



## MODELO HÍBRIDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DO LINGUADO/SC

Edison Conde Perez dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Rio de Janeiro  
Outubro de 2016

MODELO HÍBRIDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DO  
LINGUADO/SC

Edison Conde Perez dos Santos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Carlos Alberto Nunes Cosenza, D.Sc.

---

Prof. Francisco Antônio de Moraes Accioli Dória, D.Sc.

---

Prof. Claudio Henrique dos Santos Grecco, D.Sc.

---

Prof. Ricardo Silva Kubrusly, D.Sc.

---

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2016

Santos, Edison Conde Perez dos

Modelo Híbrido de Transporte de Sedimentos no Canal do Linguado/SC/ Edison Conde Perez dos Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVI, 173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 154 - 162.

1. Modelo Híbrido. 2. Transporte de Sedimentos. 3. Lógica Fuzzy. I. Cosenza, Carlos Alberto Nunes II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

## Dedicatória

À minha Filha Luiza Pereira dos Santos e a minha Esposa Maira Maria Pereira Dantas, razões da minha vida, do meu pensar e do meu ser. Sem eles nenhum esforço teria sentido.

Aos meus pais Léa Conde Perez dos Santos e Edison Alves dos Santos que não pouparam esforços, mesmo nos tempos difíceis, para minha formação educacional, ética e moral.

## Agradecimentos

Tão grande quanto o esforço dependido durante a tese, foi o fato de escrever em apenas uma página os agradecimentos às pessoas que contribuíram para o propósito deste trabalho.

A Deus, por tudo que tenho e acontece em minha vida.

Início os agradecimentos a minha esposa Maira, por me incentivar e acompanhar em toda esta jornada, a nossa filha Luiza pela inspiração e carinho transmitidos.

Os agradecimentos aos meus pais, que sempre primaram por uma presença firme e marcante em minha vida, pela qual fico muito feliz por isso.

Tenho que agradecer ao Professor e sempre Amigo Carlos Cosenza, por acreditar no meu potencial e pelas constantes demonstrações de sabedoria e humildade.

Não posso deixar de agradecer aos colegas do *LabFuzzy*, da COPPE, pela importante presença que marcaram em minha vida.

Estendo meus agradecimentos aos meus companheiros do Instituto Militar de Engenharia, obrigado pela compreensão e apoio.

Meu mais profundo agradecimento a minha esposa, por estar o tempo todo ao meu lado, independente de do momento ser bom ou mau. E ainda, a minha Filha, fonte constante de motivação e inspiração.

*“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.”*

*(São Francisco de Assis)*

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

## MODELO HÍBRIDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DO LINGUADO/SC

Edison Conde Perez dos Santos

Outubro/ 2016

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Programa: Engenharia de Produção

Esta Tese avalia a integração de diversas técnicas relacionadas com inteligência artificial, visando obter sistemas mais robustos. Os sistemas inteligentes desenvolvidos na pesquisa aplicam-se diretamente a conhecimentos da área acadêmica, voltados aos resultados obtidos pelo relatório sobre o “diagnóstico de circulação de água no Canal do Linguado e na Baía de Babitonga – SC”. Para a solução do transporte de sedimentos, no Canal, foi construído um sistema inteligente, a partir da concepção de dois modelos híbridos. O trabalho teve início com a modelagem matemática hidrodinâmica, utilizando um modelo híbrido Neuro-Fuzzy (ANFIS), onde foi possível estudar o comportamento hidrodinâmico do Canal, e, por conseguinte, determinar sua vazão. Em seguida, foi construído um modelo Fuzzy-Genético, capaz de analisar o transporte de sedimentos no Canal, avaliando as possíveis consequências de diferentes formas de dragagens do Canal. Doravante, o trabalho verificou os diferentes efeitos da dragagem no equilíbrio do Canal do Linguado pelo modelo híbrido e pelo modelo do programa MIKE21<sup>®</sup>, que utiliza elementos finitos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## SEDIMENT TRANSPORT HYBRID MODEL IN CHANNEL LINGUADO/ SC

