o nível em uma laguna e em uma ilha próxima em mar aberto, uma vez que não é esperada nenhuma maré gerada por forças gravitacionais dentro de uma laguna pode-se assumir que a oscilação externa é responsável pela oscilação de nível dentro da laguna.

O espectro cruzado definido por Wei (1994) é a transformação de Fourier da função covariância (absolutamente possível de soma) de um processo. De maneira genérica um processo estacionário pode sempre ser representado por uma função de distribuição espectral.

Para uma dada seqüência de autocovariância γ_k , $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ a função geradora da autocovariância é definida como:

$$\gamma(B) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k B^k \quad (14).$$

E a função covariância entre dois valores reais, Z_{t_1} e Z_{t_2} de um processo:

$$\gamma(t_1, t_2) = E\left[(Z_{t_1} - \mu_{t_1})(Z_{t_2} - \mu_{t_2})\right] \quad (15)$$

e

$$\mu_{t_i} = E(Z_{t_i}) \quad (16).$$

Assim para cada freqüência ω tem-se o espectro densidade igual a:

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \gamma(e^{-i\omega}) \quad (17).$$

De maneira análoga tem-se a covariância cruzada e o espectro cruzado nos quais realiza-se a análise entre dois valores reais de dois processos correlacionados.

A função geradora da covariância cruzada é definida como:

$$\gamma_{xy}(B) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_{xy}(k) B^k \quad (18).$$

E o espectro cruzado entre x_t e y_t é dado por:

$$f_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \gamma_{xy}(e^{-i\omega}), \quad (19).$$

Como o espectro cruzado é em geral um número complexo formado pela parte real $c_{xy}(\omega)$ e pela parte imaginária $-q_{xy}(\omega)$ de $f_{xy}(\omega)$, define-se em forma polar o espectro cruzado como:

$$f_{xy}(\omega) = A_{xy}(\omega) e^{-i\phi_{xy}(\omega)} \quad (20).$$

Onde:

$$A_{xy} = |f_{xy}(\omega)| = [c_{xy}^2(\omega) + q_{xy}^2(\omega)]^{1/2} \quad (21),$$

$$\phi_{xy}(\omega) = \tan^{-1}[-q_{xy}(\omega)/c_{xy}(\omega)] \quad (22).$$

As funções A_{xy} e $\phi_{xy}(\omega)$ são conhecidas como a amplitude cruzada do espectro e a fase do espectro, respectivamente.

A função ganho é definida como:

$$G_{xy}(\omega) = \frac{|f_{xy}(\omega)|}{f_x(\omega)} = \frac{A_{xy}(\omega)}{f_x(\omega)} \quad (23).$$

E a função coerência quadrática é definida por:

$$K_{xy}^2(\omega) = \frac{|f_{xy}(\omega)|^2}{f_x(\omega) f_y(\omega)} \quad (24).$$

Wei (1994) indica que para reduzir a tendência do espectro cruzado deve-se alinhar as séries pelo atraso (*lag*) apresentado na correlação cruzada, definida por ele como:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (25).$$

A covariância cruzada também pode ser escrita desta forma:

$$\gamma_{xy}(k) = E[(x_t - \mu_x)(y_{t+k} - \mu_y)] \quad (26),$$

com σ_x e σ_y os desvios padrões de x_t e y_t e k o atraso (*lag*) das duas séries.

5. MATERIAS E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizado um computador com processador core2duo da marca Intel, com 2Gb de memória ram, um scanner de mesa tamanho A4, uma estação maregráfica com sensor de nível de pressão, equipamentos de armazenamento e de transmissão de dados e uma estação meteorológica multiparâmetros (chuva, temperatura, pressão atmosférica, radiação, intensidade e direção do vento, umidade e parâmetros correlatos).

5.1 FLUXOGRAMA

A metodologia de trabalho está ilustrada na Figura 4. O fluxograma apresenta a formação do banco de dados geográfico, a modelagem hidrodinâmica dos três cenários e as análises harmônica e espectral.

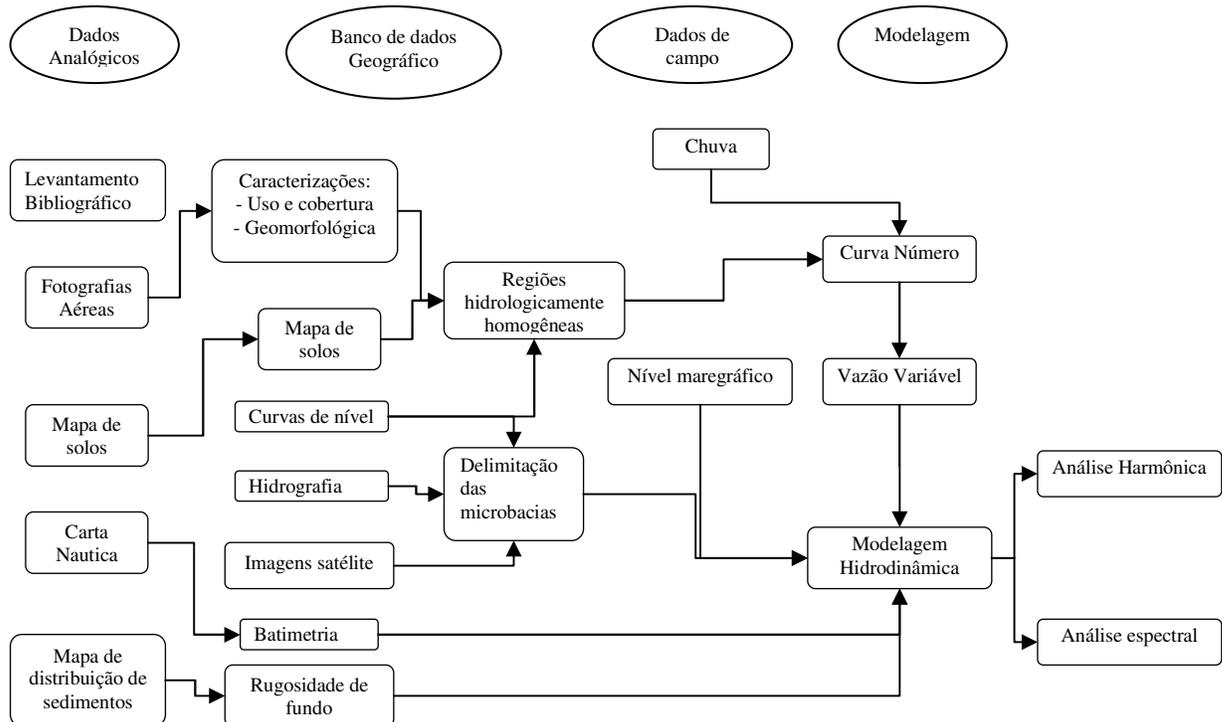


Figura 4: Fluxograma da metodologia de trabalho

5.2 ÁREA DE ESTUDO

Localização e Identificação

O local de estudo é a Lagoa da Conceição, que se localiza na porção leste da Ilha de Santa Catarina, município de Florianópolis, estado de Santa Catarina – Brasil.

De origem costeira, a Lagoa da Conceição é o corpo d'água de maior extensão na Ilha de Santa Catarina e situa-se entre os paralelos de 27°30' e 27°37' de Latitude Sul e entre os meridianos de 48°25' e 48°29' de Longitude a Oeste de Greenwich. A laguna ocupa uma área de 20,65 km² e está inserida em uma bacia hidrográfica de 78,13 km². O corpo d'água possui uma extensão de 13,5 km no sentido Norte-Sul, e largura variável entre 0,15 e 2,5 km, possui profundidade média de 1,7m e máxima de 8,9m (BAUER NETO, 2007, GODOY, 2007). A Figura 5 ilustra a localização da área de estudo.

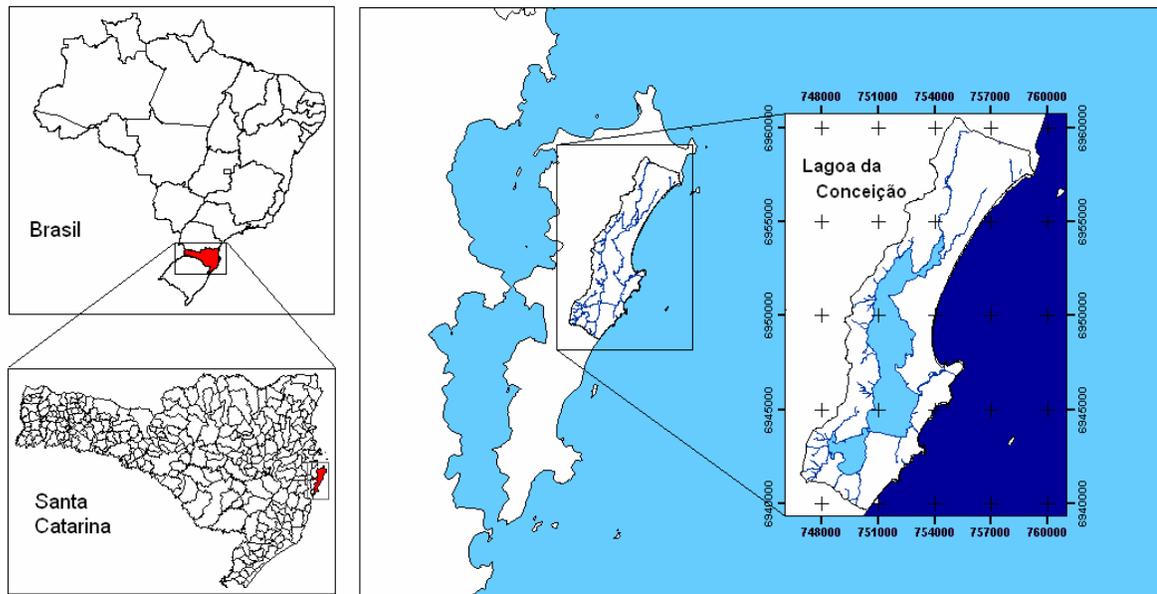


Figura 5: Localização da área de estudo.

A forma alongada da Lagoa da Conceição em paralelo à linha costeira, é irregular e recortada por dunas e morros que formam três subsistemas popularmente conhecidos como Lagoa Central, do Norte e do Sul ou simplesmente Lagoa do Meio de Cima e de Baixo (MUEHE e CARUSO Jr, 1999; HAUFF, 1996).

A Lagoa da Conceição é ligada ao mar através de um canal longo e estreito. Seis meandros de diferentes extensões, ângulos e larguras se estendem pelos 2,8 km que ligam o corpo lagunar à plataforma continental adjacente, na praia da Barra da Lagoa (PEREIRA, 2004). Devido ao seu comprimento, este canal reduz o efeito das marés no interior da Lagoa. O fluxo no canal foi garantido em 1982, com a retificação, dragagem e com a construção de molhes na sua desembocadura no mar. Antes destas retificações era natural que a barra do canal fechasse por períodos indefinidos, devido à deposição de areia pelo mar (CECCA, 1997).

Climatologia Regional

Para Nimer (1989) a região sul é uma das mais uniformes e de maior grau de unidade climática. Sua uniformidade é expressa pelo predomínio do clima mesotérmico, superúmido, sem estação seca e sua unidade pelo ritmo climática característico de regiões temperadas. A uniformidade e a unidade são dadas pelos fatores climáticos dinâmicos, pois o sul é uma região de passagem de frentes polares, o que a torna constantemente sujeita a brusca mudanças de tempo. A região sul constitui uma das regiões do mundo mais regadas por chuvas. O caráter temperado do clima do sul do Brasil confere a esta região uma importante oscilação térmica, com os litorais catarinense e paranaense apresentando temperaturas amenas no inverno. Segundo o mesmo autor os sistemas circulatórios estão sujeitos a grandes flutuações anuais, gerando como consequência possível notáveis desvios pluviométricos anuais. O litoral catarinense é dominado pelo clima subquente super úmido e Florianópolis possui temperatura média oscilando entre 18° e 15°C no inverno e entre 26° e 24°C no verão. A temperatura média anual é de 20,4°C (CECCA, 1997). A Tabela 2 apresenta as normais climatológicas para a região de Florianópolis e mostram a diferença da ordem de 50% entre as precipitações no inverno e no verão.

Tabela 2: Normais climatológicas para Florianópolis

Meses	Temp. Media °C	Temp. Mx abs °C	Temp. Mn abs °C	Prec. Total (mm)	Prec.Mx em 24h (mm)	Dias de Chuva (no.)	Umidade Relat (%)	Veloc Do Vento (m/s)	Direção dos Ventos 1a. (Predom.)
Jan.	24.5	38.2	10	196.7	56.8	14.8	80.9	3.5	N
Fev.	24.6	38.8	14.8	186.7	58.8	14.6	81.5	3.6	N
Mar.	24.1	36.9	10.2	170	52.8	14.2	81.7	3.4	N
Abr.	21.8	35.4	7.7	128.8	40.2	11.2	81.6	3.1	N
Mai.	19.4	33.5	3.3	107.2	46.5	8.9	82.4	2.8	N
Jun.	17.4	32	1.7	85.2	29.5	8.4	83.3	2.9	N
Jul.	16.3	32.7	1.4	82.6	30	8.8	83.1	3.1	N
Ago.	16.8	35	1.3	94.3	32	9.1	82.5	3.6	N
Set.	17.8	32.9	4.9	117.1	37.6	11.6	82.8	3.8	N
Out.	19.4	32.5	7.8	132.4	39.6	12.8	81.4	4.1	N
Nov.	21.2	37.5	9.4	131.8	46.5	12.5	79.6	4.2	N
Dez.	23	38.2	12.5	141.9	46.3	13.1	79.5	4	N
Anos Obs	90	72	71	90	70	62	90	78	58

Fonte EPAGRI/CIRAM (2007)

Cobertura Vegetal

A maioria dos autores enquadra a vegetação da Ilha em duas regiões botânicas: Vegetação Litorânea e Floresta Pluvial da Encosta Atlântica (também chamada de Floresta Ombrófila Densa) (CECCA, 1997).

Originalmente, o território da Ilha (423 km²) tinha 90% de sua área coberta pela vegetação, sendo 74% (313 km²) desta vegetação florestas, 9% (38,1 km²) mangue e 7% (29,6 km²) vegetação de praia, duna e restinga, com o restante ocupado 6% pelas águas das lagoas e 4% por dunas desnudas (CARUSO, 1990). A mesma autora demonstra, em seu estudo, que 83,2% das florestas, 6,7% dos mangues e 5,8% da vegetação de praia, duna e restinga, ou seja, 69,5% da cobertura vegetal total da Ilha haviam sido desmatados até 1938. Tendo este número aumentado para 76,1% até o ano de 1978.

Usos e manejo

A bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição (na qual se estabeleceu a freguesia de Nossa Senhora da Conceição da Lagoa) apresenta ocupação humana desde milênios atrás. Os primeiros povos a habitar a Ilha de Santa Catarina foram os povos dos sambaquis (palavra de origem guarani que significa *monte de conchas*). A quantidade de sítios arqueológicos (sambaquis,

oficinas líticas e gravuras rupestres) na Bacia da Lagoa evidencia a passagem destes povos há cerca de 5.000 anos. Na sucessão dos povos vieram os Itararés, cuja evidência arqueológica data do século X. O processo de transição dos Itararés para os Carijós é pouco conhecido. O terceiro grupo migrou para a Ilha no século XIV, cerca de duzentos anos antes da chegada dos primeiros europeus. Algumas tribos Carijós viveram na Lagoa da Conceição e Rio Tavares (CECCA, 1997).

A freguesia da Nossa Senhora da Conceição da Lagoa foi fundada na Ilha de Santa Catarina para fixar parte das famílias imigrantes das ilhas de Açores e Madeira chegadas a partir de 1750. (CECCA, 1997). Em 1753 se começou a registrar censos demográficos da área. No primeiro censo havia apenas 503 habitantes em toda a bacia e em meados do século XIX já contava com cerca de 3.450 habitantes (BARBOSA, 2003).

Atualmente a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição é habitada tanto pela comunidade nativa como por grupos de diferentes regiões do País e do exterior. Em 2000, o censo do IBGE apontava 23.929 habitantes (IBGE, 2000).

As margens do canal têm sido, como a bacia da Lagoa, igualmente utilizadas pelas populações através da história. As margens do canal atualmente abrigam a comunidade da Barra da Lagoa (norte) e Fortaleza da Barra da Lagoa onde a cobertura vegetal já perdeu grande parte de seu espaço original. Antigas atividades de coleta e extração de madeira mais tarde deram lugar a culturas e pastagens. Nas últimas décadas o turismo tem provocado flutuações populacionais consideráveis a ponto de provocar alterações significativas na qualidade das águas da laguna, e conseqüentemente do canal (CARUSO e MARIO, 2000). Godoy (2007) em seu estudo observou uma distribuição do uso e cobertura do solo referente ao ano de 2004 (Tabela 3).

Tabela 3: Uso e cobertura do solo referente ao ano de 2004 (Godoy, 2007).

Uso e Cobertura referentes a 2004		
Classificação	Percentual sobre o total terrestre	Área total em km ²
Vegetação Arbórea	55,39%	39,13
Pastagens	11,95%	8,44
Dunas e praias	13,67%	9,66
Urbano e vias	17,86%	12,60
Sem classificação	1,13%	0,80
Água/Veg. lag.	-	20,81

Aspectos pedológicos

Os tipos de solos encontrados em Florianópolis, segundo Sommer (1991) e Sommer e Rosatelli (1991) são:

Argissolo vermelho-amarelo e Argilossolo vermelho: encontrados na porção oeste da bacia da Lagoa da Conceição, são solos com profundidade média é de 1,5 m. São solos característicos de relevos mais ondulados – costumam ser das encostas e morros com grande fragilidade à erosão quando não possuem cobertura vegetal. Os argissolos vermelho-amarelo apresentam uma textura areno-argilosa, enquanto que os argilossolos vermelhos apresentam textura argilosa. Possuem horizonte A com 20 a 40 centímetros de espessura, de cor variável do bruno ao bruno-amarelado, textura argilosa, estrutura fraca a moderada pequena granular e consistência ligeiramente dura. Na composição granulométrica do horizonte A as contribuições médias das frações areia, silte e argila são de 22, 35 e 43% respectivamente, enquanto que no horizonte B essas mesmas frações contribuem com 16, 29 e 55%. Esta variedade de solo deu origem a três unidades de mapeamento simples (PVa18, PVa19 e PVa20).

Cambissolo: os cambissolos de acordo com EMBRAPA (2004) caracterizam-se por serem pouco desenvolvidos, com profundidade entre 0,5 e 1,5 m. Segundo Luiz (2004) não são encontrados na área de estudo da bacia

Neossolos litólicos: são solos muito rasos com profundidade entre 0,14 e 0,4m e por não possuírem um horizonte B, com o horizonte C diretamente abaixo do horizonte A. Sua textura varia de arenosa a cascalhenta e até pedregosa.

Afloramentos de rocha: afloramentos contínuos de rocha, tipo laje ou na forma de matacões ao longo das encostas ou na sua base.

Gleissolo háplicos (HGPa): solo encharcado, com horizonte A com matéria orgânica, seguido em profundidade por um horizonte chamado glei, de cor acinzentada e textura geralmente argilosa. São em geral pouco profundos, mal ou imperfeitamente drenados e com permeabilidade muito baixa. São formados de sedimentos recentes, próximos ou às margens dos rios, de materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia em terraços fluviais, lacustres ou marinhos, ou ainda em áreas abaciadas ou depressões do terreno como é o caso da Bacia da Lagoa da Conceição. Na composição granulométrica dos gleissolos de textura média a fração de areia é a mais importante, respondendo com mais de 50%, ao passo que as frações silte e argila praticamente se equivalem.

Organossolos (HO): são solos alagados e com muita matéria orgânica, são de coloração escura e geralmente apresentam textura argilosa. Estritamente são considerados como solos orgânicos aqueles que, saturados com água ou artificialmente drenados, apresentam pelo menos 12% de carbono orgânico, se o material tiver 60% ou mais de argila, e 8% ou mais de C orgânico, se a fração mineral não contiver argila ou conteúdos intermediários de C proporcionais aos teores de argila.

Neossolos quartzarênicos (areias quartzosas álicas) (AQ): estes solos são arenosos e profundos (1,0 a 3,0 m), com baixa fertilidade natural e pouca capacidade de retenção de água, por apresentarem textura arenosa. Os neossolos quartzarênicos são encontrados em regiões não alagadas enquanto que o neossolos quartzarênicos hidromórficos são encharcados pela presença do lençol freático.

Areias quartzosas marinhas: compreendem solos minerais, não hidromórficos, profundos ou muito profundos, com textura areia ao longo do perfil e seqüência de horizontes A, C. Ocorrem

ao longo da orla marítima, em forma de dunas fixas, estando recobertos por vegetação arbustiva e graminóide.

Dunas (DN): São extensos campos de dunas e praias encontrados na faixa costeira e em torno de algumas lagoas e lagunas, que têm como principal agente de formação o vento, são recobertas por uma flora paupérrima.

Para Sommer e Rosatelli (1991) os solos cascalhentos são os que apresentam de 15% a 50% de cascalho em todo o perfil. A textura arenosa compreende as classes texturais de areia e areia franca, a textura média como aquela que apresenta menos de 35% de argila e mais de 15% de areia na sua composição granulométrica, textura siltosa que contém mais de 50% de silte, menos de 15% de areia e menos de 35% de argila, textura argilosa que compreende as classes texturais tendo na composição granulométrica de 35% a 60% de argila.

Os solos predominantes na bacia da Lagoa da Conceição são: o solo arenoso de dunas - DN, neossolo quartzarênico – AQ (areias quartzosas álicas), os gleissolos háplicos - HGPa (glei pouco humico), os organossolos – HO (solos orgânicos) e os argissolos – PVa18 (podzólico) (EMBRAPA, 2004, LUIZ, 2004).

5.3 CARACTERÍSTICAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA

Barbosa (2003) apontou aproximadamente 35 córregos e dois canais de drenagem afluentes no corpo lagunar, sendo o principal aporte de água doce, o Rio João Gualberto Soares, estudado por Dutra (1991), que constatou pertencer a uma bacia de drenagem de 4 km², contribuinte na Lagoa de Cima. Existem, na borda Oeste, córregos que nascem no Embasamento Cristalino adjacente, como o Rio Cachoeiras, porém estes com pequena vazão. Na parte Sul, segundo Odebrecht e Caruso Jr. (1999), ocorre aporte de água doce através de infiltração pelo subsolo. O aporte de água do mar se dá através do canal da Barra.

A curva hipsométrica da área terrestre ilustrada na Figura 6 mostra que 40% de sua área está concentrada na faixa entre 0 e 10 metros de altitude. A declividade da bacia é baixa ($I = 0,037$), representada em parte pelas áreas de baixa altitude da porção leste da bacia e de sua porção nordeste que engloba os distritos administrativos do São João do Rio Vermelho e Barra da Lagoa além da porção do espelho d'água do estuário considerada plana no estudo realizado por Bauer Neto (2007). Nas encostas dos morros, localizadas em suas porções regionais sul e oeste da bacia hidrográfica encontramos maior declividades e suas cotas máximas. Estas porções representam as maiores cotas topográficas na carta hipsométrica ilustrada na Figura 7.

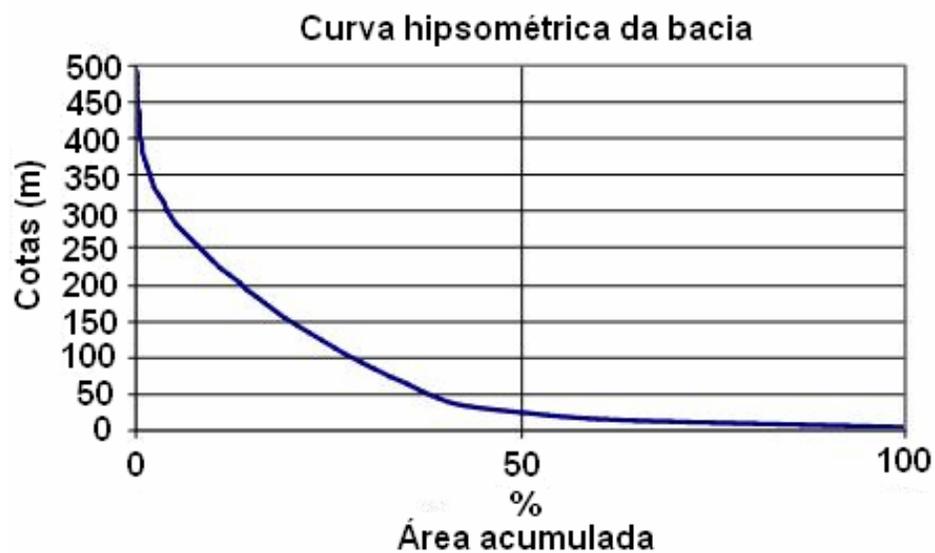


Figura 6: Curva hipsométrica da Bacia da Lagoa da Conceição. Fonte: Bauer Neto, 2007.

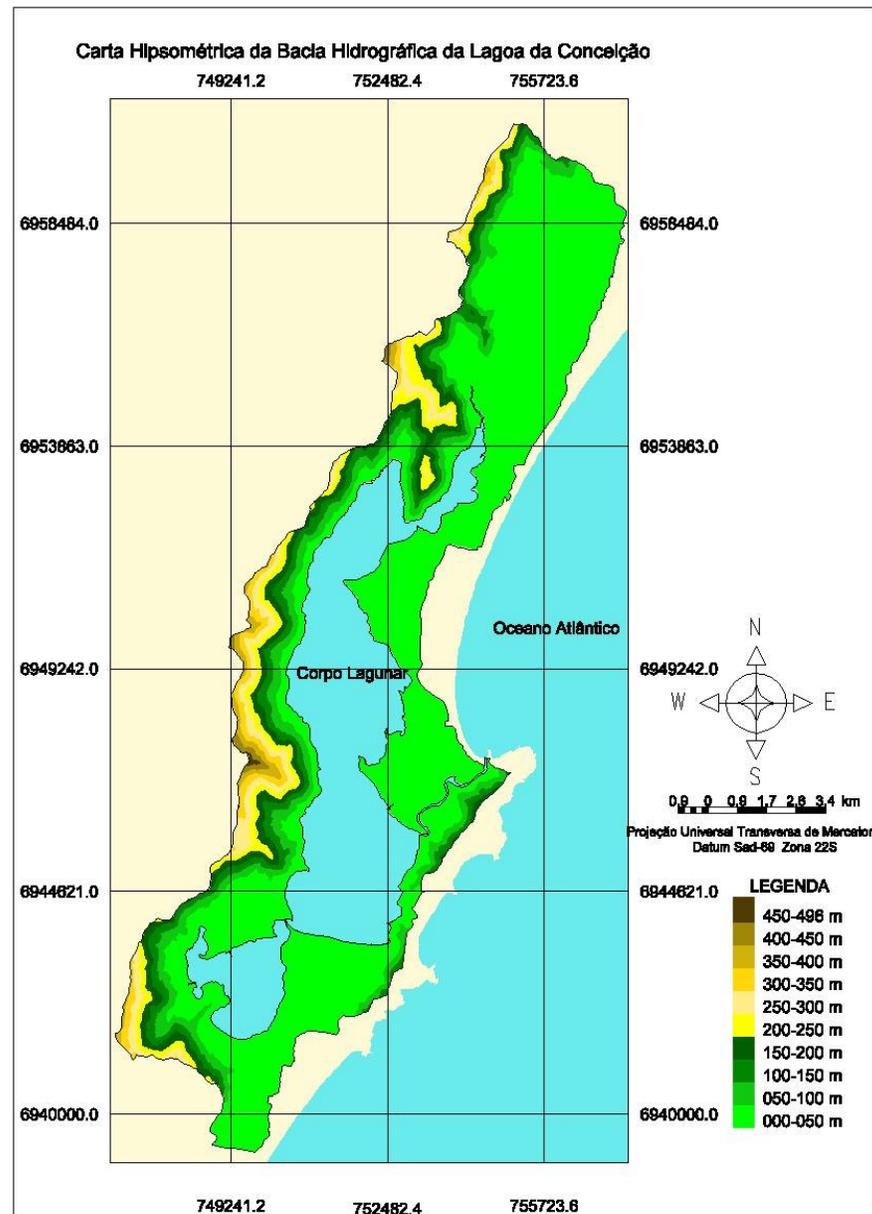


Figura 7: Hipsometria da bacia da Lagoa da Conceição.

Fonte: Bauer Neto, 2007

A bacia possui forma geométrica com aspecto não compacto indicando baixa propensão a enchentes como indicado pelo Coeficiente de compactidade (K_c) de valor igual a 1,91. Este coeficiente segundo Villela e Matos (1975) representa a razão entre o perímetro da bacia e o perímetro de uma circunferência de círculo de mesma área e quanto mais próximo de 1,00 estiver o K_c , menor será o tempo de concentração e conseqüentemente maior tendência a enchentes terá esta bacia. A Bacia da Lagoa possui um coeficiente de forma (K_f) de valor 0,44, o que confirma o aspecto de uma bacia estreita, com sua maior extensão no sentido norte e sul. Um coeficiente de

forma próximo a zero representa uma bacia muito alongada onde o maior curso d'água é muitas vezes maior que a área da bacia (BAUER NETO, 2007).

A área total de drenagem de 78,14 km² possui uma área terrestre de 57,33 km², sendo que as sub-bacias localizadas na porção norte à montante da bacia hidrográfica e situadas no distrito de São João do Rio Vermelho respondem por 31,4 % da área drenada, tendo grande importância como área de captação das águas de chuva. Do total de 61 sub-bacias analisadas por Bauer Neto (2007), 47 delas tinham área menor que 1 km² e estas juntas respondem por 30,3% da área drenada, sendo significativas para a descarga fluvial no estuário quando observadas em conjunto.

Na maioria das sub-bacias o tempo de concentração (t_c) é relativamente curto em relação ao maior t_c encontrado (Figura 8), isso se deve ao fato de que a maioria das bacias possuírem forma achatada e grande declividade, o que proporciona alta velocidade de escoamento.

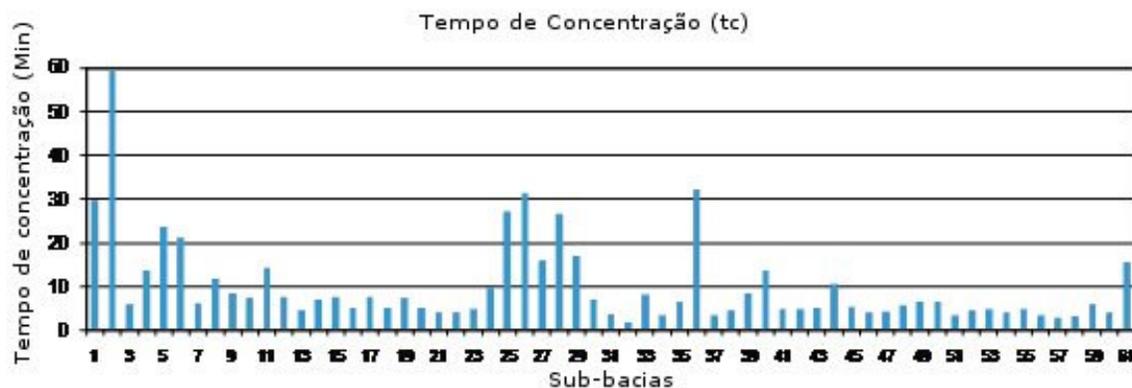


Figura 8: Tempo de concentração das sub-bacias. Fonte: Bauer Neto, 2007.

5.4 DADOS AMBIENTAIS

Monitoramento de Dados Hidrológicos

Os parâmetros meteorológicos (temperatura, pressão, precipitação, radiação, evapotranspiração, intensidade e direção do vento) foram monitorados, a cada 30 minutos, e por toda a duração do estudo, por uma estação automática Davis, modelo Vantage 2, localizada junto às dependências da UFSC na Barra da Lagoa (Figura 9). O período total de medições teve início em julho de

2005, armazenados em intervalo de amostragem de meia hora. Estes dados são recuperados mensalmente do módulo de armazenamento de dados e analisados nas instalações do LaHiMar. Para este estudo foram utilizados apenas os dados de precipitação que foram exportados em formato ASCII e trabalhados no Matlab. Para este trabalho foram utilizados os dados de precipitação no período de 16 de janeiro a 14 de fevereiro de 2008, período coincidente com os dados maregráficos.

Aquisição de dados maregráficos

Os dados maregráficos foram extraídos de medição realizada pelo LaHiMar no período de 16 de janeiro a 14 de fevereiro de 2008 em estação maregráfica localizada nas coordenadas 48° 29' 0,31" O e 27° 26' 22,12" S (Jurerê), conforme ilustra a Figura 9. Foi utilizado um sensor de pressão marca Skye modelo PDCR 1830. Os dados foram coletados pelo Doutorando Henrique Frasson, responsável também pela instalação do equipamento (Figura 10). O sensor era conectado a um sistema de comunicação GSM e os dados eram enviados ao computador do LaHiMar

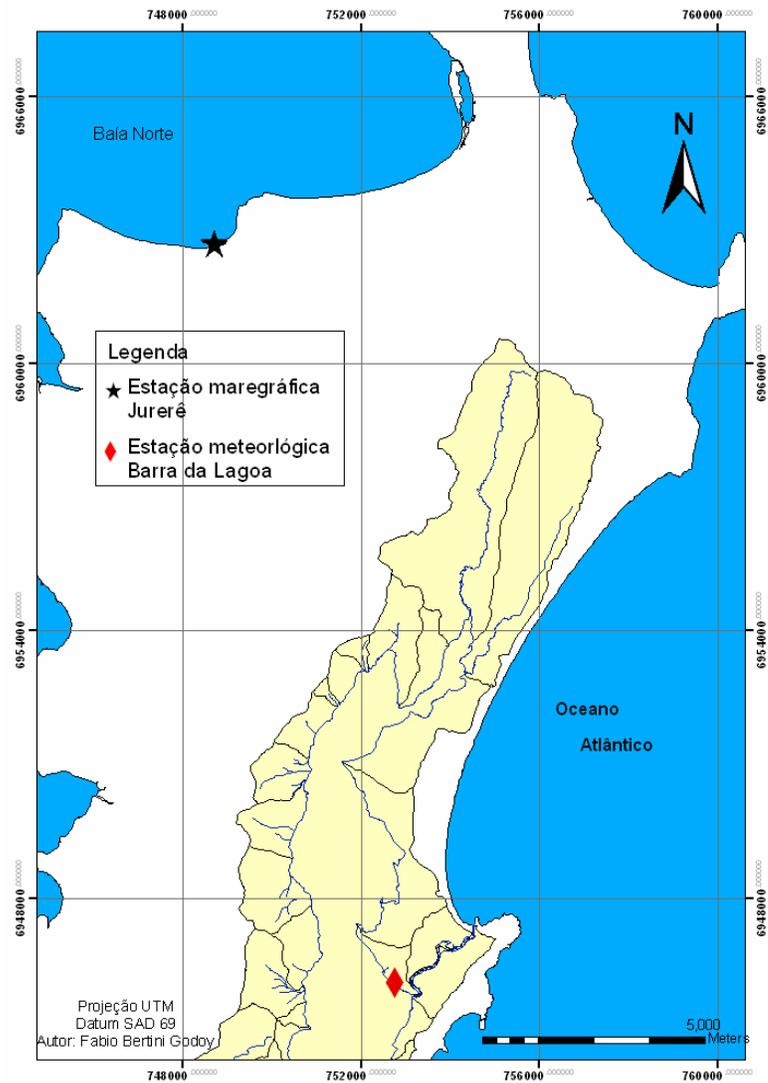


Figura 9: Localização da estação maregráfica de Jurerê e da Estação meteorológica da Barra da Lagoa.

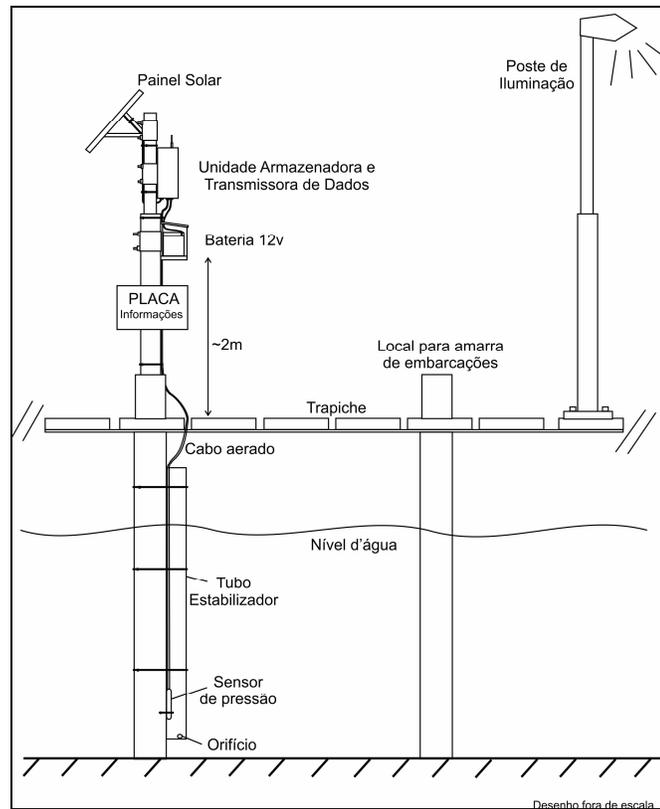


Figura 10: Esquema de instalação do Marégrafo em Jurerê elaborado por Henrique Frasson (LaHiMar, 2007)

5.5 GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS (BDG)

A construção de um banco de dados geográficos possibilitou a integração dos estudos estuarinos na Lagoa da Conceição constituído pela análise geomorfológica dos meios terrestres e aquáticos; aspectos pedológicos; de uso/cobertura; base cartográfica com hidrografia corrigida em escala 1:10.000 com curvas de nível equidistantes de 10m, arruamentos (IPUF, 1979) e limites das sub-bacias; fotografias aéreas (IPUF, 2004), imagens de satélite CBERS-2B (INPE, 2008), a batimetria (AEROCONSULT, 2001, LAHIMAR, 2006 e DHN, 1972) e o complexo hidrológico resultado da combinação do solo com o uso e cobertura.

Correção do contorno do canal

Foram inseridas no banco de dados geográfico as imagens CBERS-2B e sobre elas foi vetorizado o contorno do canal com o auxílio da batimetria realizada pelo LaHiMar. As imagens foram primeiramente registradas para ajustarem-se à base cartográfica. Após a vetorização o novo contorno foi inserido à hidrografia existente de maneira a integrar o novo contorno geral da laguna e do canal.

Os limites do canal da Barra da Lagoa foram corrigidos por meio da batimetria levantada pelo LaHiMar em campanha de fevereiro de 2006 associada ao uso de imagens satélite CBERS 2B e das fotografias aéreas de 2004. A Figura 11 ilustra os limites antigos e novos do canal da Barra da Lagoa.

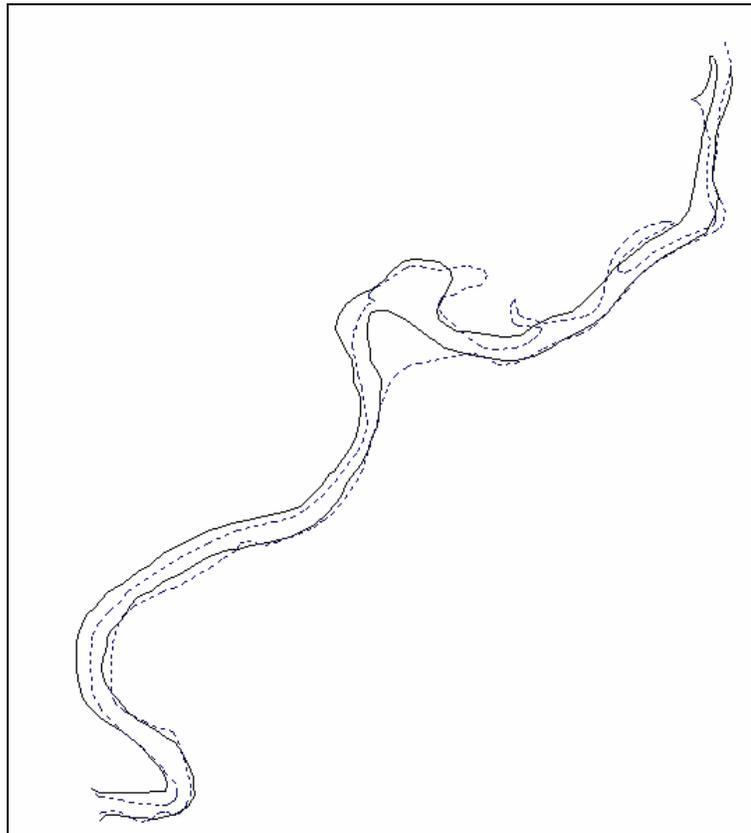


Figura 11: Correção dos limites do canal. Em pontilhado o limite antigo e em linha cheia o limite corrigido.

O novo limite da microbacia realizado no Trabalho de Conclusão de Curso de Bauer Neto (2007) foi importado para o banco de dados geográfico, junto com as delimitações das microbacias. Após a importação dos dados foi realizada uma simplificação na distribuição espacial das microbacias ficando as 61 microbacias iniciais agrupadas em 31 unidades.

A Figura 12 ilustra estes limites com destaque para a microbacia do rio João Gualberto utilizada na determinação da influência relativa das forçantes hidrológicas sobre o nível médio da laguna.

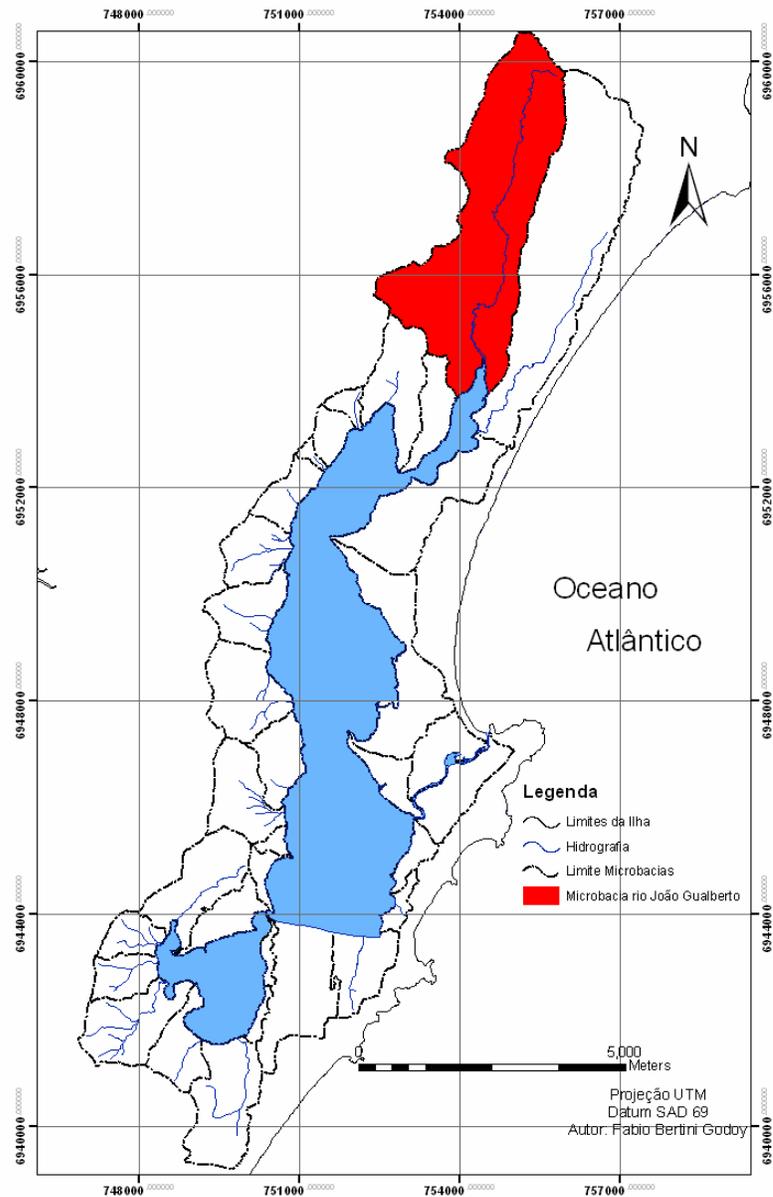


Figura 12: Limites das microbacias com destaque para a microbacia do rio João Gualberto.

Digitalização e vetorização dos tipos de solo

O mapa de solo, em escala 1:100.000 (LUIZ, 2004), foi digitalizado através de escaner, vetorizado e classificado com o auxílio do SPRING. Incorporado ao BDG este arquivo foi exportado em formato *shapefile* para ser utilizado pelo ArcGis. O arquivo tipo polígono contendo as informações geográficas do solo foi transformado em formato matricial possibilitando assim a combinação de informações.

A Figura 13 ilustra o mapa de solos digitalizado e georreferenciado utilizado na composição do complexo hidrológico.