Edison Conde Perez dos Santos

October/ 2016

Advisor: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Department: Production Engineering

This thesis evaluates the integration of various techniques related to artificial intelligence, to obtain more robust systems. Intelligent systems developed in the research it is applied directly to knowledge of academic, applied to the results of the report on the "water circulation diagnosis in Linguado's Channel and Bay Babitonga - SC." For the solution of sediment transport in the Channel, an intelligent system was built, from the design of two hybrid models. The work began with the hydrodynamic mathematical modeling, using a hybrid model Neuro-Fuzzy (ANFIS), where it was possible to study the hydrodynamic behavior of the Canal, and therefore determine its flow. Then it built a Fuzzy-genetic model, able to analyze the sediment transport in the Channel, assessing the possible consequences of different ways of dredging the channel. Henceforth, the study found the different effects of dredging on the balance of Flounder Canal by the hybrid model and the model MIKE21<sup>®</sup> program, which uses finite element.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - APRESENTAÇÃO DO TEMA .....	1
1.2 – MOTIVAÇÃO .....	5
1.3 – OBJETIVOS .....	6
1.3.1 - Objetivo Geral .....	6
1.3.2 - Objetivos Específicos.....	6
1.4 – METODOLOGIA.....	7
1.5 – ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	8
1.6 – SISTEMA ESTUARINO DE BABITONGA.....	8
1.6.1 – LOCALIZAÇÃO E OCUPAÇÃO.....	8
1.6.2 – Hidrodinâmica .....	10
1.6.3 – Sistema Hidrográfico de Babitonga .....	11
1.6.4 – Clima no Estuário.....	12
1.6.5 – Flora e Fauna na Baía de Babitonga .....	14
1.6.6 – Geomorfologia e Relevô .....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 - CIRCULAÇÃO ESTUARINA .....	22
2.2 - MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	24
2.3 – FORÇANTE MARÉ.....	29
2.4 – FORÇANTE VENTO .....	30
2.5 – FORÇANTE BATIMETRIA .....	33
2.6 – FORÇANTE RUGOSIDADE.....	36
2.7 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	37
2.8 - LÓGICA FUZZY .....	43
2.8.1 - Representação Fuzzy de Conhecimento .....	45
2.8.2 – Modelos de Raciocínio Fuzzy.....	50
2.8.3 – O Modelo de Raciocínio Fuzzy Takagi-Sugeno-Kang (TSK).....	51
2.9 - REDES NEURO FUZZY (ANFIS).....	53
2.9.1 - Arquitetura e Construção das Redes ANFIS.....	56
2.9.2 - Treinamento de Rede ANFIS por Erros (Backpropagation/Feedforward).....	60
2.9.3 – Validação da Rede ANFIS.....	64
2.10 - ALGORITMOS GENÉTICOS .....	65
2.10.1 – Parâmetros Genéticos .....	67