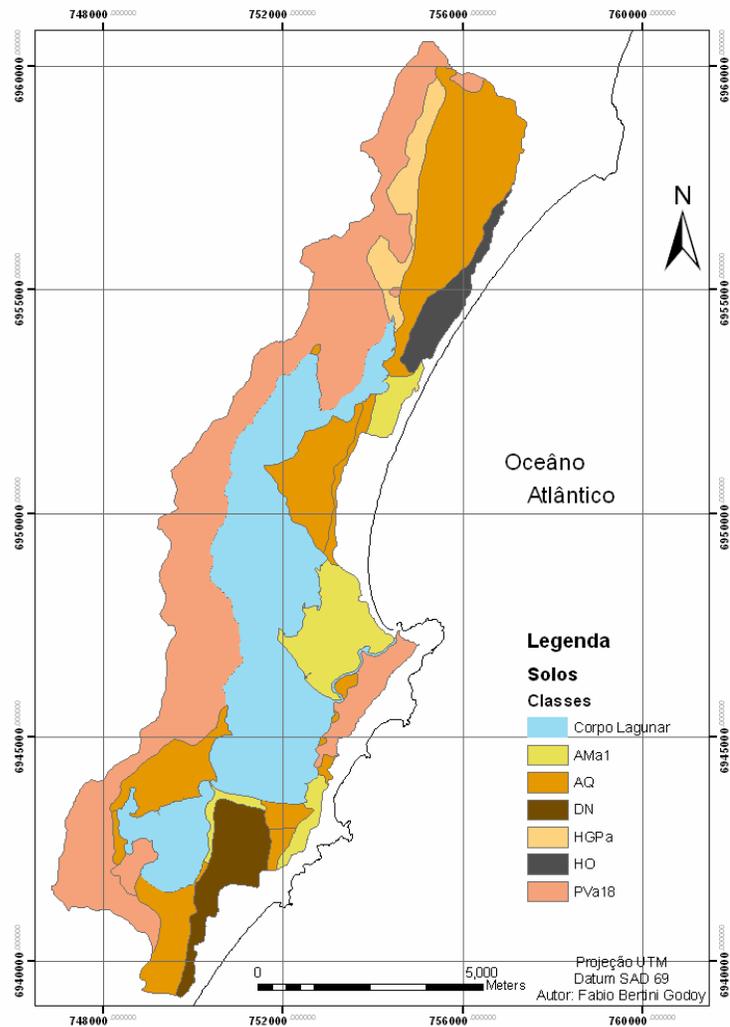


Figura 13: Mapa de solos (1:100.000).

Fonte: Elaboração do autor a partir de Luiz (2004).

Correção do uso e cobertura do solo de acordo com os novos limites

Em ambiente SPRING o mapa de uso e cobertura do solo realizado por Godoy (2007) foi recortado pelos novos limites da bacia (BAUER NETO, 2007). Os novos polígonos foram reclassificados resultando em um novo mapa de uso e cobertura do solo da Lagoa da Conceição.

Criação do complexo hidrológico solo-uso/cobertura

Os dados referentes ao tipo do solo e cobertura e uso foram exportados do SPRING em formato *shapefile* para serem trabalhados com o *software* ArcGIS. Os dados do tipo polígono foram transformados em formato matricial de tamanho de célula 1 m². A partir da combinação dos dois arquivos foi gerado um novo arquivo contendo o complexo hidrológico solo-uso/cobertura. Esta combinação foi combinada com o mapa das microbacias discretizando a distribuição espacial do complexo hidrológico de acordo com a microbacia pertencente. A tabela de atributos resultante da combinação foi exportada. Sobre a microbacia do rio João Gualberto, foram agrupados os padrões solo-uso/cobertura e calculadas suas áreas relativas, a cada complexo foi atribuído um valor de *CN* para a condição AMC-II. Para as áreas cuja cobertura foi classificada como Sem Classe (GODOY, 2007), foi adotado um valor médio de *CN* para o tipo de solo existente. Os valores de *CN* foram ponderados pela porcentagem da área correspondente e somados para estabelecer o valor de *CN* referente à bacia do rio João Gualberto, segundo a Equação (27).

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum_1^n A_{cn} \times CN}{n} \quad (27),$$

onde a A_{cn} é a área ocupada por cada combinação solo-uso/cobertura.

Batimetria

Para a estruturação da base batimétrica foram utilizados os dados levantados pela AEROCONSULT (2001), com pontos distribuídos por todo o corpo lagunar, mas sem muito detalhamento no canal da Barra da Lagoa. A esta malha de pontos foram acrescentados os dados batimétricos levantados pelo LaHiMar em 2006 em campanha pelo canal da barra e pelo canal

intralagunar. Para inserir as cotas batimétricas da região de mar aberto, que formaram a fronteira aberta do sistema, foi digitalizada a carta náutica CN 1902 (DHN, 1972). A carta náutica foi originalmente digitalizada em projeção Córrego Alegre, sendo posteriormente os pontos batimétricos transformados em SAD 69 para compor todo o conjunto de informações batimétricas, que, posteriormente, foi exportada em formato ASCII para ser inserido no MOHID GIS.

Geração da Grade Batimétrica

Após serem realizadas as correções nos limites referentes à área de estudo em ambiente SPRING, os dados foram exportados em formato ASCII, e transformados em formato de leitura do Mohid GIS “.xy” para os contornos tipo polígono. As cotas batimétricas foram transformadas para valores positivos e salvas em extensão “.xyz”. Foi elaborada uma malha base de tamanho de célula variável entre 10 e 50 metros com a utilização do executável *gridgenerator* (MARETEC, 2007b). Esta malha foi composta de maneira a obter um detalhamento na canal (células 10mx10m) e uma economia de cálculo com células 50mx50m no meio da laguna.

A grade batimétrica constitui a fronteira de fundo que formam os elementos da malha de cálculo. A base de dados batimétricos única, reunindo as batimetrias da Lagoa, do canal da Barra e intralagunar e da carta náutica foi interpolada no MOHID-GIS. Para isto foi utilizado o contorno da lagoa (seus limites territoriais) e a malha de dimensão de células variando entre 50m e 10m. A grade resultante desta operação foi utilizada na modelagem no módulo Mohid Water e está ilustrada na Figura 14.

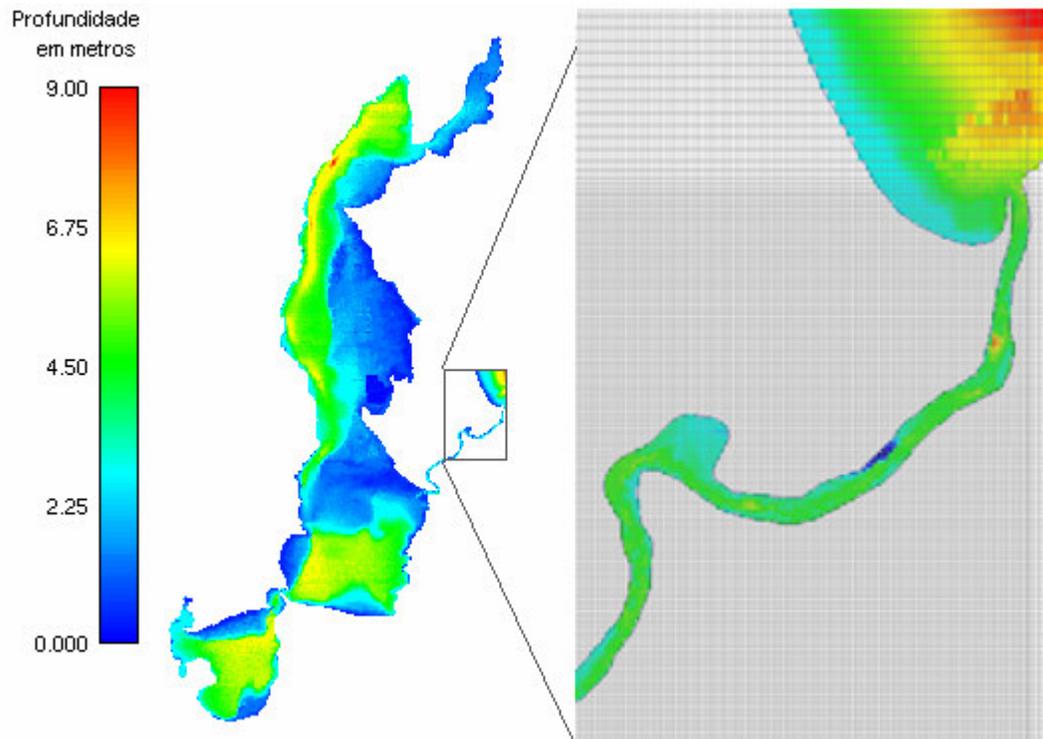


Figura 14: Grade batimétrica utilizada na modelação.

5.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CURVA NÚMERO

O procedimento de geração de uma série temporal de vazões sintéticas foi realizado para a microbacia do Rio João Gualberto de área $10,51 \text{ km}^2$ o que corresponde a $18,32\%$ da área total de drenagem da bacia. Este trabalho utilizou o modelo CN como ferramenta para geração de uma vazão sintética a partir de dados ambientais generalistas e monitoramento das precipitações. Não faz parte do escopo deste estudo a avaliação detalhada da aplicação do modelo CN sobre a área de estudo, mas sim o comportamento hidrodinâmico da laguna sob diferentes cenários de descarga do rio João Gualberto.

A série temporal com as vazões sintéticas foi gerada a partir dos dados de chuva e do mapa do complexo hidrológico na aplicação do modelo CN. O mapa do complexo hidrológico gerado em

formato matricial gerou informações espaciais da distribuição da combinação solo-uso/cobertura associado a um valor *CN* representados na Tabela 4. O valor de *CN* médio definido no item 4.3 foi utilizado na Equação (2b) para cálculo da capacidade de retenção do solo (*S*) na área de estudo utilizado para cálculo das perdas iniciais (I_a) pela equação (3).

Tabela 4: Complexo Hidrológico da Microbacia do rio João Gualberto com respectivo *CN* e área relativa.

Complexo hidrológico	CN	Área Relativa (%)	CN ponderado
PVa18/Veg. Arbórea	70	48,93	34,25
PVa18/Sem Classe	81	1,01	0,82
PVa18/Veg. Rasteira	74	6,30	4,66
PVa18/Urbano	94	0,51	0,48
PVa18/Vias	92	0,12	0,11
AQ/Urbano	89	18,43	16,40
AQ/Vias	83	0,21	0,17
AQ/Veg. Arbórea	30	0,55	0,16
AQ/Veg. Rasteira	39	1,35	0,53
AQ/Sem Classe	55	0,01	0,004
HGPa/Veg. Rasteira	65	13,02	8,46
HGPa/Urbano	92	5,22	4,81
HGPa/Veg. Arbórea	55	3,93	2,16
HGPa/Vias	89	0,41	0,37
CN adotado			73,4

O cálculo da precipitação efetiva, obtida pelo sistema de Equações (1) para o intervalo de tempo de 30 minutos, gerou os blocos de precipitação utilizados no cálculo da vazão através do hidrograma unitário sintético, conforme metodologia proposta por NRCS (2007b) e Canholi (2005). Todas as equações foram expressas em MatLab para automatizar os cálculos dos hidrogramas. O tempo de concentração da microbacia adotado foi de 29,7 minutos conforme estudo de Bauer Neto (2007). A Tabela 5 ilustra o processo de cálculo do hidrograma unitário sintético conforme descrito no item 4.3 pela aplicação das Equações (5), (6) e (7).

Tabela 5: Variáveis utilizadas para cálculo da vazão de descarga
 Variáveis utilizadas para cálculo da vazão de descarga

Tempo de concentração (h)	0,495
Duração da chuva excedente (h)	0,500
Tempo de ocorrência do pico (h)	0,547
Área de drenagem (km ²)	10,523
Vazão de pico por centímetro de chuva excedente (m ³ /s.cm)	40,014
Vazão (m ³ /s) = chuva excedente (cm)*vazão de pico por centímetro de chuva excedente (m ³ /s.cm)	$Q_r = Q * q_p$

5.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A análise da influência da componente hidrológica no comportamento hidrodinâmico foi realizada por meio de modelação hidrodinâmica da laguna com o sistema MOHID e ficou constituída em três etapas:

1- *Simulação do comportamento hidrodinâmico com a forçante do nível de maré medido em Jurerê. O cenário de simulação é o de troca de massa e energia somente por meio do canal laguna-oceano e ficou denominado como Vazão Nula.*

2- *Simulação do comportamento hidrodinâmico com a forçante de nível em Jurerê e com vazão no Rio João Gualberto constante e igual a 1m³/s (Vazão Constante).*

3- *Simulação do comportamento hidrodinâmico com a forçante de nível em Jurerê e com vazão no Rio João Gualberto variável no tempo e com média no período igual a 1m³/s. Esta vazão variável foi calculada a partir da aplicação do modelo CN como descrito nos itens 4.3 e 5.6. Para que a média da vazão no período fosse igual a 1m³/s, de maneira a padronizar as comparações, foi inserido um valor de 0,2062 m³/s à vazão sanitária do rio, ou seja, nos instantes em que cessou a vazão decorrente da ausência de chuva, foi substituído o valor zero pelo valor 0,2062 m³/s. Desta forma garantiu-se que as duas simulações tivessem mesma vazão média e que a descarga fosse permanente por todo o período simulado. Esta simulação foi denominada Vazão Variável.*

O sistema de modelação foi estruturado de maneira a padronizar as três etapas da análise, em todos os cenários foram obedecidas às mesmas condições de fronteira.

Condições de fronteira

Neste estudo foram utilizadas fronteiras abertas laterais, fronteiras fechadas laterais, a superfície livre e a fronteira de fundo. Na fronteira de superfície livre o fluxo de água através da superfície foi considerado nulo. As fronteiras laterais constituem os limites territoriais da modelação. Na fronteira aberta foi imposta a condição de nível medido pelo LaHiMar no período de 16 de janeiro a 15 de fevereiro de 2008 em estação maregráfica localizada nas coordenadas 48° 29' 0,31" O e 27° 26' 22,12" S (Jurerê). A fronteira aberta foi localizada a 1000 m da entrada do canal onde foi utilizada a condição de relaxamento seguindo método de Blumberg e Kantha (1985). Na fronteira de fundo o fluxo de água foi considerado nulo e a rugosidade de fundo variada. A fronteira fechada da modelação obedeceu aos limites geográficos da Lagoa da Conceição. Para manter a estabilidade numérica do modelo adotou-se um intervalo de tempo de cálculo de 1,25 segundos. Para cada simulação de cenário de 30 dias foram necessários 10 dias de processamento, condição exigida pelas pequenas dimensões das células no canal comparando-se com toda a área da laguna.

Geração dos campos de rugosidade

Na fronteira de fundo o fluxo de água foi considerado nulo, sendo o atrito de fundo $\bar{\tau}$ representado como uma função quadrática que depende da velocidade próxima ao fundo.

$$\bar{\tau} = C_D |\vec{V}| \vec{V} \quad (28),$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade horizontal e C_D representa o coeficiente de atrito, que pode ser expresso em função da rugosidade de fundo Z_0^b .

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\log \left(\frac{z + Z_0^b}{Z_0^b} \right)} \right)^2 \quad (29),$$

com κ a constante de von Karman. O modelo desta forma possibilita o cálculo do atrito de fundo a partir de valores de rugosidade absoluta.

Baseado na caracterização textural dos sedimentos de fundo da laguna realizada por Gré e Horn Filho (1999), e em dados de Abbot e Basco (1989)¹³ apud Andrade (2001) foram adotados os seguintes valores para a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente para a região de estudo: areia: $\epsilon = 0,03$ m; areia siltosa: $\epsilon = 0,025$ m; silte arenoso: $\epsilon = 0,02$ m; silte: $\epsilon = 0,015$ m; silte argiloso: $\epsilon = 0,01$ m, para o canal da Barra da Lagoa foi adotado o valor de amplitude da rugosidade equivalente de 0,04 m. A partir da imagem escaneada da caracterização textural realizada por Gré e Horn, foi possível a vetorização deste mapa e conseqüente atribuição de valores de rugosidade aos polígonos gerados, estes polígonos foram exportados individualmente e formaram a base de informação para a geração do arquivo de leitura para a modelagem hidrodinâmica, a Figura 15 ilustra o mapa de de rugosidade absoluta no cálculo hidrodinâmico. As diferenças relativas entre os efeitos da distribuição da rugosidade do fundo foi tema de alguns trabalhos no LaHiMar (GODOY *et al.*, 2008a; KOEFENDER, 2005; LINO, 2005).

¹³ ABBOT, M. B., BASCO, D. R., *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*. Logan Group, UK Limited. 1989.

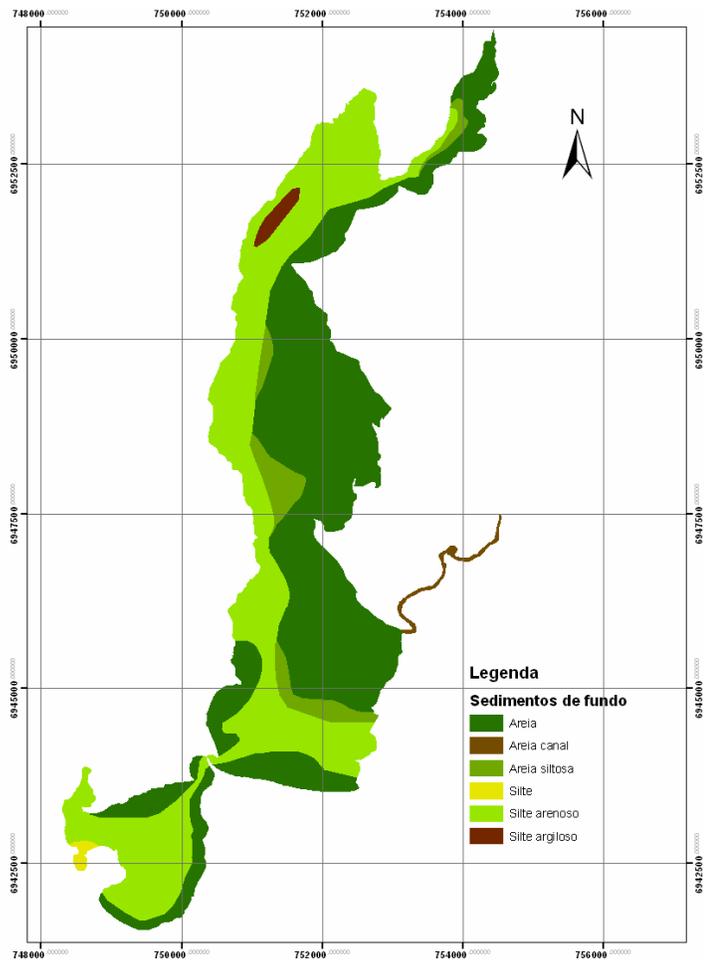


Figura 15 - Distribuição espacial dos sedimentos na Lagoa da Conceição.
 Fonte: Elaboração do autor a partir de Gré e Horn Filho (1999).

Simulações

Para todas as simulações foi estudada a atenuação das oscilações de maré no canal da Barra da Lagoa, considerando-se os níveis em dez pontos, sendo a desembocadura no oceano (O), as seções internas numeradas de 1 a 8, a desembocadura lagunar (L). Também foram analisados três pontos no interior da laguna sendo na Lagoa do Norte (N), na Lagoa do Meio (M) e na Lagoa do Sul (S), como indicado na Figura 16. Houve um período de aquecimento do modelo de 15 dias com dados de maré astronômica forçado com os principais constituintes retirados da análise harmônica do nível medido em Jurerê ($48^{\circ} 29' 0,3''$ O e $27^{\circ} 26' 22,12''$ S), conforme Tabela 6.

Tabela 6: Constituintes utilizados no aquecimento do modelo.

Constituinte	Amplitude (metros)	Fase (Graus)
O1	0,106	75,0
K1	0,010	130,0
Q1	0,049	65,9
M2	0,196	71,0
K2	0,039	62,0
N2	0,059	150,0
S2	0,142	63,0
M3	0,025	148,0
MK3	0,014	51,0
M4	0,025	108,0
MS4	0,016	188,0

Para todas as simulações, as análises foram realizadas com valores resultantes da subtração do valor médio (μ) e da tendência da série dos valores originalmente modelados. O algoritmo do MatLab que executa a retirada da tendência o faz computando um ajuste de mínimos quadrados de uma reta (ou pedaços de reta) aos dados e subtrai a função resultante dos dados (MATHWORKS, 2000).

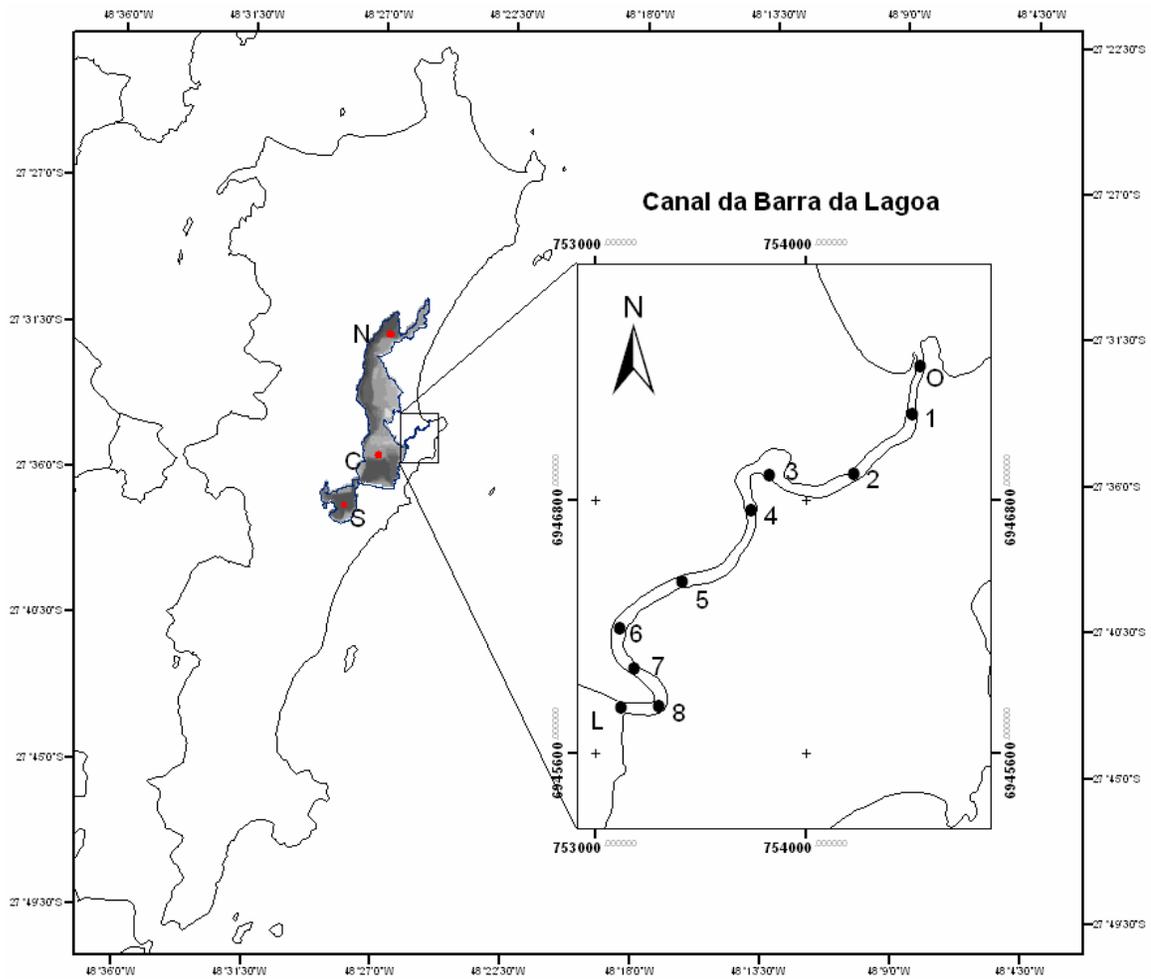


Figura 16 - Pontos analisados para a influência hidrológica no comportamento hidrodinâmico.

Os dados do canal foram analisados tendo como referencial o comportamento hidrodinâmico na entrada Oceânica do canal. A Tabela 7 mostra as distâncias em metros dos demais pontos ao referencial, e sua distância relativa DR , dada pela Equação (30):

$$DR = \frac{\text{distância ao ponto O}}{\text{comprimento do canal}} \quad (30)$$

Tabela 7: Distâncias adotadas ao longo do canal.

Ponto	O	1	2	3	4	5	6	7	8	L
Distância do ponto O (m)	0	240	640	1070	1370	1890	2270	2490	2740	2920
Distância relativa (DR)	0,00	0,08	0,22	0,37	0,47	0,65	0,78	0,85	0,94	1,00

Em cada ponto, os constituintes astronômicos foram estimados a partir de séries de valores registrados a cada 1 hora com a utilização de pacote específico T_Tide (PAWLOWICZ, *et al*, 2002). A componente meteorológica foi obtida subtraindo do nível total a previsão astronômica. Análise cruzada foi realizada entre os níveis no ponto de interesse e os níveis na entrada do canal (O):

- a) para a componente astronômica pela comparação direta de amplitude e fase dos constituintes harmônicos reconhecidos;
- b) para a componente meteorológica por meio de análise espectral cruzada utilizando-se o método de Welch de sobreposição e soma. O método de Welch é uma rotina MatLab que executa o periodograma com a sobreposição da janela de Hanning que pondera os valores da série com maior peso no seu interior e menor peso nas suas extremidades. Para a série de trinta dias optou-se por uma janela de 7 dias e período de sobreposição de 3,5 dias.

Para a realização da análise cruzada foi necessário encontrar a diferença temporal das séries e alinhá-las pela defasagem. A diferença temporal foi identificada por correlação cruzada entre os Pontos O e L, em seguida foi realizada a filtragem dos dados por média móvel, que consiste na aplicação de uma ponderação dos valores móvel na série resultando em uma suavização de valores. Esta série foi re-amostrada em intervalos de seis horas para melhor identificar processos que ocorrem no período de dias, como os eventos meteorológicos. Com a nova série re-amostrada foi calculado o espectro cruzado de potência, a função ganho que determinou as frequências em que há ganho de energia do espectro de potência do ponto externo em relação ao ponto interno. Também foi calculada a função coerência quadrática que determinou a significância da função ganho no domínio da frequência.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do trabalho foram realizados mais 18 meses de medições meteorológicas através da manutenção da estação meteorológica já operante na Barra da Lagoa. Os dados foram descarregados mensalmente e organizados em um diretório do computador no LaHiMar. Com isto são mais de três anos de medições ininterruptas das condições meteorológicas na Bacia da Lagoa.

O novo limite geográfico da área de influência hidrológica possibilitou a elaboração de uma nova matriz de uso e cobertura representada na Tabela 8 e ilustrada na Figura 17. Este novo limite apresenta uma menor área em relação a estudos anteriores (95% da área estimada por Godoy, 2007, 90% da área estimada por EPAGRI/CIRAM, 2006, 85 % da área de IPUF, 2006 e 86% da área estimada por Hauff, 1996). Os resultados encontrados com a nova delimitação não diferenciam significativamente das porcentagens de distribuição de usos e cobertura dos estudos de Godoy, 2007.

Tabela 8: Áreas discriminadas de uso e cobertura

Classe	Área	
	km ²	%
Veg. Arbórea	32,80	41,98
Água	20,68	26,47
Urbano	11,91	15,24
Veg. Rasteira	7,47	9,56
Veg. Dunas	2,47	3,16
Duna Descoberta	1,06	1,35
Vias	0,68	0,87
Veg. lagunar	0,18	0,22
Sem classif.	0,89	1,14
TOTAL	78,13	100,00

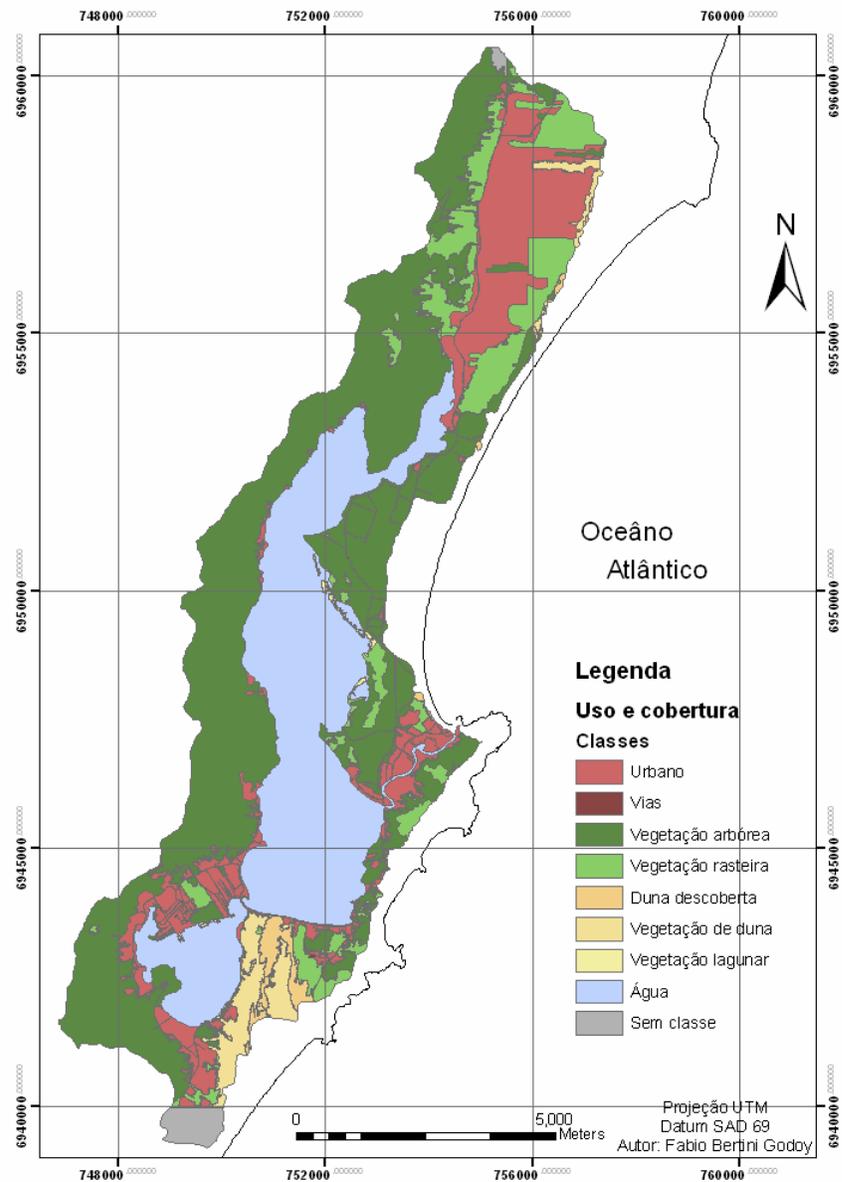


Figura 17: Mapa de uso e cobertura do solo.

A Tabela 9 apresenta as áreas absolutas em km^2 e relativas da distribuição dos diferentes tipos de solo na Lagoa da Conceição. A região de estudo apresenta a maior área formada por areia (quartzólica e marinha – 46,76%) e argissolo (principalmente nas encostas) totalizando mais de 90% de sua área.

Tabela 9: Área dos diferentes tipos de solo da Lagoa da Conceição.

Solo	Área	
	km ²	%
Argissolo (PVa18)	26,26	45,81
Areias Quartzólicas (AQ)	18,06	31,50
Areias Marinhas/Duna (Ama1/DN)	8,75	15,26
Gleissolo Pouco Húmico (HGPa)	2,38	4,15
Organossolo (HO)	1,88	3,28

O mapa dos complexos hidrológicos da Microbacia do rio João Gualberto está ilustrado na Figura 18. As áreas relativas obtidas por somatória dos elementos da matriz e respectivos valores de *CN* estão apresentados na Tabela 4.

Mapa dos complexos hidrológicos

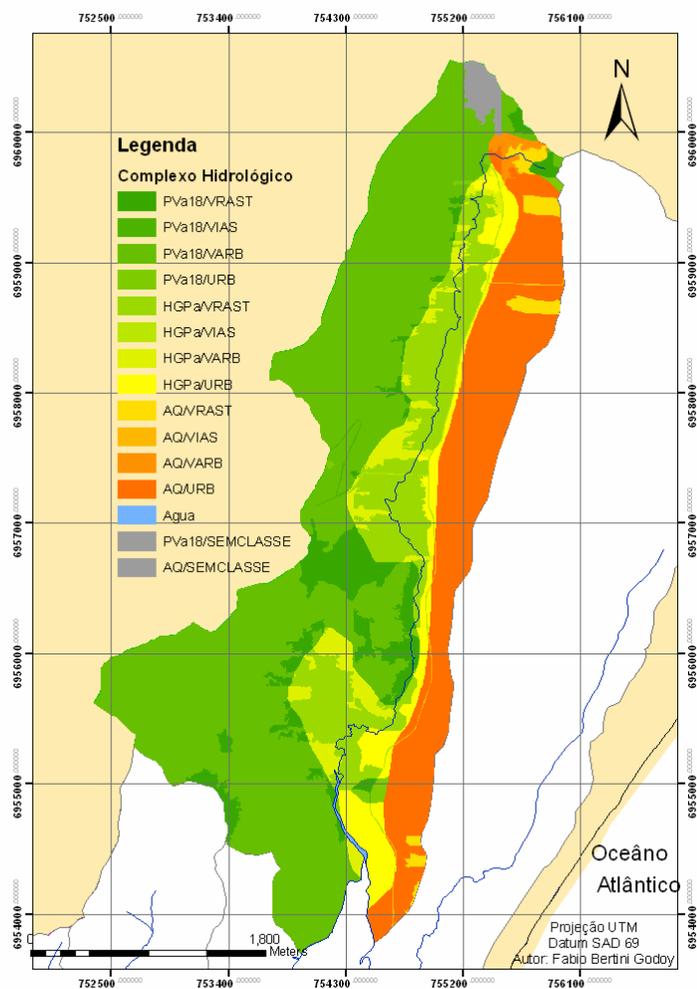


Figura 18: Complexo hidrológico da microbacia do rio João Gualberto.

Os dados diários de precipitação obtidos no período de janeiro e fevereiro de 2008 e as respectivas vazões diárias sintéticas obtidas pelo método do hidrograma unitário sintético do modelo CN estão apresentadas na Figura 19. Deve-se destacar que devido ao fato de a taxa de aquisição dos dados de chuva ser da mesma ordem de grandeza do tempo de concentração os resultados das vazões sintéticas são utilizados apenas para estudo de determinação da influência de forçantes hidrológicas no nível médio da laguna.

O trabalho de Braga *et al.* (2007) apresenta a avaliação do desempenho de pluviômetros de balsa como o utilizado em nossas medições pluviométricas, e prevê desvios de medição em estações meteorológicas similares a usada neste estudo. Como se trata de uma avaliação da influência relativa de cenários optou-se por utilizar os dados coletados sem correções. As vazões sintéticas calculadas seguiram o padrão de precipitação ocorrido no período.

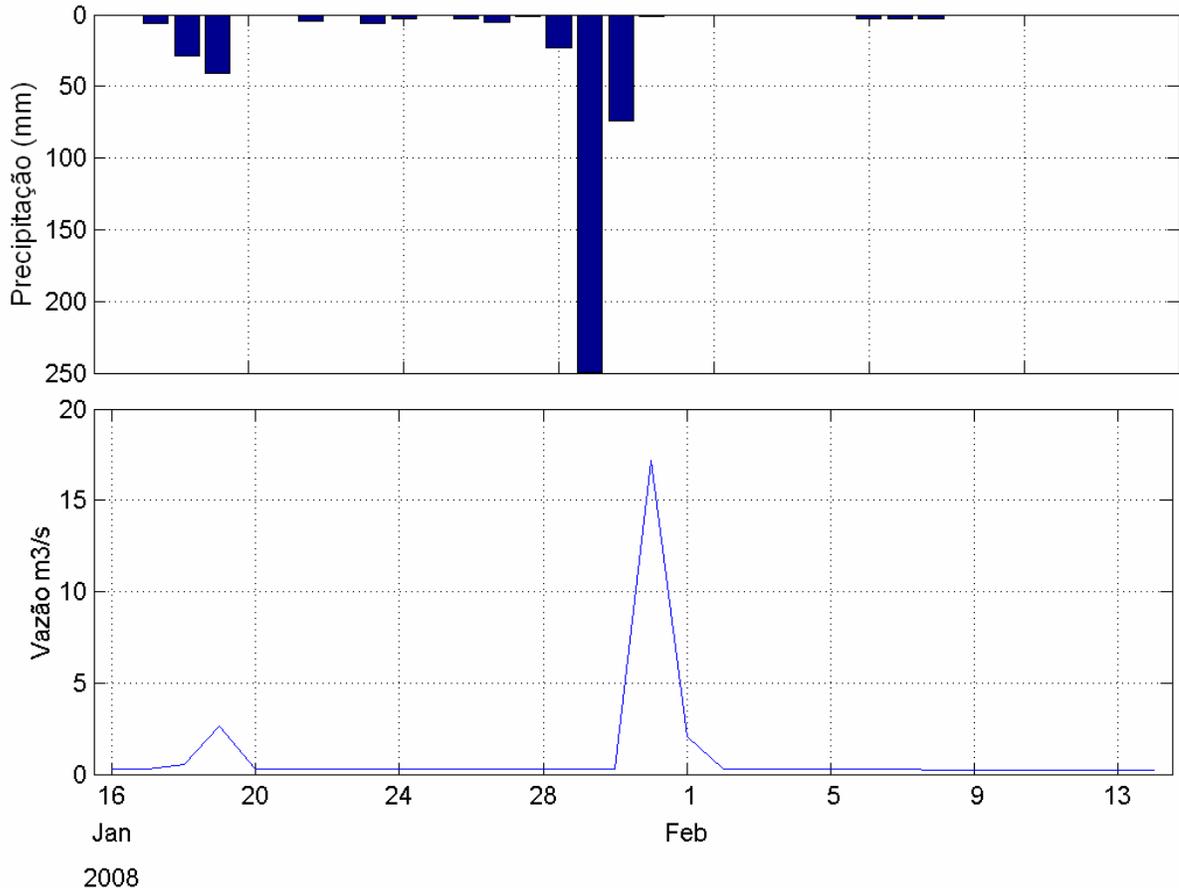


Figura 19: Hietograma e vazão utilizados na simulação do cenário com vazão variável.

A utilização de SIG na modelagem hidrológica mostrou-se eficaz para a sistematização de modelos matemáticos pela facilidade na definição da distribuição espacial dos parâmetros como também comprovado no trabalho de Baungarten *et al.* (2003) ao implementarem em SIG o modelo CN para a bacia do rio Chopim.

RESULTADOS DA ANÁLISE DE DADOS

O nível medido em Jurerê com intervalo de 10 minutos foi comparado com o nível modelado na desembocadura externa (Ponto O) Os dois níveis estão ilustrados na Figura 20, onde se pode observar um acompanhamento do padrão com uma diferença de fase verificada pela correlação cruzada por volta de 60 minutos como apresentado na Figura 21.

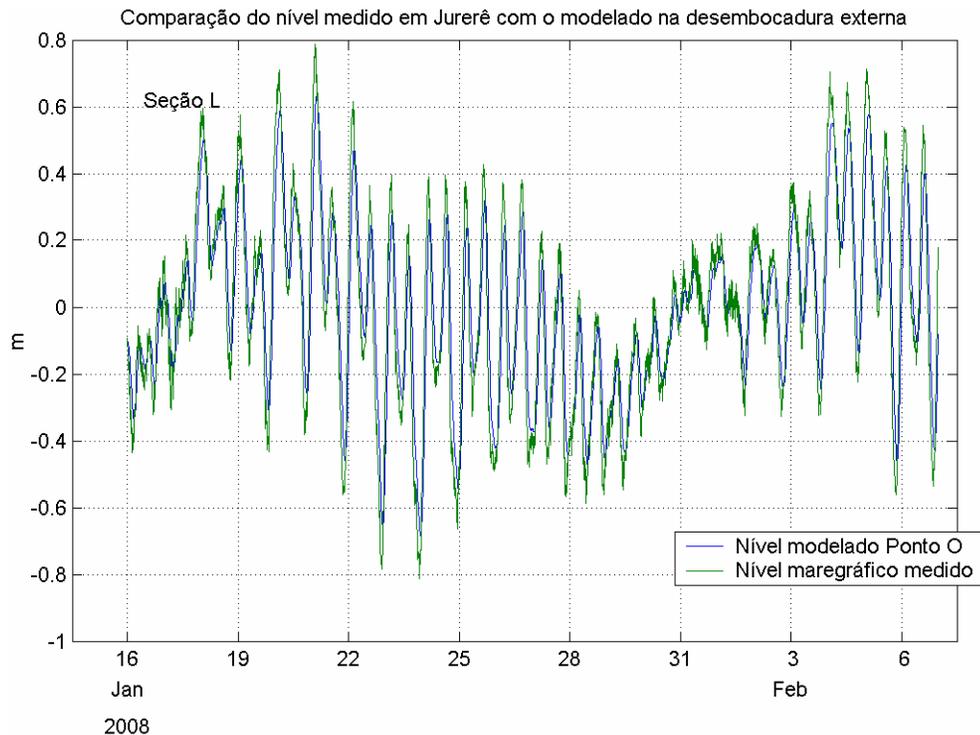


Figura 20: Comparação do nível medido em Jurerê com o modelado no Ponto O.

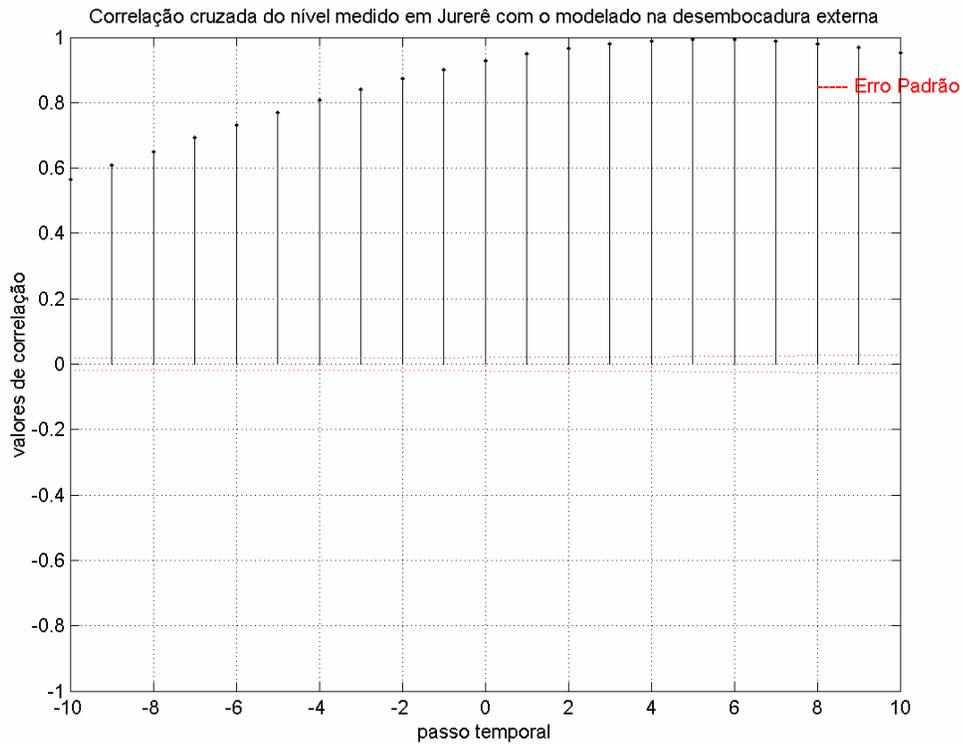


Figura 21: Correlação cruzada entre o Nível medido em Jurerê e no Ponto O.

Foram analisados os níveis totais resultantes dos três cenários nos pontos O (desembocadura externa) e L (desembocadura interna) do canal como representado na Figura 22. Os níveis são coincidentes na desembocadura externa para as três simulações realizadas, demonstrando que esta sofre influência exclusiva do oceano. Na seção interna do canal (Ponto L) os níveis totais para a simulação Vazão Nula e Vazão Constante apresentaram comportamentos quase coincidentes. O nível total resultado da simulação com Vazão Variável tem uma sobrelevação de nível no evento de chuva extremo ocorrido no início de fevereiro resultando em um nível mais elevado que as demais simulações, mantendo-se acima por mais de 7 dias. Para todas as simulações a atenuação do nível total entre a desembocadura externa, Ponto O e a desembocadura interna, Ponto L, foi da ordem de 88 %.

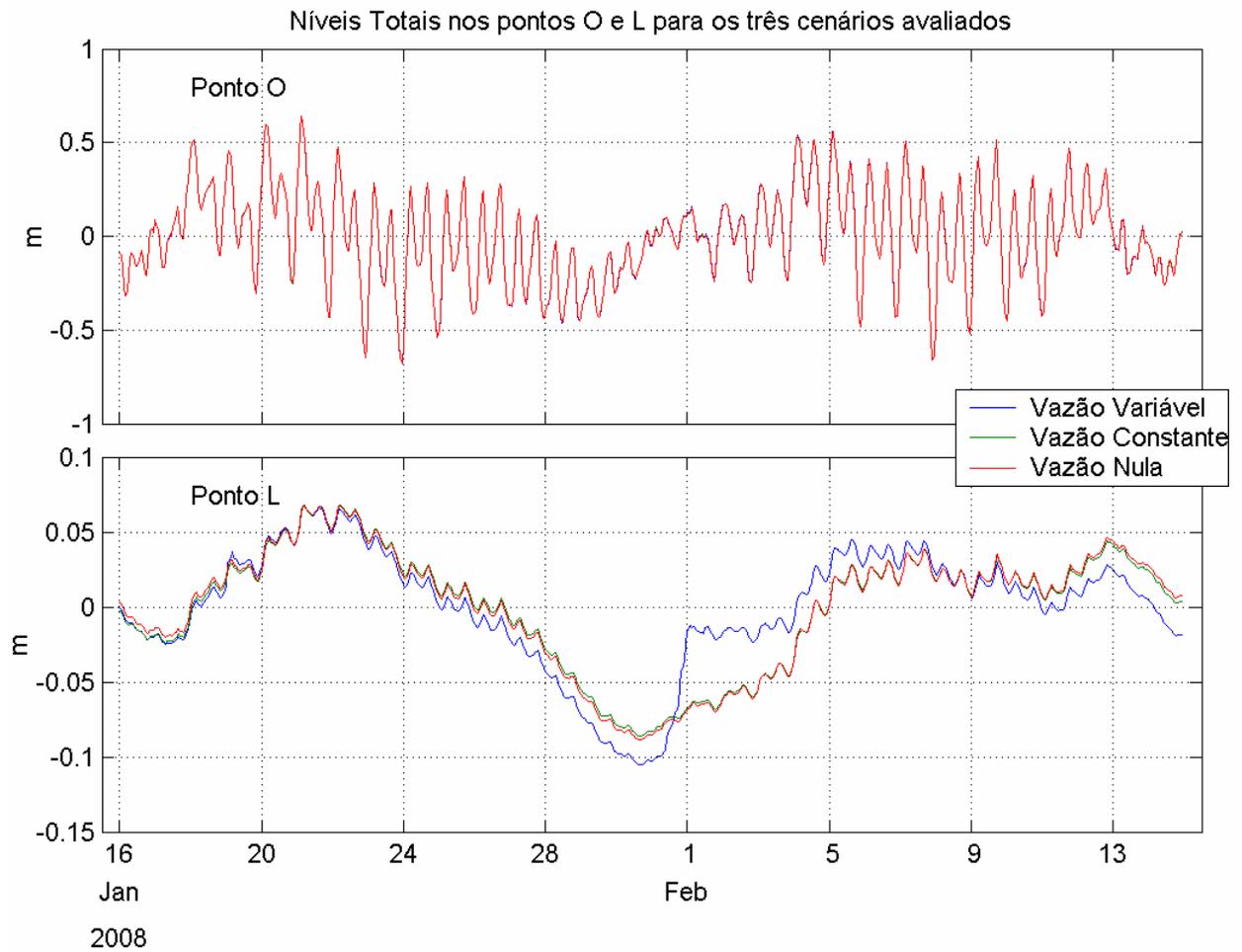


Figura 22: Níveis totais nos três cenários avaliados nos pontos O e L.