2.10.2 – Programação Genética .....	69
2.10.3 – Estratégias de Evolução.....	72
3. DADOS EXPERIMENTAIS DE BABITONGA .....	76
3.1 – COLETA DE DADOS PARA O MODELO .....	77
3.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA MARÉ .....	78
3.3 – DADOS DE BATIMETRIA NA BAÍA DE BABITONGA .....	82
3.4 - VALORES DE RUGOSIDADE NA BAÍA DE BABITONGA .....	86
3.5 – CIRCULAÇÃO DOS VENTOS NA BAÍA DE BABITONGA.....	87
3.6 – SEDIMENTOS NO CANAL DO LINGUADO.....	94
3.7 - SÚMULA DOS DADOS.....	98
4 – MODELO PROPOSTO .....	101
4.1 – MODELO HIDRODINÂMICO HÍBRIDO .....	102
4.1.1 – VARIÁVEIS LINGUISTICAS FUZZY.....	103
4.1.2 – SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY DA HIDRODINÂMICA.....	107
4.1.3 – ARQUITETURA ANFIS DO MODELO .....	111
4.2 – MODELO DE TRANSPORTE HÍBRIDO .....	116
4.2.1 - REPRESENTAÇÃO FUZZY-GENÉTICA DO MODELO .....	117
4.2.2 – SISTEMA DE INFERÊNCIA DO TRANSPORTE .....	119
4.2.3 – PROGRAMAÇÃO GENÉTICA DO MODELO .....	124
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	126
5.1 – APRENDIZAGEM E VALIDAÇÃO DO MODELO ANFIS .....	127
5.2 – EVOLUÇÃO GENÉTICA DO MODELO DE TRANSPORTE .....	136
5.3 – COMPARAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO COM O MODELO ELEMENTOS FINITOS (MIKE21®).....	145
6 - CONCLUSÕES.....	150
6.1 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	152
6.2 - SUGESTÕES.....	153
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	155
8 – APENDICE .....	164

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Baía de Babitonga.....	9
Figura 1.2 - Escola Familiar do Mar de Babitonga/SC, onde os alunos aprendem a criar ostras.	16
Figura 1.3 - Projeto Caranguejo-Uçá na Baía de Babitonga, em São Francisco do Sul/SC. Coordenação do Prof. Dr. Marcelo Antonio Amaro Pinheiro (Laboratório CRUSTA – Grupo de Pesquisas de Biologia em Crustáceos).	17
Figura 1.4 - Mapa textural dos sedimentos do fundo de Babitonga.	19
Figura 2.1 - Esquema modelo águas rasas	26
Figura 2.2 - elemento de fluido para conservação da quantidade de movimento.	26
Figura 2.3 - Desenho esquemático de perfil vertical de velocidades gerado a partir da transferência de energia do vento para a coluna d'água adjacente. ( F.R. Martins1; R.A. Guarnieri e E.B. Pereira Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São José dos Campos, SP, Brasil)	32
Figura 2.4 - Espiral de Ekman. Perfil vertical de velocidades gerado a partir de imposição do vento no Hemisfério Norte.	33
Figura 2.5 - Desenho esquemático de uma perturbação na superfície livre do oceano(S).	35
Figura 2.6 - perfil típico de velocidade associado à componente barotrópica da força do gradiente de pressão(figura extraída do trabalho do Professor Paulo Cesar-UFRJ/Escola Politécnica).	36
Figura 2.7 - Esquema transporte de sedimentos águas rasas.	38
Figura 2.8 - Variáveis da equação 2.7 do transporte de sedimentos.	40
Figura 2.9 - Figura envolvida no transporte de sedimentos pelas forças de contato nos diferentes ambientes sedimentares (Adaptado de GRANT e MADSEN, 1986).	42
Figura 2.10 - Diagrama Hassi-Euler dos conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande” .	47
Figura 2.11 - Conjunto Fuzzy resultante da operação de complementação “não grande” .	47
Figura 2.12 - Arquitetura da rede ANFIS, modelo TSK (JANG, 1997).	59
Figura 2.13 - Representação esquemática do Algoritmo Genético. Fonte: <a href="http://www.algoritmosgeneticos.com.br">www.algoritmosgeneticos.com.br</a>	72
Figura 3.1 - Situação da área de estudo e a localização dos pontos de coleta dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos. Fonte: IME, 2003.	76
Figura 3.2 - Estação metereológica Davis utilizada na medição de parâmetros. Fonte: IME, 2003.....	78
Figura 3.4 - Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água na estação maregráfica M7.Fonte: IME, 2003.	80
Figura 3.3 - Correntógrafo Acústico, com sensor de pressão acoplado, utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficasM1, M2, M3, M4 e M6.Fonte: IME, 2003.....	79
Figura 3.5 - Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficas M5 e M8.Fonte: IME, 2003.	81
Figura 3.6 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M7 entre 02 jan e 03 fev 2003.....	81
Figura 3.7 - Preparação e instalação dos equipamentos. Fonte: IME, 2003.....	83
Figura 3.8 - Equipe navegando e executando a batimetria. Fonte: IME, 2003.....	83

Figura 3.9 - resultado de batimetria. Fonte: IME,2003.85	
Figura 3.10 - Componentes leste-oeste (ab) e norte-sul (cd) do vento para a #Nav e #PGr. Valores positivos das componentes indicam ventos provenientes de sul e oeste. Componentes de alta frequência e baixa frequência são denominados de AF e BF, respectivamente (TRUCCOLO, 2011). .....	88
Figura 3.11 - Séries temporais de a) componente Este e b) componente Norte medidos na estação meteorológica V2 (convenção vetorial).....	88
Figura 3.12 - Séries temporais de a) componente Este e b) componente Norte medidos na estação meteorológica V1 (convenção vetorial). Fonte: IME, 2003. ....	89
Figura 3.13 - Diagrama de dispersão das componentes Este e Norte dos vetores de vento medidos na estação meteorológica V1 (convenção vetorial). Fonte: IME, 2003. ....	90
Figura 3.14 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M1 entre 02 de janeiro e 03 de fevereiro de 2003. Fonte: IME, 2003. ....	91
Figura 3.15 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M2 entre 13 de dezembro de 2002 e 20 de janeiro de 2003. Fonte: IME, 2003.....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Localização das estações maregráficas ao longo da área de estudo. Fonte: IME, 2003.79

Quadro 3.2 - Resultados das análises estatísticas na Baía de Babitonga/SC.Fonte: TRUCCOLO,2008.87

Quadro 3.3 - Principais constantes harmônicas determinadas nas estações maregráficas M1, M2, M7 e M8 com suas amplitudes (cm), fases (graus), valor do Fator F e classificação da maré. Fonte: IME, 2003. Obs.: em todas as estações a classificação considerada foi: Semi-diurna com desigualdade diurna.93

## LISTA DE SIGLAS

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários  
CAP - Conselho de Autoridade Portuária  
CBD - Companhia Brasileira de Dragagem  
CEPSUL - Centro Especializado do ICMBio  
CEPEMAR - Serviços de Consultoria Em Meio Ambiente Ltda  
COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia  
DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação  
DNPN - Departamento Nacional de Portos e Navegação  
DNPRC - Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais  
DNPVN - Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis  
FEMAR - Fundação de Estudos do Mar  
ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade  
PND - Plano Nacional de Dragagem  
PORTOBRAS - Empresa de Portos do Brasil S.A.  
SEP - Secretaria de Portos da Presidência da República  
SisBAHIA- Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental  
UFF - Universidade Federal Fluminense  
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UFPR - Universidade Federal do Paraná  
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

## GLOSSÁRIO

Aanderaa -

Empresa de equipamentos e instrumentos na área de hidrodinâmica.

Adsorção -

Processo físico que consiste na fixação de íons ou moléculas, dissolvidos numa solução, na superfície de colóides que nela se encontram em suspensão ou dos sólidos que constituem um meio poroso, em contato com a solução.

Advecção -

Transporte de massa ou de calor, causado pelo movimento de um fluido num meio poroso (= convecção).

Advecção-Dispersão, equação

Equação que descreve matematicamente o transporte de solutos num meio poroso saturado.

Água marinha -

Água do mar que tenha invadido recentemente sedimentos costeiros.

Antropização -

Ação humana sobre o meio ambiente.

Bacia hidro geológica -

Área na qual as águas subterrâneas dum aquífero, ou de vários aquíferos sobrepostos ou adjacentes, se dirigem para uma mesma área de descarga.

Barotropia -

Característica pela qual a densidade do fluido só depende da pressão.

Bêntico -

Que vive junto ao fundo (bentos) de uma massa de água.