A Figura 23 ilustra os níveis totais nas três seções no interior da lagoa. As seções norte e centrais não apresentam alterações significativas, podendo-se observar, porém a filtragem nas oscilações de alta frequência no subsistema sul.

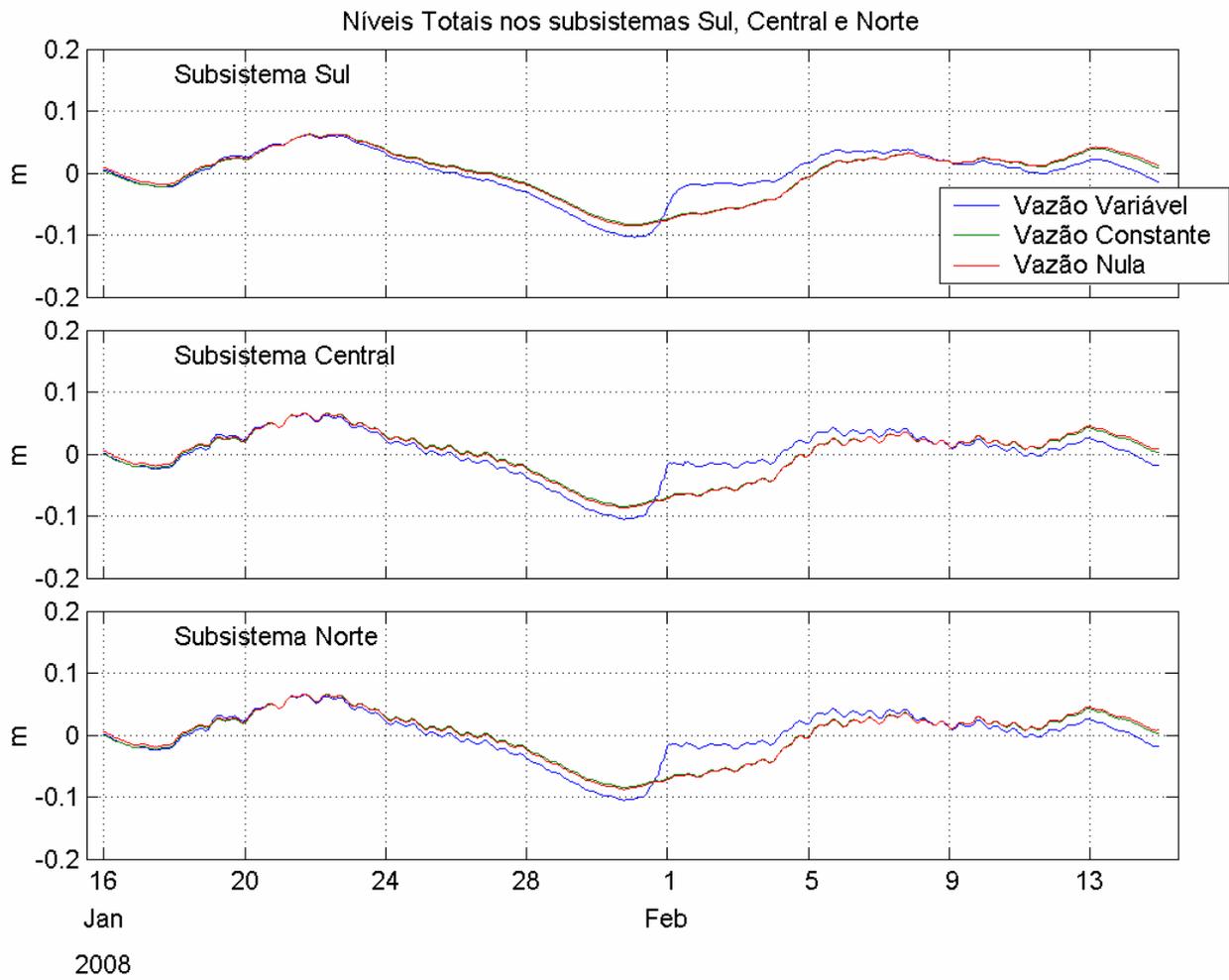


Figura 23: Níveis totais nos três cenários avaliados nas seções Norte, Centro e Sul.

ANÁLISE DOS NÍVEIS ASTRONÔMICOS

Com o auxílio do pacote de análise harmônica T_Tide foi possível identificar o nível da Lagoa apenas sob influência da maré astronômica como ilustra a Figura 24. Este gráfico apresenta as três simulações exatamente iguais no Ponto Oceânico e algumas seções de picos ligeiramente maiores e vales ligeiramente menores no cenário de vazão variável no Ponto interior L.

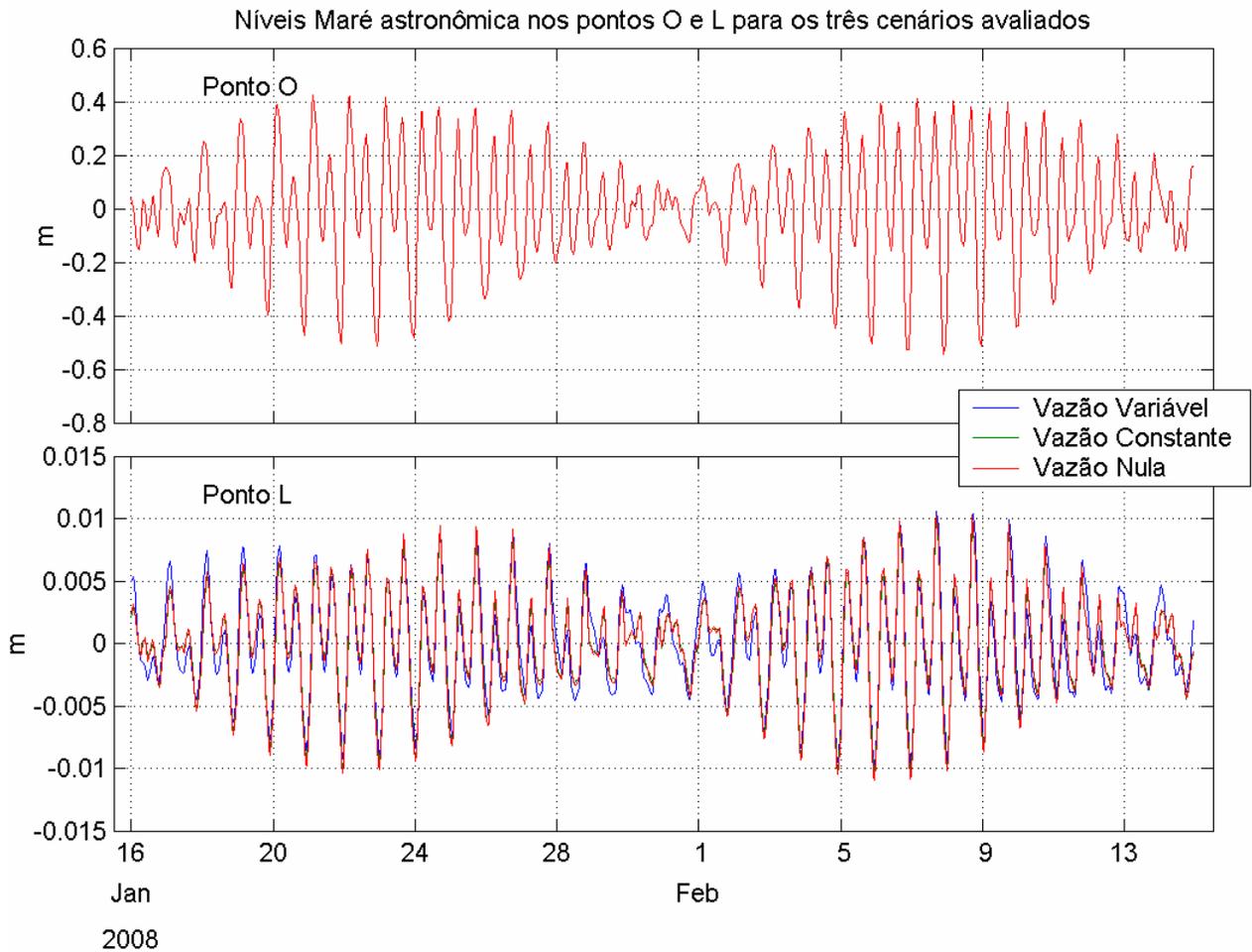


Figura 24: Maré astronômica dos três cenários simulados nas seções O e L. Os dois gráficos tem diferentes escalas de ordenada.

As Figuras 25 e 26 representam os constituintes harmônicos significativos para as seções O e L na simulação Vazão Nula. Embora tenha havido diferenças no sinal reconstituído mostrado na Figura 24 os constituintes não apresentaram diferenças significativas com as demais simulações tendo apresentado gráficos semelhantes, não sendo necessária a sua representação. A atenuação

relativa dos constituintes diurnos (O1 e K1) e semi-diurnos (M2 e S2) é de 98 % em ambos os casos. Esta atenuação é superior aos valores encontrado por Rocha (2007) de 70% e 90% respectivamente, isto devido ao fato de o autor ter encontrado valores na extremidade exterior do canal 20% superior ao forçado na fronteira de seu modelo.

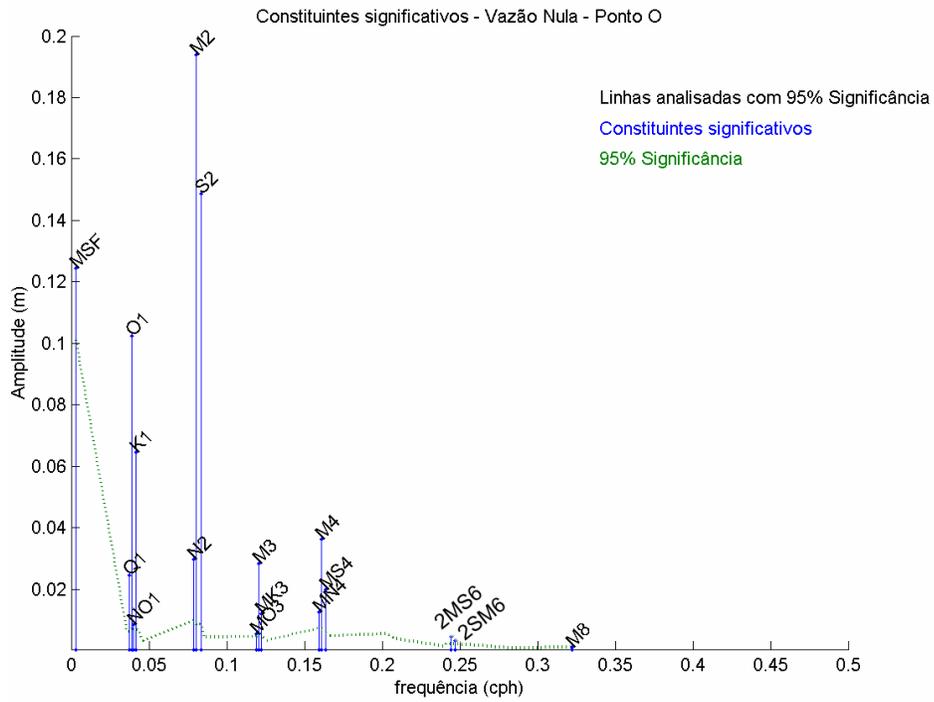


Figura 25: Constituintes significativos – Ponto O – Vazão Nula.

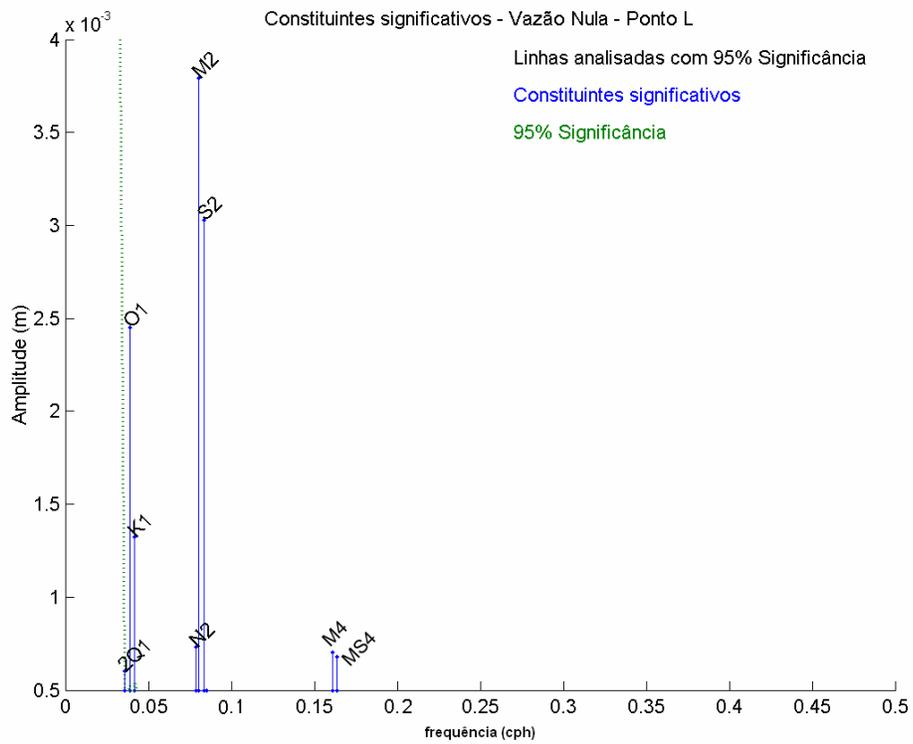


Figura 26: Constituintes significativos – Ponto L – Vazão Nula.

Para os pontos O e L a Tabela 10 apresenta os valores de amplitude dos principais constituintes diurnos, semidiurnos e de água rasa, e o respectivo número de forma dado pela (Equação 31) nos três cenários simulados. A Figura 27 ilustra a atenuação dos valores de amplitude ao longo do canal.

$$F = \frac{(K1 + O1)}{(M2 + S2)} \quad (31)$$

Observa-se que o número de forma no canal representa sempre uma maré mista com predominância semidiurna ($0,25 \leq F \leq 1,25$), mas com valores aumentando de 0,49 na desembocadura externa (O), para 0,60 (Vazão Variável) na sua desembocadura interna (L), mostrando um aumento relativo da importância dos constituintes diurnos. Sendo este aumento praticamente igual para todos os cenários de Vazão simulados. Kjerve e Knoppers (1991) estudaram o comportamento da atenuação de maré no canal da Lagoa de Guarapina e obtiveram um aumento da importância dos constituintes diurnos em seções interiores da laguna em relação a seções exteriores.

Tabela 10: Amplitude da maré astronômica nas desembocaduras externa e interna do canal para as três simulações e respectivos Número de forma.

		Vazão Nula		Vazão Constante		Vazão Variável		
		Frequência (ciclos/h)	Ponto O (cm)	Ponto L (cm)	Ponto O (cm)	Ponto L (cm)	Ponto O (cm)	Ponto L (cm)
<u>Constituintes Diurnos</u>	O1	0,039	10,25	0,25	10,25	0,24	10,25	0,29
	K1	0,042	6,45	0,13	6,45	0,13	6,45	0,11
<u>Constituintes Semidiurnos</u>	M2	0,081	19,38	0,38	19,39	0,36	19,38	0,38
	S2	0,083	14,86	0,30	14,85	0,28	14,85	0,28
<u>Constituintes de água rasa</u>	M4	0,161	3,64	0,07	3,64	0,06	3,64	0,05
	MS4	0,164	1,99	0,07	1,98	0,06	1,98	0,06
Número de forma	F	-	0,49	0,56	0,49	0,58	0,49	0,60

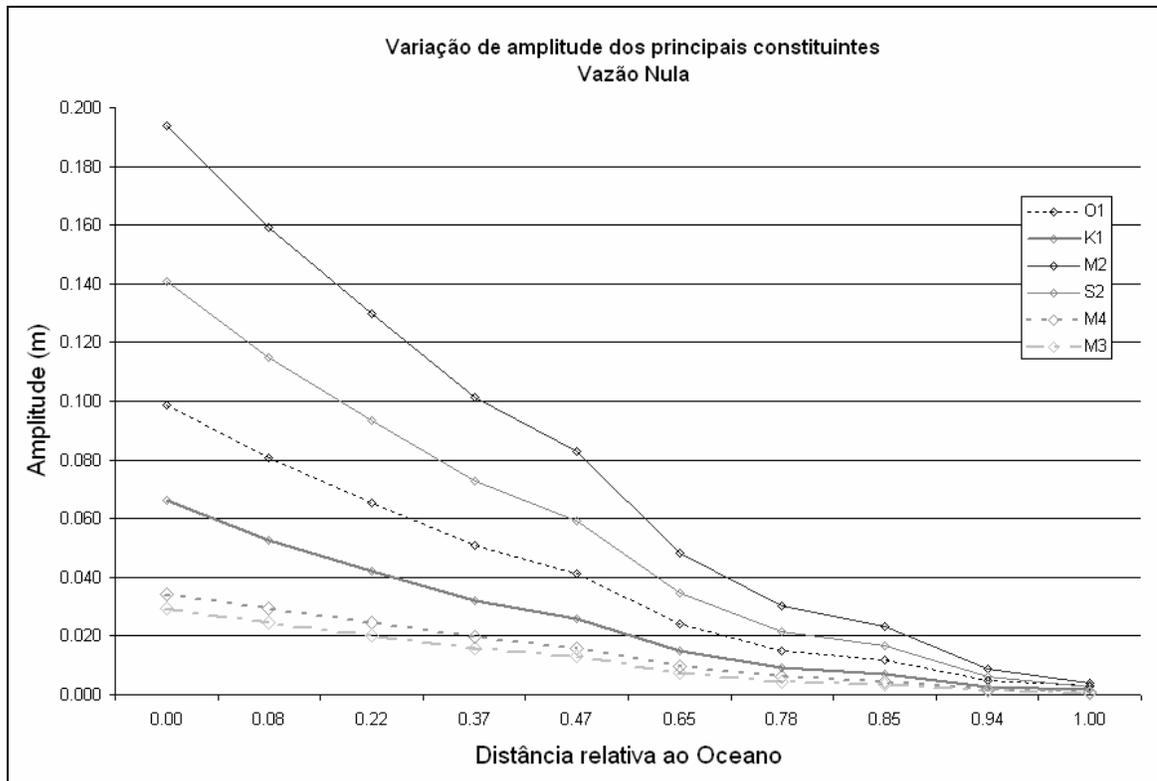


Figura 27: Variação da amplitude dos principais constituintes Vazão Nula

A partir das fases em graus foi analisada a diferença em cada um dos pontos relativa ao ponto O (desembocadura oceano), a qual foi calculada pela Equação 32:

$$\tau_{const} = \varphi_{const} - \varphi_O \quad (32)$$

onde, τ_{const} é a diferença de fase do constituinte no ponto estudada em relação ao ponto Oceano em horas;

φ_{const} é a fase do constituinte no ponto estudada, em horas;

φ_O é a fase do constituinte no ponto Oceano, em horas.

Para o cálculo de φ em horas foi utilizada a fase em graus segundo a Equação 33.

$$\varphi(\text{horas}) = \frac{\text{fase}(\text{graus})}{\text{freq}(c/h) * 360} \quad (33)$$

Para as componentes diurnas O1 e K1 há fase permanece praticamente constante até o Ponto 7, a 85% da extensão total do canal, a partir deste ponto há um forte atraso de fase nas oscilações entre as duas desembocaduras do canal alcançando valores da ordem de 4 horas para O1 e 2,5 para K1.

Para os semi-diurnos o atraso é da ordem de 1,5 hora e uma também há um comportamento semelhante aos constituintes diurnos de sofrerem maiores atraso de fase a partir do Ponto 7. O constituinte M3 sofre um atraso de menos de 1 hora na desembocadura interna da lagoa em relação ao Ponto O. O atraso de fase está apresentado na Figura 28. A Tabela 11 apresenta o comportamento de fase dos principais constituintes nas desembocaduras externa (O) e interna (L) do canal para os três cenários simulados. Andrade (2001) encontrou atrasos na elevação máxima no interior da laguna de 4 horas em relação a preamar na entrada do canal quando o modelo foi forçado apenas com a maré astronômica.

Tabela 11: Comportamento das fases (em Graus) nas desembocaduras externa (O) e interna (L) do canal para as três simulações.

	frequência (ciclos/h)	Vazão Nula		Vazão Constante		Vazão Variável		
		Ponto O	Ponto L	Ponto O	Ponto L	Ponto O	Ponto L	
<u>Constituintes Diurnos</u>	O1	0,0387307	89,56	155,09	89,54	148,84	89,57	144,10
	K1	0,0417807	165,16	200,51	165,25	203,38	165,22	182,84
<u>Constituintes Semidiurnos</u>	M2	0,0805114	97,86	140,73	97,79	142,89	97,80	146,29
	S2	0,0833333	118,44	153,83	118,43	156,72	118,41	152,34
<u>Constituintes de água rasa</u>	M3	0,1207671	199,55	243,55	199,56	245,72	199,69	250,15
	M4	0,1610228	135,81	169,68	135,63	170,05	135,58	175,41

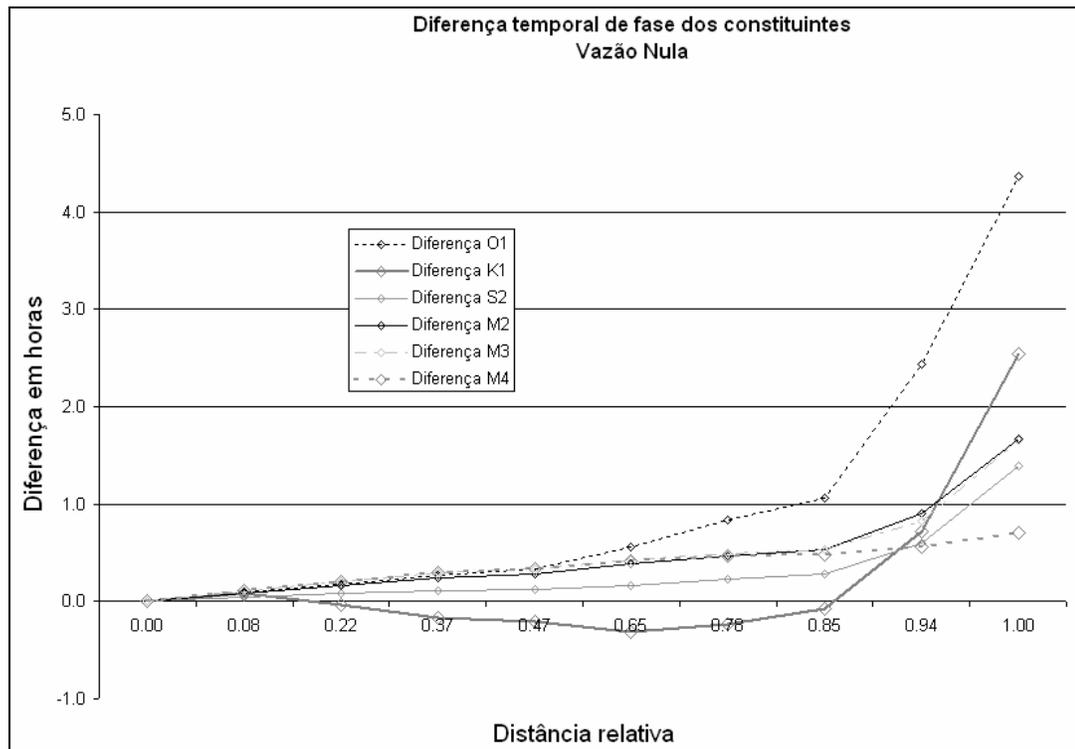


Figura 28: Diferença temporal relativa à seção O para a simulação Vazão Nula.