Biodegradação -

Conjunto de processos reativos que leva à degradação de compostos orgânicos, isto é, à sua transformação em substâncias progressivamente mais simples, terminando, eventualmente, na sua oxidação sob a forma de dióxido de carbono.

Carga hidráulica -

Expressão da energia potencial de um fluido, num ponto, expressa em unidades de comprimento [L]. O mesmo que nível piezométrico ou potencial hidráulico, embora alguns autores usem este último termo numa outra aceção.

Cenozóica -

Era geológica que se iniciou a 65 5 milhões de anos e se estende até a atualidade.

Colmatação -

Redução progressiva da permeabilidade devido à deposição de sólidos, aparição de lodos orgânicos criados por microrganismos ou às incrustações químicas.

Condições iniciais -

Conjunto de valores assumidos por uma variável de estado (potencial hidráulico, concentração, etc.) no domínio de um modelo, referidos a um tempo inicial.

Contaminação -

Introdução na água de uma substância indesejável ou modificação das suas propriedades devido à ação do homem. Quando a sua utilização se vê restringida para todos ou para alguns daqueles usos para que pudesse ser vir no seu estado normal diz-se poluição.

Hidrogeologia -

Parte da hidrologia que estuda a circulação, armazenamento e distribuição das águas terrestres na zona saturada das Formações geológicas, tendo em conta as suas propriedades físicas e químicas, interações com o meio físico e biológico e suas reações à ação do homem.

Hipsométrico -

Técnica de representação da elevação de um terreno através das cores.

Linha de corrente -

Linha tangente em todos os seus pontos ao vetor gradiente. Corresponde à trajetória descrita por uma partícula de água.

Lutáceos -

Rochas sedimentares.

Mapa hidro geológico -

Mapa onde se representam as características hidro geológicas de uma área.

Modelo matemático -

Modelo que utiliza métodos numéricos para obter uma aproximação do comportamento do aquífero sob certas condições.

Mesotérmico -

Tipo de clima.

Parâmetros hidro geológicos ou hidráulicos -

Parâmetros que caracterizam um aquífero, como a porosidade, a permeabilidade e o coeficiente de armazenamento.

Recursos hídricos

Volume de água de que se pode dispor numa dada região, durante um determinado período de tempo.

Regime laminar -

Regime de escoamento de um fluido em que as linhas de corrente seguem trajetórias paralelas.

Regime permanente -

Regime de escoamento em que não há variação temporal numa superfície piezométrica.

Regime turbulento -

Regime de escoamento que as linhas de corrente não são todas paralelas. Este tipo de escoamento dá-se para valores elevados do número de Reynolds (quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas).

Regime variável -

Regime de escoamento subterrâneo em que se observam variações do nível piezométrico em função do tempo.

Rio efluente -

Rio que recebe água das formações geológicas adjacentes.

Rio influente -

Rio que cede água às formações geológicas adjacentes.

Sistema aberto -

Sistema onde é permitida a entrada ou saída de um ou mais componentes.

Sistema aquífero -

Domínio espacial, limitado em superfície e em profundidade, no qual existe um ou vários aquíferos, relacionados ou não entre si, mas que constitui uma unidade prática para a investigação ou exploração.

Sistema fechado -

Sistema onde não é permitida a entrada ou saída de todos ou de alguns componentes.

Superfície equipotencial -

Lugar geométrico dos pontos com o mesmo potencial. Em grande parte dos casos as equipotenciais nos aquíferos são superfícies verticais, exceto nas proximidades de zonas de entrada ou saída de água.

Superfície piezométrica -

Lugar geométrico dos pontos com o mesmo nível piezométrico.

Unidade hidro geológica -

Designação que pode ser aplicada a um aquífero, sistema ou subsistema aquífero.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 - APRESENTAÇÃO DO TEMA

O desenvolvimento econômico observado no passado recente, especialmente após a chamada revolução industrial, tem produzido efeitos diretos sobre o ecossistema do planeta. Segundo Guimarães, “É voz corrente que a crescente industrialização verificada na sociedade moderna tem produzido ataques ao planeta terra, resultando em grandes impactos ao meio ambiente, em consequência do consumo predatório dos recursos naturais, com profundas repercussões sobre o equilíbrio dos diversos ecossistemas” (GUIMARÃES, 2013).

Esse comportamento histórico tem levado a uma necessidade de se discutir novas alternativas de exploração dos recursos naturais e, atualmente, se ouve, repetidamente, que o discurso de que o planeta terra tem sofrido grande impacto ambiental conseqüente do consumo predatório de seus recursos naturais, que a natureza tem sido violentamente agredida, de forma indiscriminada, com repercussão direta sobre o equilíbrio de diversos ecossistemas e sobre a necessidade de se repensar a questão.

Em consequência dessa conscientização a sociedade vem percebendo a necessidade em se buscar um perfeito relacionamento entre a exploração dos recursos naturais e a preservação do meio ambiente. A atividade produtiva exige que o homem tome decisões a cada novo empreendimento, uma nova consciência que o leva a buscar alternativas com o menor impacto possível no ecossistema. Essa é uma tendência importante de vez que a relação entre o ser humano e o meio ambiente se reflete em uma qualidade de vida elevada sem prejuízo da possibilidade de aproveitar os recursos naturais disponíveis da melhor forma possível (KLEMENS, 2012).

Além disso, a sociedade como um todo vem se conscientizando da necessidade de se rever a forma de captação dos recursos naturais e, pode-se observar, um movimento no sentido de cobrar dos governantes maiores cuidado no tratamento e na

proposição de medidas que possam mitigar os impactos diretos ou indiretos, gerados pela utilização dos recursos naturais e maior atenção na redução dos impactos ao meio ambiente consequentes da implantação de novos projetos.

Esse movimento tem se refletido no Brasil. Alguns economistas tendem a considerar as transformações recentes no País como neodesenvolvimentismo, devendo-se aqui citar, entre eles, Sicsú *et al.* (2007) que justifica esse termo através do fato de ser necessário distinguir o processo atual do observado nos anos cinquenta. O prefixo “novo” acrescenta qualidades (no sentido de “características”) ao desenvolvimentismo observado nos anos cinquenta, características estas definidas pela conjuntura histórica e pelos interesses político-econômicos vigentes (LISANDRA, 2012).

Esse processo de desenvolvimento tem impactos diretos e imediatos sobre o sistema econômico e, nesse particular, há que se distinguirem aqueles ambientes que podem receber impactos decorrentes dessas novas condições adversas. É nesse contexto que se propôs o estudo do complexo ambiental da Baía de Babitonga que abriga frações significativas dos ecossistemas associados ao bioma da mata Atlântica e a maior concentração de manguezais do Estado de Santa Catarina (cerca de 6.200 ha), representando um dos últimos remanescentes deste porte ao sul da América do Sul.

A Baía da Babitonga, região estuarina do litoral norte catarinense, devido as suas peculiaridades e expressividade ambiental, se destaca como área prioritária a ser integrada, de forma efetiva, ao processo de gestão da zona costeira catarinense. Isso pode ser justificado pela necessidade de que ali devam vir a serem implantadas medidas urgentes visando garantir a conservação de suas condições, sob pena de perda deste importante patrimônio ambiental e cultural, que pode ficar comprometido em função do avanço acelerado da ocupação desorganizada de seus espaços e da exploração predatória de seus recursos (RODRIGUES, 2000).

Na região de entorno da baía vivem, aproximadamente, 511.000 habitantes, distribuídos entre as cidades de Araquari, Balneário Barra do Sul, Garuva, Itapoá, Joinville e São Francisco do Sul destacando- se, entre essas, as duas últimas. Deve-se ressaltar que Araquari, abriga o maior parque industrial do estado, onde se concentram empresas dos segmentos: metal mecânico, têxtil, de fundição e de plásticos e a segunda, Balneário Barra do Sul, tem grande relevância socioeconômica pela presença do turismo e, principalmente, de atividades ligadas ao porto (IME, 2003).