Os resultados encontrados na Vazão Nula e Vazão Constante foram semelhantes, porém o resultado da Vazão variável mostrou diferenças para a diferença de fase, sofrendo um atraso menor para O1 e em compensação um atraso maior para a componente K1 (Figuras 31 e 32). Os resultados de amplitude mantiveram-se semelhantes às demais simulações (Figuras 29 e 30)

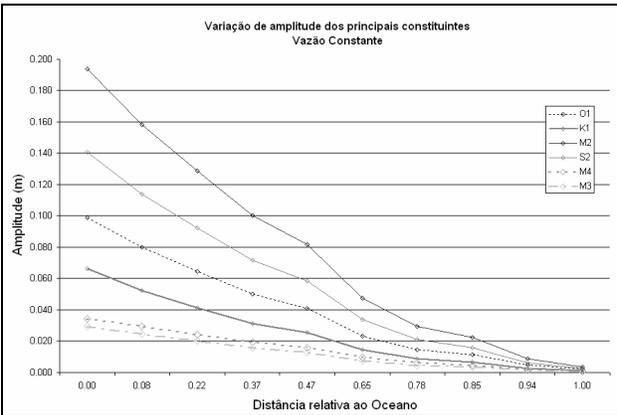


Figura 29: Variação da amplitude Vazão Constante.

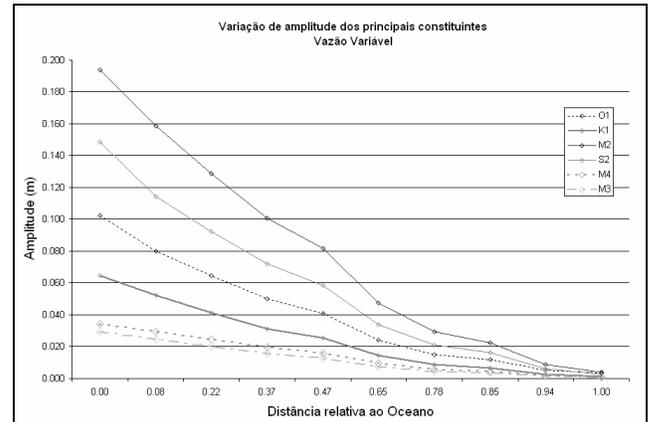


Figura 30: Variação da amplitude Vazão Variável.

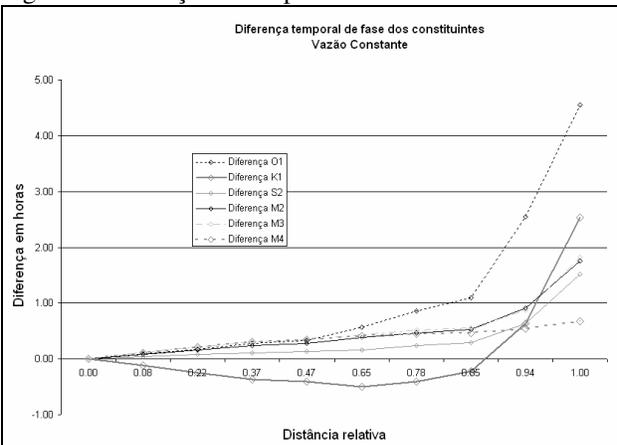


Figura 31: Diferença temporal de fase Vazão Constante.

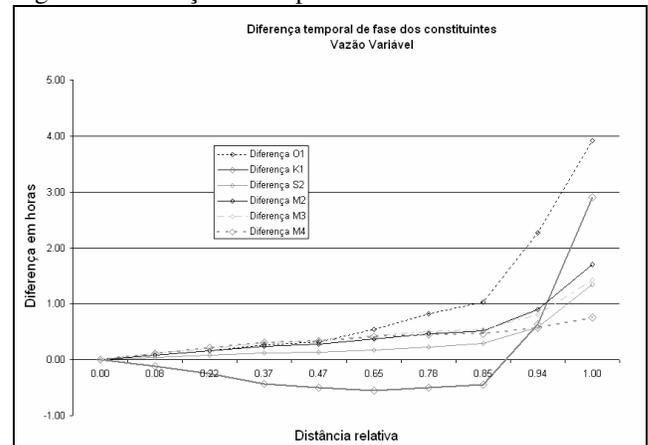


Figura 32: Diferença temporal de fase Vazão Variável.

Para identificar a diferença temporal entre as séries dos níveis astronômicos foi utilizada a correlação cruzada (Figuras 33, 34 e 35), com isto foi possível verificar o comportamento geral da maré e comparar-se com o comportamento médio dos principais constituintes. A Tabela 12 ilustra o atraso médio do nível astronômico ao longo do canal e nos três pontos internos da lagoa. Identificou-se assim que apenas as componentes diurnas sofrem maior atraso em relação ao sinal

reconstituído e isto fica mais evidenciado apenas no Ponto L. o subsistema sul comporta-se com um atraso médio do nível astronômico da ordem de 6 horas.

Tabela 12: Atraso médio (em horas) do nível astronômico reconstituído em relação ao ponto O para os três cenários simulados.

Ponto (em relação a O)	1	2	3	4	5	6	7	8	L	N	C	S
Atraso Vazão Nula	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	4	6
Atraso Vazão Constante	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	4	6
Atraso Vazão Variável	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	6

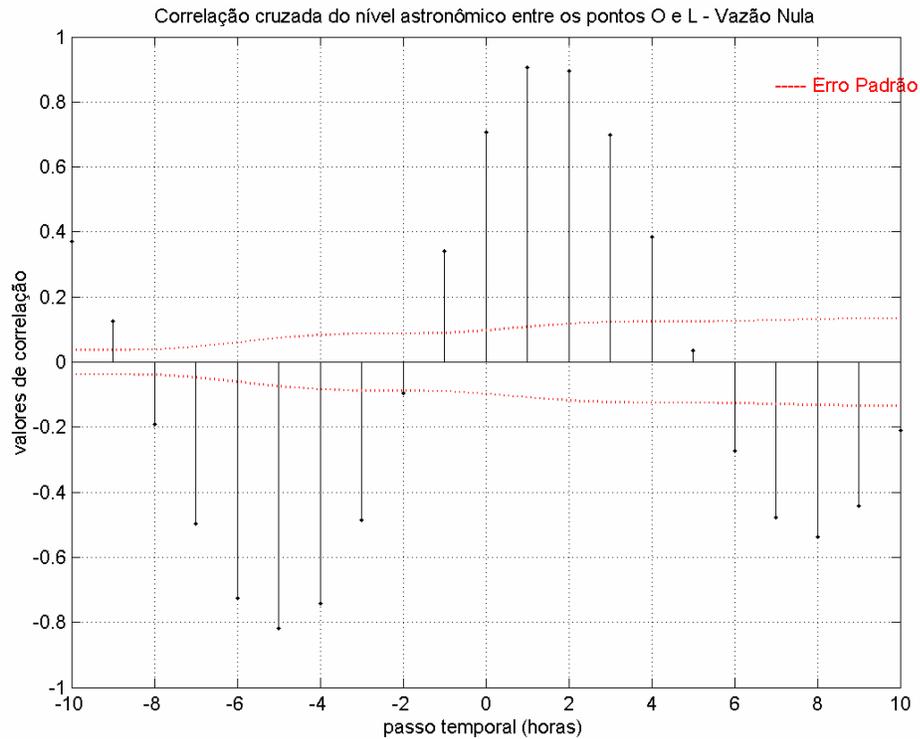


Figura 33: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para a Vazão Nula.

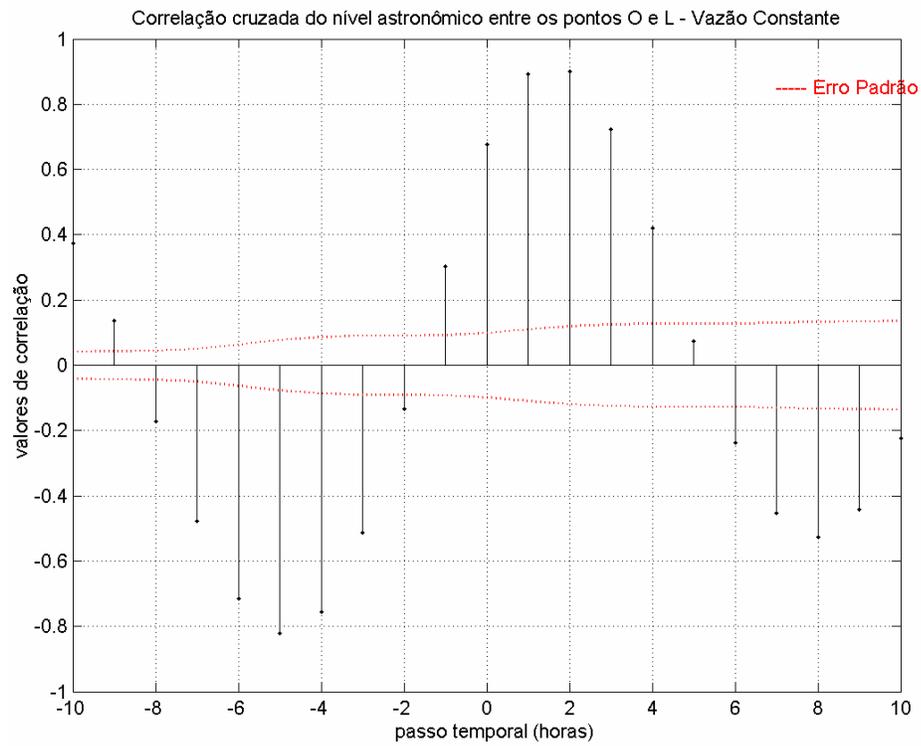


Figura 34: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para Vazão Constante.

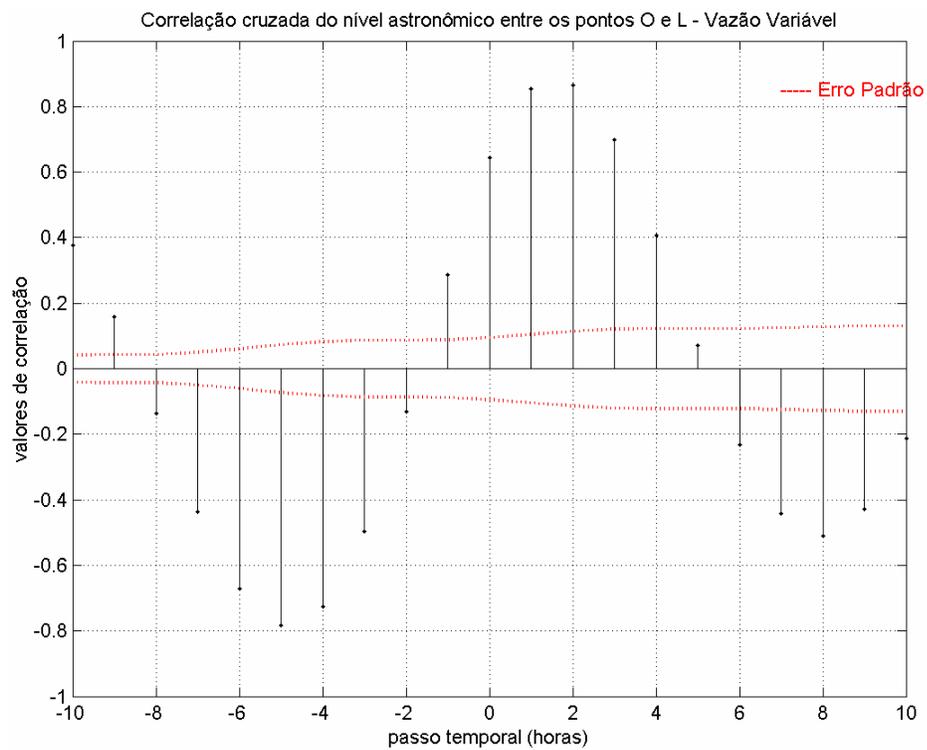


Figura 35: Correlação cruzada do nível astronômico entre as seções O e L para Vazão Variável.

Comparando-se as Figuras 33, 34 e 35, observa-se uma alta correlação entre os dados para todos os casos analisados. Para o cenário de vazão nula tem-se a maior correlação (0,91) no primeiro passo temporal ($lag = 1$). Para o cenário de vazão constante a maior correlação (0,90) foi atingida no segundo passo temporal ($lag = 2$) e no cenário de vazão variável a maior correlação (0,87) no segundo passo temporal.

Para a maré astronômica verificou-se um decréscimo de 99,95% na variância entre o valor na seção (O) e a seção (L) para Vazão Nula, de 99,95% para Vazão constante e de 99,50%. O andamento da variância relativa ao longo do canal está representado na Figura 36 onde se observa uma forte atenuação nos primeiros metros do canal, suavizando o seu declínio a partir da seção 5. Mostrando a perda de energia inicial nos meandros do canal.

Os valores de variância das componentes astronômica, meteorológica, e total das variações do nível do mar nas duas embocaduras do canal para as três simulações são apresentados na Tabela 13. Ao analisar-se a distribuição da variância do sinal nos Pontos O e L observa-se o aumento da importância meteorológica no interior da laguna. A componente meteorológica que representa 35% da energia total do sinal na desembocadura externa passa a representar 98,8% da energia total na desembocadura interna (Ponto L).

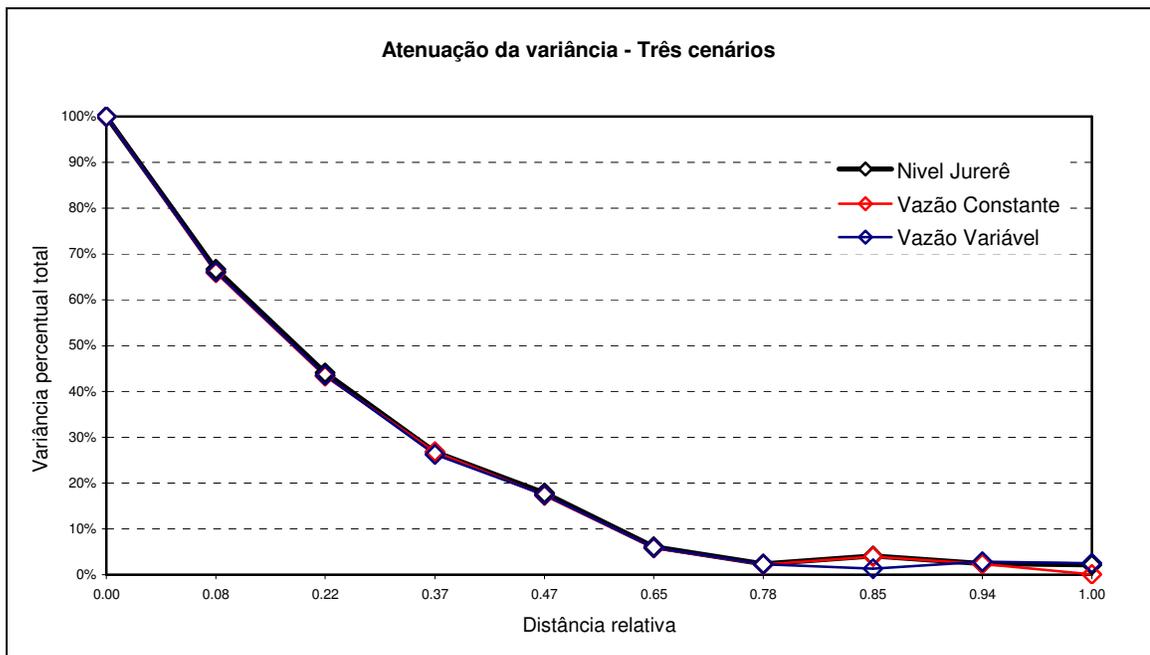


Figura 36: Atenuação da variância da maré astronômica para os três cenários simulados.

Tabela 13: Análise de variância da variação do nível do mar nas duas desembocaduras do canal para os três cenários simulados.

	Variância Vazão Nula		Variância Vazão Constante		Variância Vazão Variável	
	Ponto O cm ² (%)	Ponto L cm ² (%)	Ponto O cm ² (%)	Ponto L cm ² (%)	Ponto O cm ² (%)	Ponto L cm ² (%)
<u>Componente Astronômica</u>	397,8 (64,8)	0,2 (1,2)	397,8 (64,8)	0,2 (1,2)	397,7 (64,6)	0,2 (1,2)
<u>Componente Meteorológica</u>	216,4 (35,2)	16,2 (98,8)	216,2 (35,2)	15,5 (98,8)	218,0 (35,4)	15,5(98,8)
TOTAL	614,2 (100)	16,4 (100)	614,0 (100)	15,7 (100)	615,7 (100)	15,7 (100)

A Figura 37 apresenta os níveis astronômicos e meteorológicos para a seção L nos três cenários simulados, podemos observar a influência do evento hidrológico no início de fevereiro no nível meteorológico. A análise no domínio das frequências - astronômicas (alta frequência) e meteorológicas (baixa frequência) – possibilita identificar como um evento hidrológico afeta o nível meteorológico mantendo praticamente inalterado o nível astronômico.

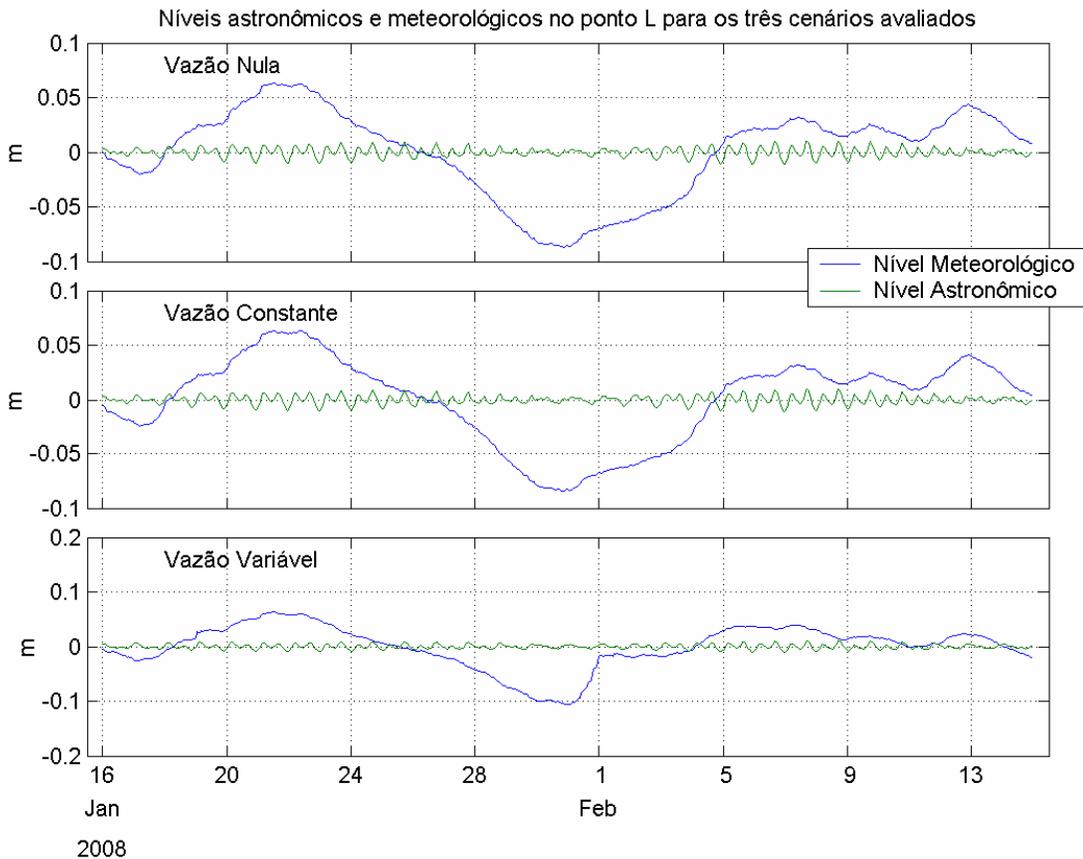


Figura 37: Níveis Astronômicos e Meteorológicos na seção L para os três cenários simulados.