É importante considerar que, para canais estuários, e também os portos, serem eficientes, existe a necessidade de se aumentar a profundidade e a largura do canal, tendo em vista mitigar o assoreamento natural e contínuo, melhorar a segurança da navegabilidade e garantir as condições ideais para a manutenção do equilíbrio ecológico da área.

Os problemas ambientais advindos da intervenção humana, tal como a construção do aterro da BR-280 que promoveu o fechamento do Canal do Linguado (na década de 30) e a interrupção hidrodinâmica estabelecida no interior da baía da Babitonga, foram responsáveis por alterações nos processos de sedimentação internos e externos a este sistema. Na localidade da Barra Lagoa, na baía da Babitonga, localidade situada no município de Balneário Barra do Sul, houve um incremento na taxa de deposição marginal após o fechamento do canal do Linguado, o que tem levado à expansão da área urbanizada sobre os sedimentos não consolidados e depositados recentemente (IME, 2003).

Considerando- se que os sedimentos nos corpos hídricos são importantes para o ser humano e o meio ambiente, pode- se admitir que um modelo capaz de prever o transporte de sedimentos é de grande importância para uma tomada de decisão capaz de gerar o efeito desejável, como por exemplo, uma dragagem neste corpo hídrico.

A questão da Gestão Ambiental da Baía de Babitonga, desta forma, deve ser considerada de extrema importância atualmente, considerando-se a relação direta no processo de mediação de interesses e conflitos entre atores sociais que agem sobre os meios físicos tanto o natural quanto o construído. Este processo de mediação define e redefine, continuamente, o modo como os diferentes atores sociais, através de suas práticas, alteram a qualidade do meio ambiente e como se distribuem nas sociedades os custos e os benefícios decorrentes das ações destes agentes (PRICE WATERHOUSE - GEOTÉCNICA, 1992).

A principal vantagem da modelagem matemática é a capacidade de realização de prognósticos através da simulação de cenários futuros, como a presença de estruturas ainda não construídas, ou a ocorrência de condições ambientais extremas. A modelagem hidrodinâmica também pode ser utilizada para a realização de diagnósticos, no caso de escassez de dados de monitoramento disponíveis. A modelagem hidrodinâmica é, também, um pré-requisito para a modelagem de transporte de sedimentos e para a modelagem de qualidade da água (VIEIRA, 2008).

A modelagem da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos, foi feita através de uma metodologia que pode ser aplicada a corpos d'água naturais ou artificiais, incluindo-se: Estuários; Baías; Lagos; Reservatórios; Rios; e Canais. A ótica inovadora da construção de um modelo desse tipo consiste, basicamente, na representação provável de escoamentos, ou seja, dos campos de velocidade e de nível.

A Baía de Babitonga, conta com uma grande variedade de rios e outros tipos de corpos d'água que facilitaram o processo hidrodinâmico no local. Nessa baía, o Canal do Linguado, representa um papel importante para o desenvolvimento da economia local e, atualmente, é um elemento fundamental para a circulação de águas na região.

A partir do cenário apresentado, foi concebido um modelo, baseado em Inteligência Artificial, para a região da Baía da Babitonga, a partir do qual se poderão

avaliar inúmeros impactos advindos da antropização dos ambientes adjacentes e da intensa urbanização dos municípios que circundam o complexo estuarino, bem como da alta concentração de parques fabris dos setores metalomecânico, que têm propiciado a depreciação e a alteração dos corpos aquosos da região.

O método de tratamento do problema aqui adotado considerou, entre outros fatores, a disponibilidade de novas técnicas que permitem analisar esse tipo de questão e oferecem um importante acervo de informações ao estudo metódico desse tipo de problema.