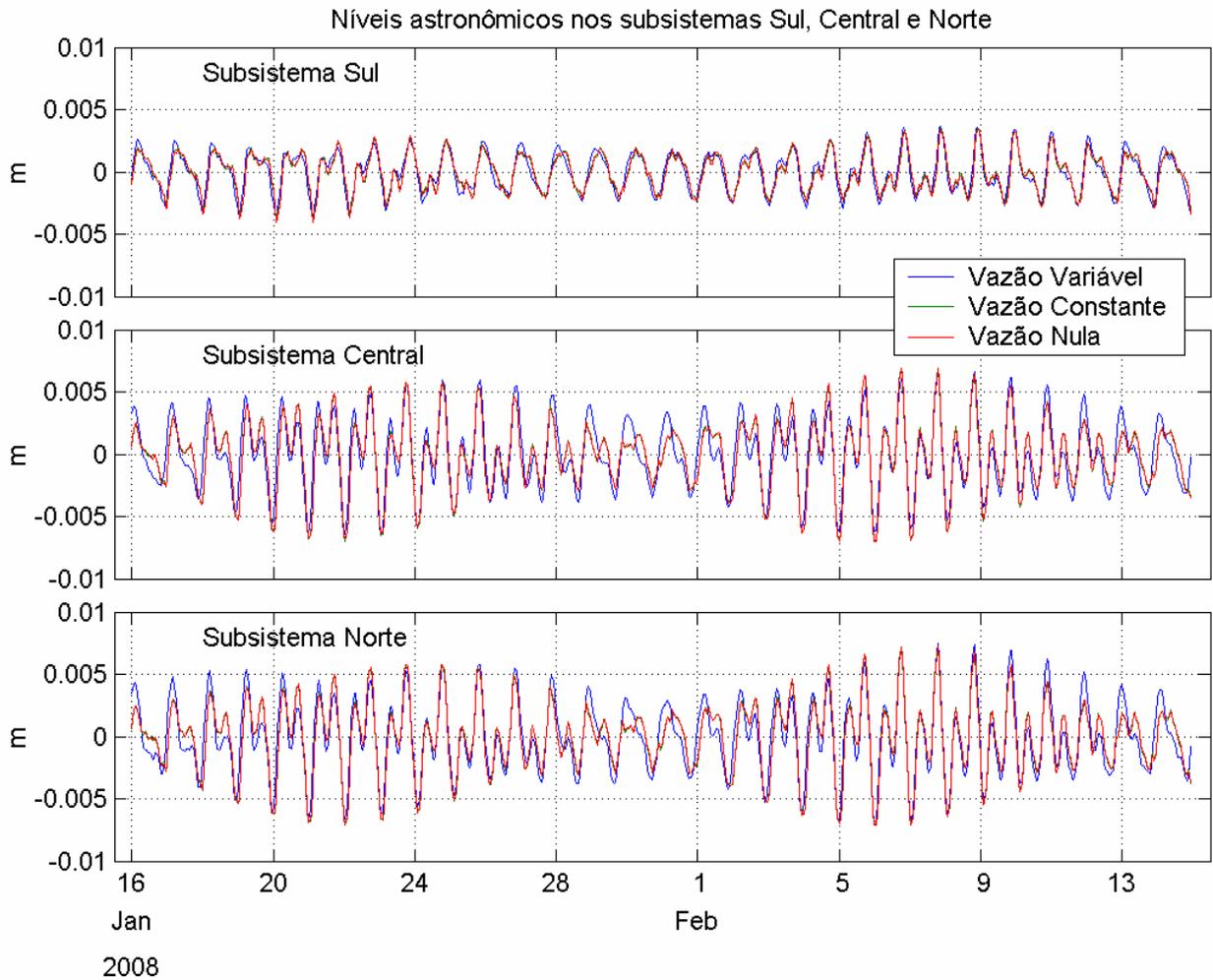


Figura 38: Níveis astronômicos nos três compartimentos da laguna.

Para as três seções interiores da laguna ilustradas na Figura 38 pode-se observar um padrão coincidente de comportamento da Vazão Nula e da Vazão Constante para as seções Norte e Central e Sul. A simulação de Vazão Variável apresenta maiores diferenças de nível nos subsistemas Norte e Central mostrando a atenuação de importância de descargas no nível astronômico do subsistema sul.

ANÁLISE DOS NÍVEIS METEOROLÓGICOS

A subtração do nível astronômico do nível total resulta no nível meteorológico apresentado na Figura 39. Observa-se no nível meteorológico a influência do evento pluviométrico extremo de janeiro no interior da Lagoa.

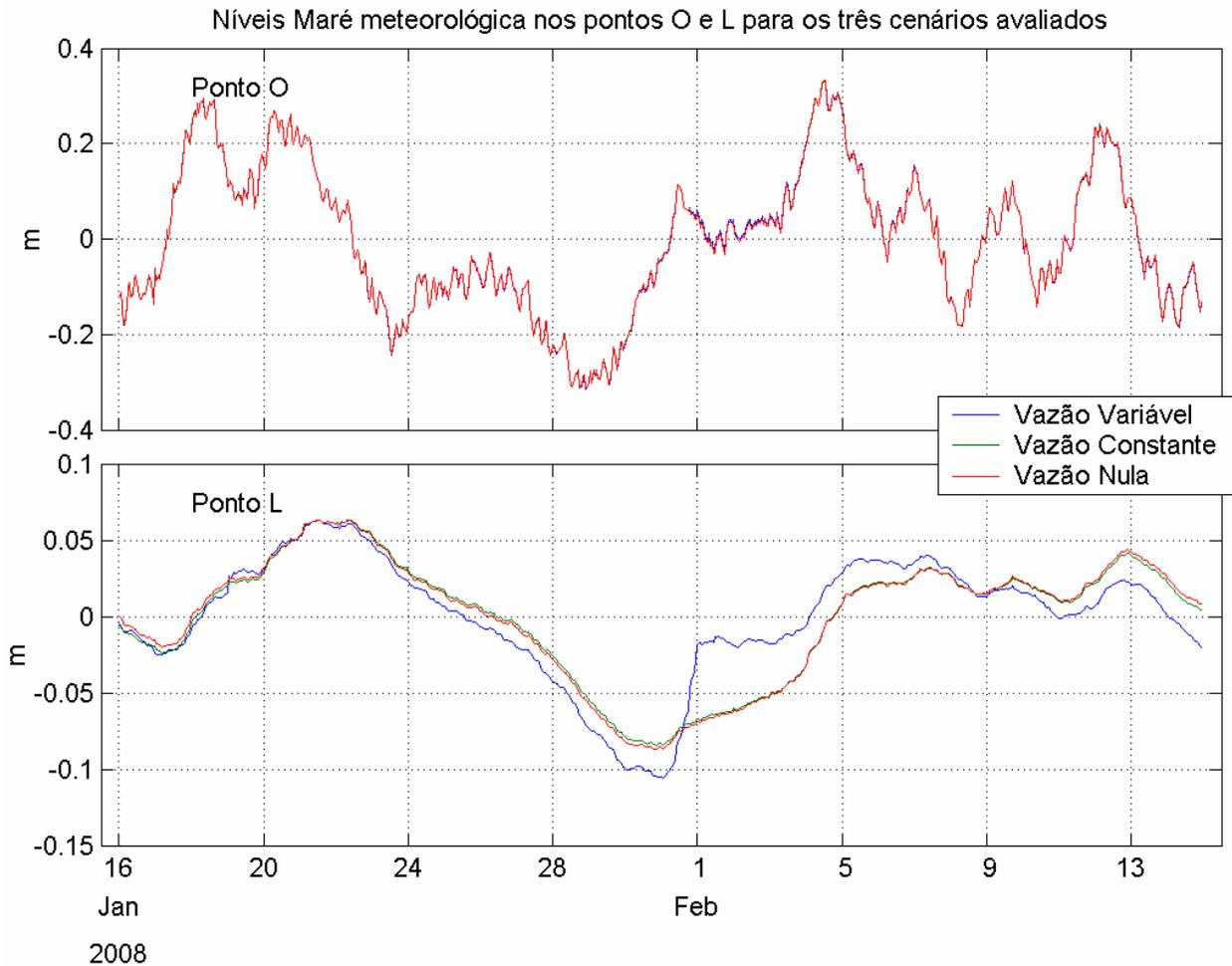


Figura 39: Maré meteorológica dos três cenários simulados nos seções O e L. Gráficos com diferença de escalas verticais.

Para a análise espectral, primeiramente foram alinhadas as séries de maneira a obter-se um resultado não tendencioso do espectro cruzado, da função ganho e da função coerência quadrática (WEI, 1994). O alinhamento foi realizado baseado na correlação cruzada dos dados como ilustram as Figuras 40, 41 e 42, para as simulações Vazão Nula, Vazão Constante e Vazão

Variável respectivamente. Estes atrasos estão resumidos na Tabela 14, onde estão apresentadas todas as seções do canal e as seções no interior da laguna.

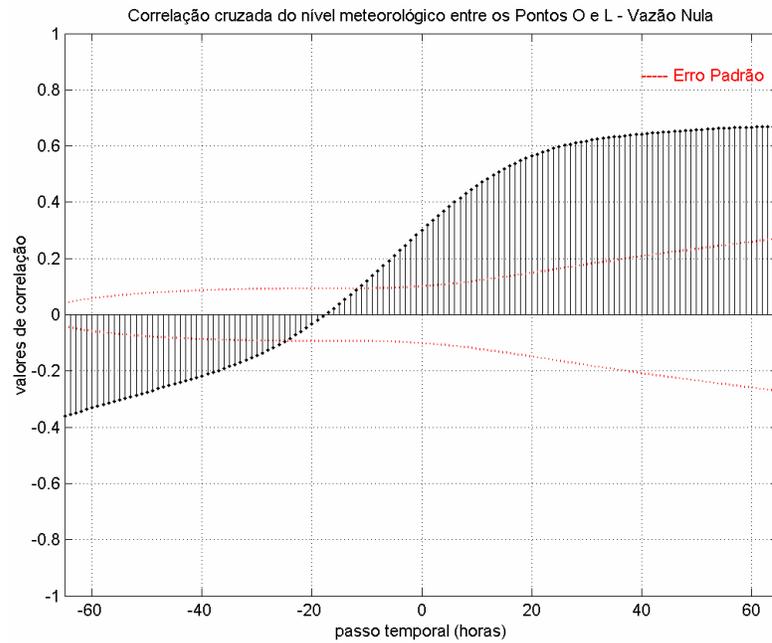


Figura 40: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para o Nível Jurere.

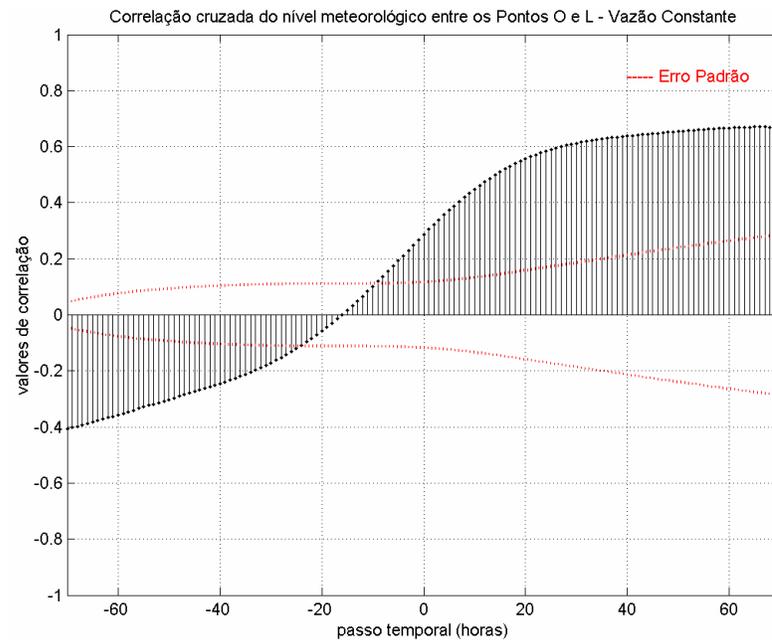


Figura 41: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para Vazão Constante.

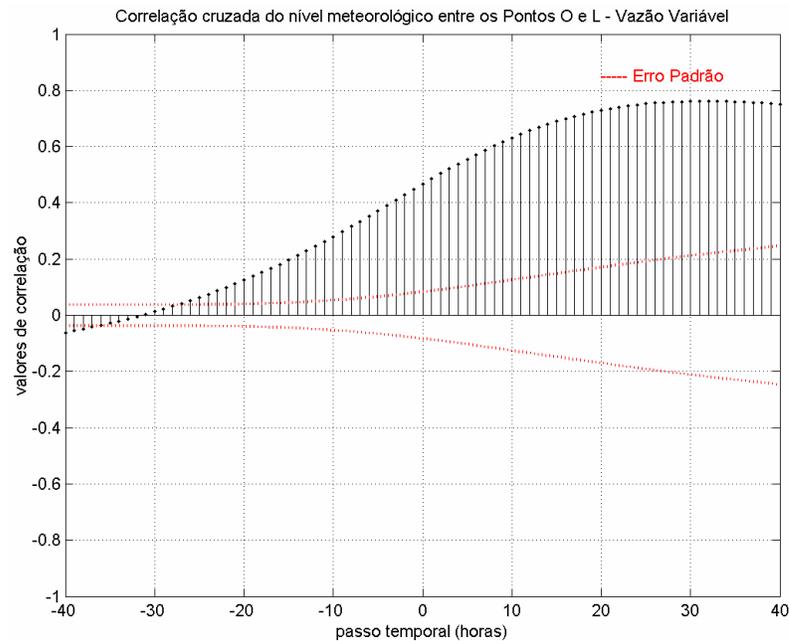


Figura 42: Correlação Cruzada da maré meteorológica entre as seções O e L para Vazão Variável.

Tabela 14: Atraso (em horas) dado pela correlação cruzada entre a seção em estudo e o Ponto Oceano (O) para a maré meteorológica.

Ponto (em relação a O)	1	2	3	4	5	6	7	8	L	N	C	S
Atraso Vazão Nula	0	1	1	2	5	12	14	30	64	67	67	75
Atraso Vazão Constante	0	1	1	2	5	12	15	30	66	40	45	45
Atraso Vazão Variável	0	1	1	2	5	12	14	26	32	34	34	41

As Figuras 43, 44 e 45 representam o atraso médio da maré meteorológica e os respectivos atrasos por intervalo de frequência para a seção L em relação à seção O. Para períodos de até 5 dias (frequência até 0.2 ciclos por dia) os atrasos de fase são bem superiores à média do nível meteorológico (nunca superior a 2 dias de atraso) para os três cenários simulados. Para o cenário de vazão variável o atraso máximo é quase a metade do atraso máximos das demais simulações.

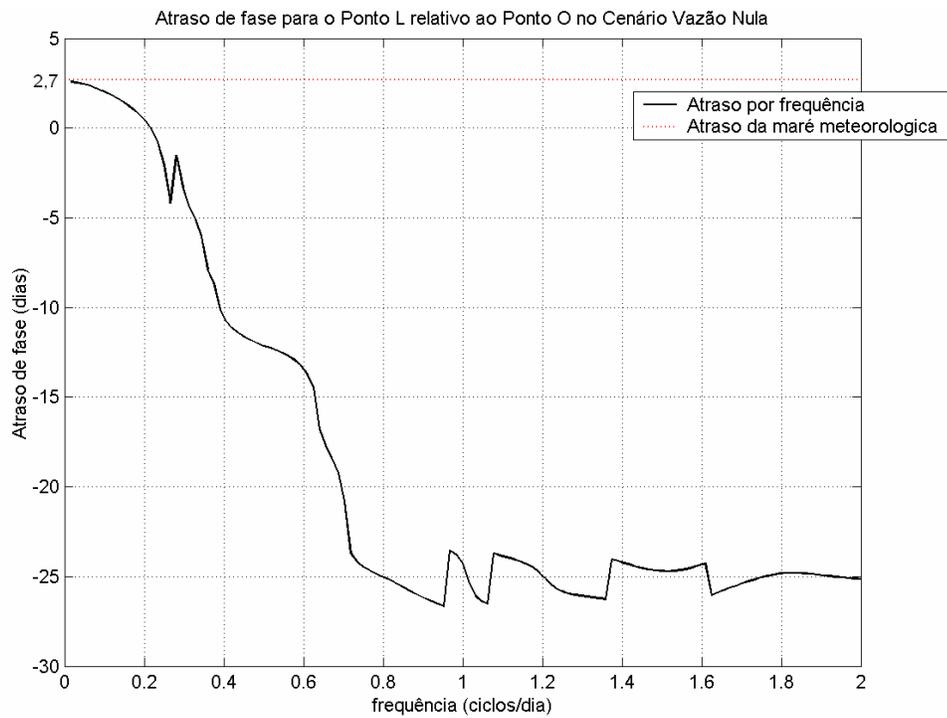


Figura 43: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Nula.

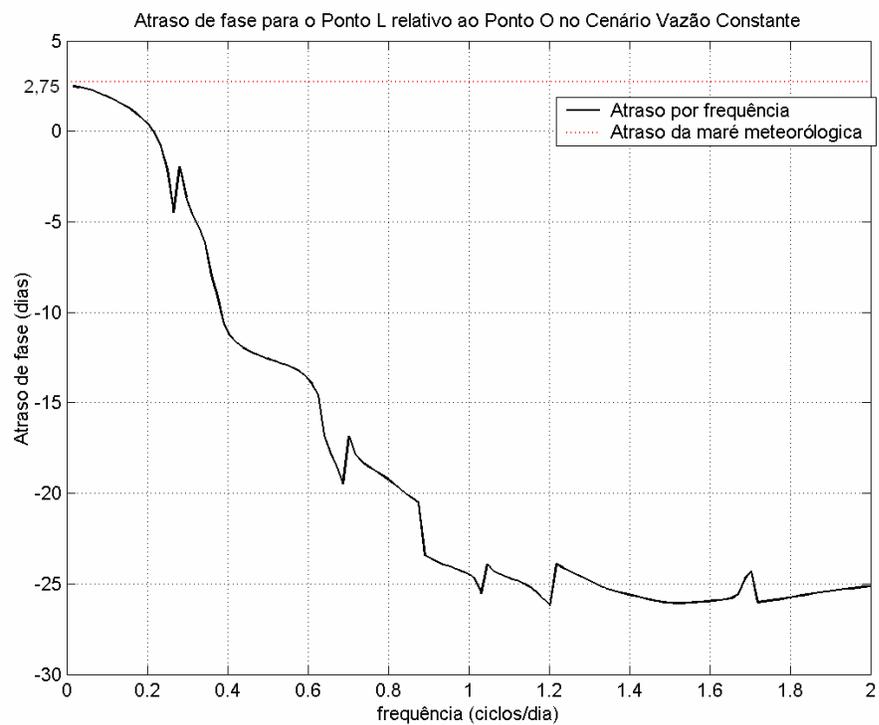


Figura 44: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Constante.

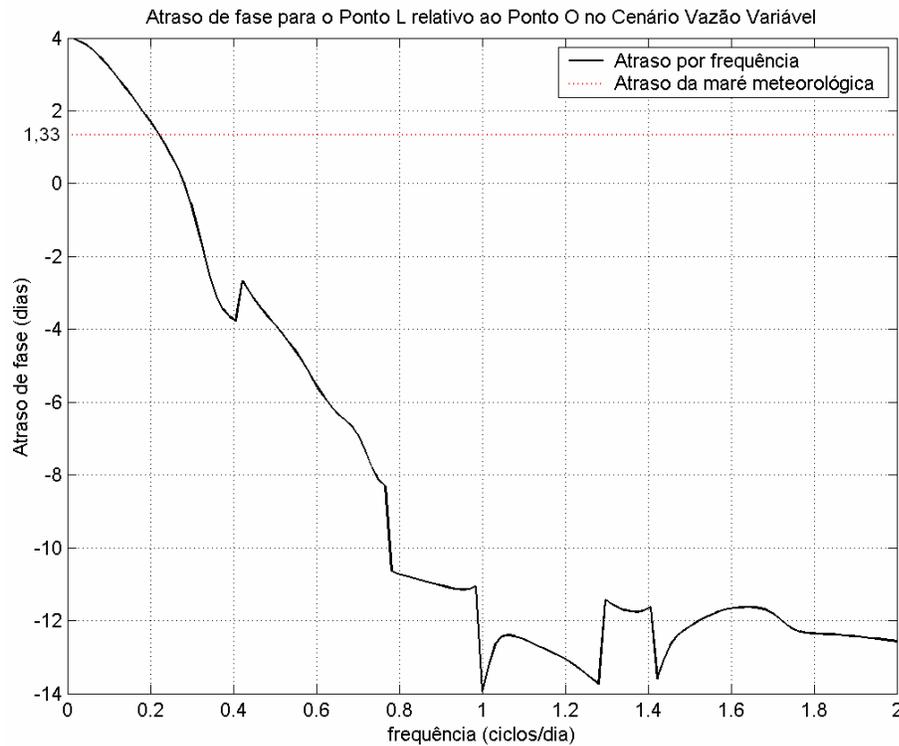


Figura 45: Atraso de fase por frequência e da maré meteorológica da seção L em relação a O – Vazão Variável.

O espectro densidade de potência da componente meteorológica filtrada e reamostrada para o intervalo de seis horas é mostrado na Figura 46, para o cenário de Vazão Nula, na Figura 49 para a Vazão Constante e na Figura 50 para a Vazão Variável. Os padrões de comportamento são similares com um pico suave em torno a períodos de 10 dias, intervalo de recorrência de sistemas frontais e picos acentuados na faixa de 3 a 4 dias e de 1 a 2 dias períodos de duração de sistemas frontais. Nas Figuras 47 e 48 são apresentadas a função ganho e função coerência quadrática para o cenário de Vazão Nula. As Figuras 51 e 53 apresentam as mesmas funções para o cenário de Vazão Constante e as Figuras 52 e 54 para o cenário de Vazão Variável. A análise da função ganho e da função coerência quadrática para os três cenários simulados mostra picos nos intervalos temporais citados acima, porém o ganho do espectro cruzado para a simulação de vazão variável apresenta valores menos significativos que as demais simulações. Notou-se, porém com o estudo a necessidade de períodos maiores de simulação para uma melhor correlação dos dados na faixa de frequências correspondente à maré meteorológica e com isso a geração de resultados mais consistentes.

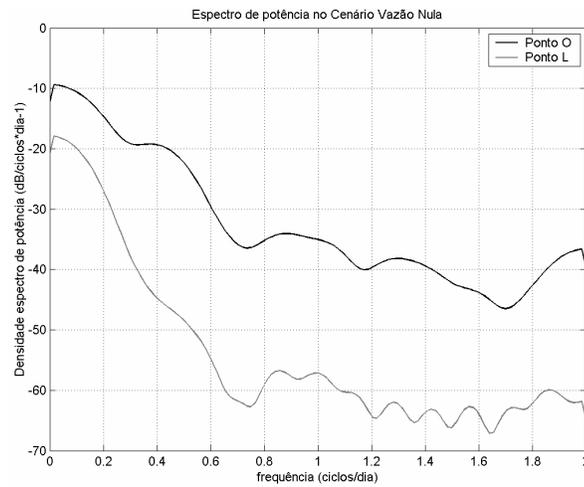


Figura 46: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Nula.

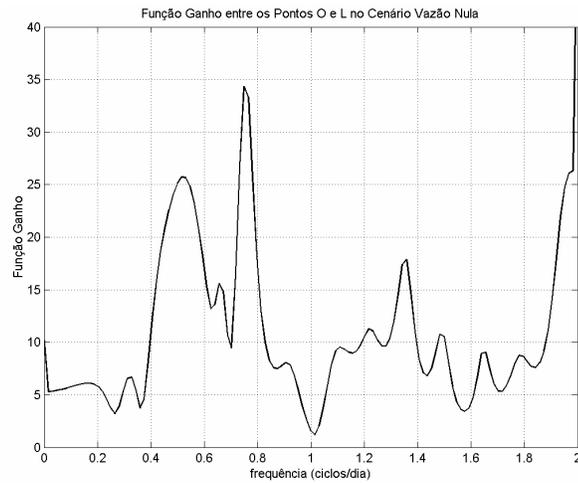


Figura 47: Função ganho entre os Pontos O e L Vazão Nula.

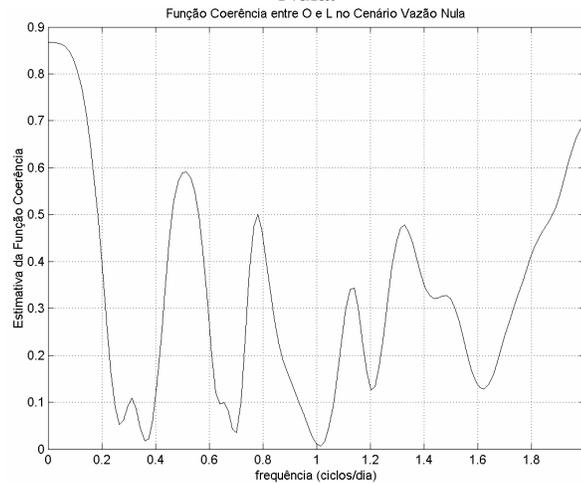


Figura 48: Função Coerência quadrática entre os Pontos O e L Vazão Nula.

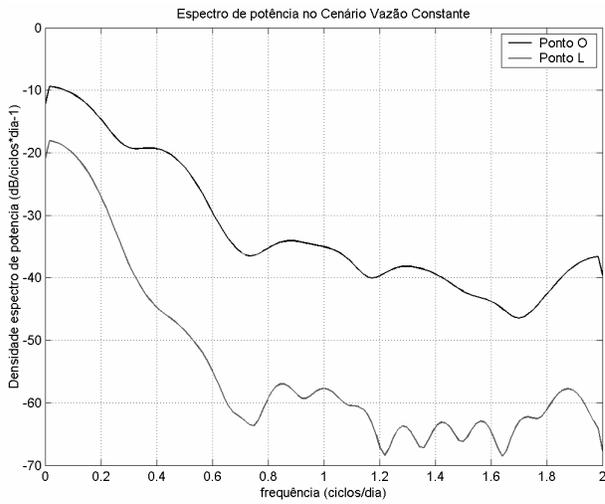


Figura 49: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Constante.

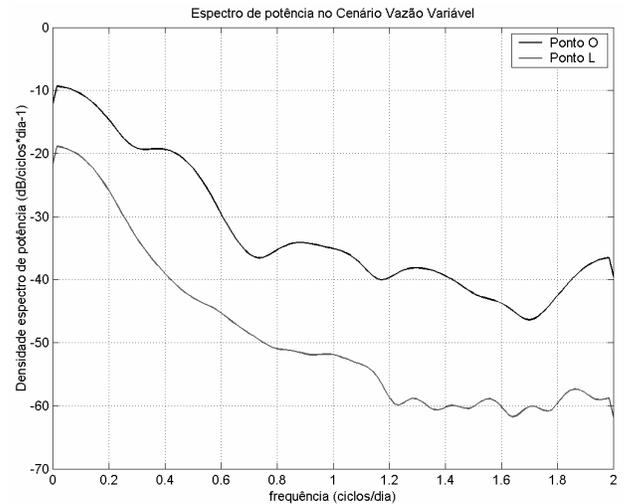


Figura 50: Espectro de Potência das seções O e L Vazão Variável.

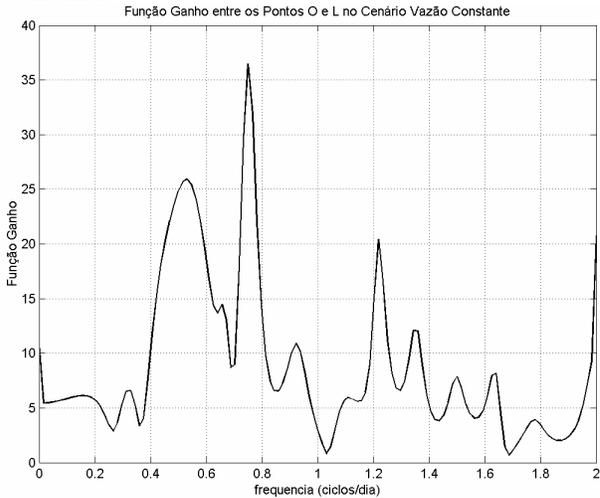


Figura 51: Função ganho entre os Pontos O e L Vazão Constante.

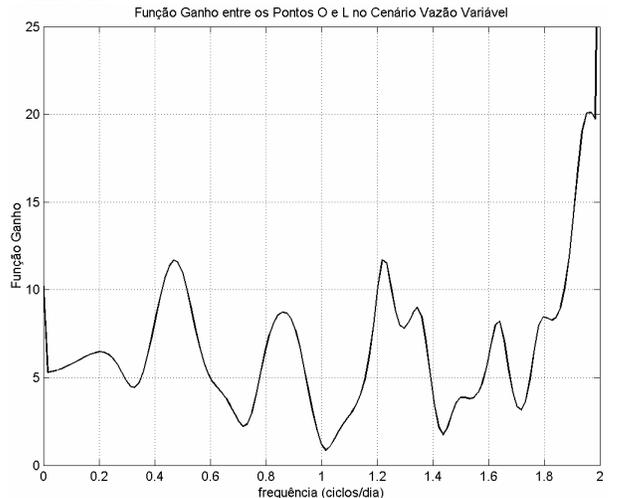


Figura 52: Função ganho entre as seções O e L Vazão Variável.

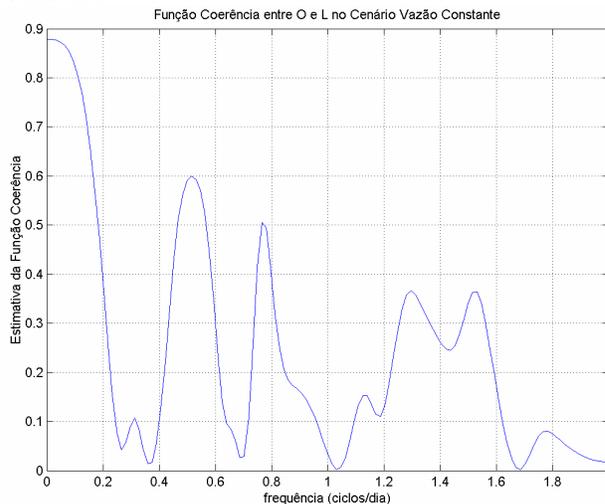


Figura 53: Função Coerência quadrática entre as seções O e L Vazão Constante

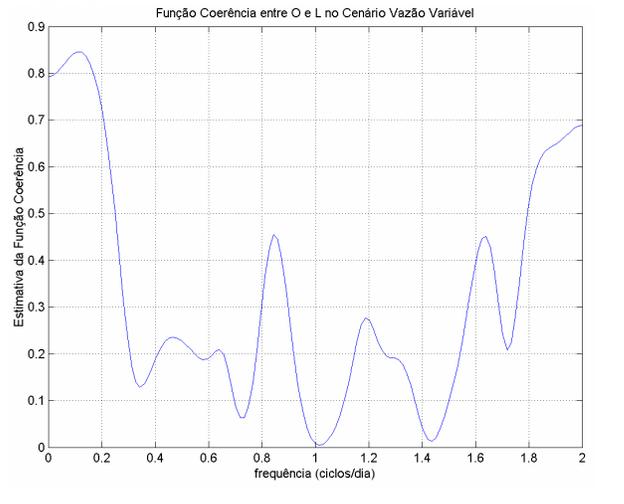


Figura 54: Função Coerência quadrática entre as seções O e L Vazão Variável

7. CONCLUSÕES

A análise espacial realizada com a utilização de Sistemas de Informação Geográficas se mostrou uma ferramenta importante para a estruturação de dados de entrada para a modelagem hidrodinâmica. Devendo-se enfatizar o estudo das fronteiras fechadas de contorno e de fundo, onde foi possível uma melhoria na qualidade dos dados de entrada no modelo hidrodinâmico. A batimetria também foi melhorada e integrada diferentes fontes de informações gerando um maior detalhamento batimétrico no domínio do modelo.

O modelo CN mostrou-se eficaz para a estimativa da vazão a partir de dados de chuva e da análise espacial do meio, como no trabalho apresentado por Baungarten, *et al.* (2003) a integração do modelo CN com o SIG possibilitou uma facilidade na definição da distribuição espacial para o cálculo da precipitação efetiva com o auxílio do Matlab. Recomenda-se que sejam adquiridos dados de vazão para uma calibração e possível validação do modelo para a bacia. O método pode ser expandido para toda a bacia gerando séries de vazões afluentes à Lagoa. Também se recomenda uma investigação mais detalhada de dados preliminares como solo e taxas de infiltração que associados a um intervalo de aquisição de dados da ordem de 5 minutos aumentariam a qualidade do estudo hidrológico utilizado na modelação hidrodinâmica.

O Modelo MOHID, disponibilizado gratuitamente pelo Instituto Superior Técnico de Portugal, é uma ferramenta de modelagem hidrodinâmica, acessível, de interface gráfica que auxilia o manejo de ambientes estuarinos possibilitando diferentes abordagens investigativas. Para o estudo da Lagoa com uma variação de espaçamento espacial muito variado (de 10m a 50m) foi necessário adotar um passo temporal muito reduzido (1,25s) o que gerou um processamento oneroso com uma hora de processamento para cada três horas simuladas. A organização do modelo sendo montado através de arquivos texto possibilita uma facilidade de inserção de dados em séries temporais ou em informações espaciais.

A avaliação do comportamento hidrodinâmico da laguna sob os diferentes cenários simulados mostrou como, em geral, a lagoa tem um comportamento diferenciado com um aporte de água

doce por valores médios (constantes) e por valores de vazão variando com o regime pluviométrico. Estas diferenças obtidas no nível total da laguna ficaram mais evidenciadas na análise do nível meteorológico, sendo imperceptível a influência de eventos pluviométricos na análise do nível astronômico. De maneira geral as simulações Vazão Nula e Vazão Constante geraram resultados muito semelhantes, o que ajuda a concluir que a primeira é um caso específico da segunda.

Em todos os cenários simulados houve predominância da maré meteorológica na desembocadura interna do canal representada por 98,8% da variância da onda de maré que penetra o canal.

As técnicas de análise harmônica dos principais constituintes da maré e da análise espectral cruzada do nível meteorológico permitiram determinar a influência relativa do nível oceânico e de forçantes hidrológicas sobre o nível médio da laguna e na penetração da onda de maré no canal da Barra da Lagoa, em alta e baixa frequência. Os valores de atenuação total da onda de maré da ordem de 88% resultam compatíveis com o estudo de medição realizado por Andrade (2001), Pereira (2004) e Rocha (2007).

A comparação entre os resultados das análises harmônicas nos permite concluir que as forçantes hidrológicas não interferem nos componentes astronômicos havendo um ligeiro aumento no número de forma do cenário Vazão Variável em relação ao Vazão Nula.

A análise espectral do nível meteorológico demonstrou como é significativo o período de ocorrência de sistemas frontais, de cerca de 5 dias, contudo este fato ficou menos evidenciado no cenário de Vazão Variável, onde foram obtidos valores menos das funções ganho e coerência quadrática em relação às demais simulações. Considera-se importante para uma análise mais completa das principais frequências significativas na análise espectral a simulação sobre um intervalo temporal maior para que seja possível identificar com mais acurácia os períodos de oscilação da componente meteorológica. Recomenda-se também que sejam aprofundados os estudos hidrodinâmicos com a análise das velocidades e dos processos de dispersão nos diferentes cenários

Os monitoramentos ambientais realizados através da estação maregráfica de Jurerê e da estação meteorológica da Barra da Lagoa foram importantes ferramentas que possibilitaram um estudo da hidrodinâmica da lagoa por meio de modelagem computacional.

Para um estudo hidrológico mais elaborado recomenda-se a instalação de estações maregráficas ao longo do corpo lagunar, bem como estações fluviométricas nos diversos córregos que compõem a bacia hidrográfica, além da diminuição da taxa de aquisição de dados de 30 minutos para 5 minutos. A instalação de mais estações meteorológicas também poderia melhorar a qualidade dos dados simulados, de maneira a calibrar e validar um modelo hidrodinâmico para a Lagoa que possa assim entender e prever os processos de dispersão no aquífero.

O estudo demonstrou ainda que se deva procurar entender melhor os efeitos de uma regularização de vazão para o sistema estuarino da Lagoa da Conceição uma vez que este cenário apresentou diferenças significativas de nível e de comportamento hidrodinâmico em relação ao cenário natural de vazão variável.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROCONSULT- Aerolevantamentos e Consultoria- **Relatório final da batimetria – distrito administrativo da Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa**. Florianópolis, SC. 2001.

ANDRADE, R. C. **Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

BARBOSA, T. C. P. **ECOLAGOA: um breve documento sobre a ecologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição** / Ana Cristina José, Juliana Rezende Torres – Florianópolis, Agnes, 2003.

BAUER NETO, V. **Caracterização geomorfológica da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC** - Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC Florianópolis, SC. 2007.

BAUNGARTEN, A. P.; FÉLIX, D.; MÜLLER, M. **Determinação da precipitação efetiva na Bacia do Rio Chopim através ao Método da Curva Número do SCS**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC - CEHPAR. Anais XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Brasil, 23-27 novembro 2003.

BLUMBERG, A.F. e. KANTHA, L.H. **Open boundary condition for circulation models**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111. 1985. pp 237-2555.

BONTA, J.V., **Determination of watershed curve number using derived distributions**. Journal of Irrigation Drainage Engineering ASCE, 123(1), 28–36. 1997.

BRAGA, S. M., DELARIZZA, R.A., SANTOS, I. FERNADES, C. V. S. **Avaliação da performance de pluviômetros de balsa: Técnicas para a realização de ensaios pluviométricos em laboratório**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

BRASIL, **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispões sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

BRASIL, **Lei nº 7.661**, de 16 de maio de 1988. Dispões sobre o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, e dá outras providências.

BRASIL, **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a política Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências.

BRAUNSCHWEIG, F - **Generalização de um Modelo de Circulação Costeira para Albufeiras**, Dissertação. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2001.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo. 2005.

CARUSO, M. M. L. **O desmatamento da Ilha de Santa Catarina de 1500 aos dias atuais – Florianópolis**: Ed. UFSC, Florianópolis, 1990.

CARUSO JR., F. ; MARIO, H. 2000. “**O ecossistema Praia da Barra / Lagoa da Conceição (Ilha de Santa Catarina) e os riscos de impactos ambientais em função de empreendimentos turísticos.**”In: Anais do Simpósio Brasileiro de Praias Arenosas – Univali – Itajaí: 410-412.

CECCA: **Uma cidade numa ilha: relatório sobre problemas sócios-ambientais da Ilha de Santa Catarina/** Centro de Estudos Cultura e Cidadania- CECCA – Florianópolis, Insular, CECCA, 1997.

DHN – Diretoria de hidrografia Nacional. **Carta Náutica CN 1902**. 1972

DUARTE, S. B. **Utilização de Sistema de Informações Geográficas na análise do Meio Físico e do Uso das terras na Lagoa da Conceição – Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, 1999.

DUTRA, S. J. **Caracterização geoambiental da Bacia de drenagem do rio João Gualberto, Ilha de Santa Catarina, SC**. Monografia do curso de Geografia, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil pp. 53. 1991.

EMBRAPA.- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos de Santa Catarina** Boletim de pesquisa e desenvolvimento n° 46. Rio de Janeiro. EMBRAPA. 2004.

EPAGRI/CIRAM. **Mapa Digital das unidades Hidrográficas do Estado de Santa Catarina**. Disponível em <http://ciram.epagri.rct-sc.br/cms/geo>, acessado em outubro de 2006.

EPAGRI/CIRAM - **Normais climatológicas**. Documento entregue sob requisição, maio de 2007.

FRANCO, A. S., **Tides fundamentals, analysis and prediction**, IPT, São Paulo, 1981.

GODOY, F. B. **Caracterização Temática da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC Florianópolis, SC. 2007.

GODOY, F. B., MARIO, H. F. S, FRANCO, D. **Caracterização Temática da Margem da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**.- Laboratório de Hidráulica Marítima - UFSC. Anais V Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Curitiba, PR. 2006.

GODOY, F. B., MARIO, H. F. S, FRANCO, D. **Uso de modelagem na análise da influência da rugosidade de fundo no comportamento hidrodinâmico da Lagoa da Conceição – SC**. Laboratório de Hidráulica Marítima - UFSC. Anais VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Serra Negra, SP. 2008a.

GODOY, F. B., MARIO, H. F. S, FRANCO, D. **O canal da Barra da Lagoa, Florianópolis – SC – um filtro de maré natural.** Laboratório de Hidráulica Marítima - UFSC. Anais III SEMENGO – Seminário de Engenharia Oceânica, Rio Grande, RS. 2008b.

GRÉ J.C.R., HORN FILHO, N.O. **Caracterização Textual dos Sedimentos de Fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC Brasil** In: *Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 25-34. 1999.

HAUFF, S. N. **Diagnóstico Ambiental Integrado da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis, SC.** Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC. Florianópolis, SC. 1996.

IBGE, **Censo Demográfico**, 2000. IBGE/SC/SDDI

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de Imagens CBERS.** Disponível em http://www.cbears.inpe.br/pt/index_pt.htm, acessado em março de 2008.

IPIUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. **Base Cartográfica 1979**, Florianópolis, SC, 1979.

IPIUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. **Fotografias aéreas de 2004.** Esc. 1:8.000, Florianópolis, SC, 2004.

IPIUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. **Plano Diretor de Florianópolis – Zoneamento.** disponível no site <http://www.ipuf.sc.gov.br/viabilidade/>, acessado em abril de 2006.

KJERFVE, B., **Coastal Lagoons.** In: Kjerfve, B. (ed.) *Coastal Lagoon Processes*, Elsevier, pp. 1-8. 1994.

KJERFVE, B. e KNOPPERS, B. A., **Tidal choking in a coastal lagoons.** In: Parker, B. B. (ed.) *Tidal hydrodynamics*, John Wiley e sons, inc., pp. 169-181. 1991.

KLINGEBIEL, A., SIERRA DE LEDO, B. **Etude preliminaire des marées dans la Lagoa da Conceição, Île de Santa Catarina (Brésil).** In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). *O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 113-128. 1999.

KOEFENDER, F. **Análise Numérica da Influência Batimétrica no Padrão de Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC.** Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC. Florianópolis, SC. 2005.

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. **Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil.** Centro de Estudos do Mar – UFPR. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3077-3084, 2005.

LAHIMAR, Laboratório de Hidráulica Marítima: **Elaboração de esquema para instalação de marégrafo**. Documento elaborado por Henrique F. S Mário. Não publicado. 2007.

LEITÃO, P.M.C.F.L. **Integracao de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho**. Tese de Doutoramento Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2002.

LINO, J. F. L. **Análise Numérica da Influência de Forçantes Meteorológicas e Oceanográficas sobre a Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC. Florianópolis, SC. 2005.

LUIZ, E. L. **Tipos de solos do município de Florianópolis**. In: BASTOS, M. D. A. (coord) Atlas do município de Florianópolis. Florianópolis. IPUF, 2004.

MATHWORKS, **Documento Ajuda do MatLab**. The Mathworks Inc. 2000.

MARETEC- Marine and Environmental Technology Center. **Sistema de Modelação MOHID 2000**. Disponível em: <http://www.maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm>. Acesso agosto 2007a.

MARETEC- Marine and Environmental Technology Center- **MOHID description**. Disponível em www.mohid.com. Acesso agosto 2007b.

MARTINS, F., LEITÃO, P., SILVA, A., NEVES, R. **3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach**. Oceanologica Acta 24 (1), pp. 551-562. 2001.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2002.

MISHRA, S. K., JAIN, M. K., BHUNYA, P. K. e SINGH, V. P. **Field Applicability of the SCS-CN-Based Mishra–Singh General Model and its Variants**. Water Resources Management 19: 37–62. 2005

MISHRA, S. K., JAIN e SINGH, V. P. **Evaluation of the SCS-CN-Based Model Incorporating Antecedent Moisture**. Water Resources Management 18: 567 - 589. 2004

MISHRA, S. K., PANDEY, R. P. JAIN e SINGH, V. P. **A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN Procedure for long duration rainfall-runoff events**. Water Resources Management 22: 861 - 876. 2008.

MISHRA, S. K., SINGH, V. P., SANSALONE, J. J., ARAVAMUTHAN, A. **A Modified SCS-CN Method: Characterization and Testing**. Water Resources Management 17: 37 - 68. 2003.

MOCKUS, V. National Engineering Handbook – Hydrology - **Hydrologic Soil Groups SCS**, United States Department of Agriculture. 1972.

MUEHE, D., CARUSO Jr. "**Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina**". In: *Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 15-24. 1999.

NEVES, R. J. J. - **Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado**. *Ph. D. Thesis, Univ. Liège*. 1985.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2º Edição, Rio de Janeiro, IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 421pp.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook - Hydrology – **Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall**. SCS, United States Department of Agriculture, 2004a.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook - Hydrology – **Hydrological Soil-Cover Complex**. SCS, United States Department of Agriculture, 2004b.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook - Hydrology – **Hydrologic Soil Groups**. SCS, United States Department of Agriculture, 2007a.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook - Hydrology – **Hydrographs**. SCS, United States Department of Agriculture, 2007b.

ODEBRECHT, C., CARUSO Jr. "**Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**". In: *Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 35-61. 1999.

ODRESKI, L. F. **Comparação da evolução do uso e cobertura das terras da Lagoa da Conceição- Florianópolis, SC, entre os anos de 1998 e 2004**. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC. Florianópolis, SC. Defesa prevista fevereiro 2007.

PATIL, J. P., SARANGI, A., SINGH, A. K., AHMAD, T. **Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interface**. *Byosystem Engeneering*, 100, pp 137 – 146. 2008

PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B., LENTZ, S. **Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE**. *Computers and Geosciences*, 28, pp. 929-937. 2002.

PEREIRA, M. L. M. **Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC**. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

PONCE, V. M. e HAWKINS, R. H., **'Runoff curve number: Has it reached maturity?'** *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE 1(1), 11–19. 1996.

- PUGH, D. T., **Tides, surges and mean sea-level**, John Wiley & Sons, Ltd, Great Britain, 1987.
- ROCHA, C. B. M. **Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição – SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2007.
- SIERRA DE LEDO B., SORIANO-SERRA E. (eds) **O Ecossistema da Lagoa da Conceição**. NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA. Florianópolis, 1999a.
- SIERRA DE LEDO B., SORIANO-SERRA E. **Atributos e Processos Condicionantes da Hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil In: Sierra de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição**, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 89-100. 1999b.
- SOMMER, S. **Mapeamento temático do município de Florianópolis – Mapa de aptidão do agrícola das terras**. Síntese temática. Florianópolis: IPUF/IBGE. 1991.
- SOMMER, S., ROSATELLI, J. S. **Mapeamento temático do município de Florianópolis – Mapa de solos**. Síntese temática. Florianópolis: IPUF/IBGE. 1991.
- STEENHUIS, T. S., WINCHELL., M., ROSSING, J., ZOLLWEG, J. A., WALTER, M. F. **SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas**. Journal of irrigation and drainage engineering, May/June pp234 – 238. 1995
- TUCCI, C.E.M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª edição, Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2004. p. 243-252.
- VAZ, N., DIAS, J. M., LEITÃO, P. C., NOLASCO, R. **Application of the Mohid-2D model to a mesotidal temperate coastal lagoon**. Computer & Geosciences 33, pp. 1204-1209. 2007.
- VILELLA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- WEI, W. W. S. **Time series analysis – Univariate and multivariate methods**. California: Addison Wesley, 1994. 478 pp.