## 1.2 – MOTIVAÇÃO

O Brasil possui um território extenso com uma diversidade ambiental imensa. Nesse país um grande número de pessoas habita e vive em localidades que exploram riquezas naturais. Dessa forma, pode-se admitir que estudos do tipo proposto pudessem de alguma forma, ajudar no desenvolvimento de muitas comunidades.

Estudar uma maneira de garantir o aumento da renda das comunidades, e de melhorias nas condições de vida, com repercussão direta sobre a taxa de mortalidade e sobre aumento na expectativa de vida de seus habitantes, tem sido uma realidade no Brasil, além disso, a crescente concentração urbana e a industrialização que vem sendo observada no país sugerem a necessidade de serem desenvolvidas novas ferramentas capazes de permitir a avaliação dos impactos decorrentes dessa tendência.

Os processos descritos, como, por exemplo, a concentração da população nos centros urbanos, o que tem produzido, em algumas regiões, uma superpopulação dessas áreas e, ainda, impactos decorrentes da crescente utilização de insumos que, para ser viabilizada, são aspectos negativos do desenvolvimento ocorrido até então, o que permite acreditar na necessidade de implantação de novos processos que permitam minimizar os impactos diretos sobre o equilíbrio dos ecossistemas terrestres.

Portanto, o estudo de uma ferramenta nova, ligada a técnicas de Inteligência Artificial, capaz de permitir uma boa tomada de decisão, diante de um cenário tão complexo e visando causar o menor impacto nestes ecossistemas é algo da maior importância.

## 1.3 – OBJETIVOS

### 1.3.1 - Objetivo Geral

O presente estudo pretende gerar informações, que possam, por meio inovador, fornecer subsídios ao Gestor Ambiental e aos órgãos ligados ao modal marítimo através do desenvolvimento de um modelo híbrido de Inteligência Artificial (IA). Esse modelo é constituído por um híbrido (NEURO-FUZZY), que permita calcular a vazão do corpo hídrico e um modelo híbrido (FUZZY-GENÉTICO), para calcular o transporte de sedimentos num canal.

### 1.3.2 - Objetivos Específicos

O resultado obtido com a solução do problema permite, ainda, que seja feita uma Proposição de medidas efetivas na gestão compartilhada para a região da Baía da Babitonga, para a utilização sustentada de seus ecossistemas e recursos, envolvendo:

- Estimar a vazão no canal do Linguado/SC, através de um modelo híbrido (NEURO-FUZZY);
- Estimar o transporte de sedimentos no canal do Linguado/SC, utilizando um modelo híbrido (FUZZY-GENÉTICO);

- Comparar os resultados da vazão, obtidos no modelo híbrido, com os resultados experimentais e o modelo de elementos finitos MI/Holanda;
- Comparar os resultados do transporte de sedimentos, obtidos no modelo híbrido, com os resultados experimentais e o modelo de elementos finitos MI/Holanda; e
- Identificar os impactos hidrológicos, previstos pelo modelo híbrido, nas diferentes dragagens.

## 1.4 – METODOLOGIA

Para análise do assoreamento da região do Canal do Linguado em Santa Catarina, devido ao aporte de sedimentos provenientes da Baía de Babitonga foi adotada a metodologia descrita a seguir.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, onde foram levantados os dados de campo, de forma a se ter a maior quantidade e qualidade de informações, e ainda, parâmetros para o modelo.

Foi construído um modelo hidrodinâmico para a Baía de Babitonga/SC, utilizando, de forma inovadora, uma Rede Neuro-Fuzzy, programada no software “SOLVER<sup>®</sup>”, do DHI Group, para Excel<sup>®</sup>.

Com os resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica, foi realizada a modelagem do transporte de sedimentos, também de forma inovadora, a partir de um sistema inteligente Fuzzy-Genético, que também foi resolvido pelo software “SOLVER<sup>®</sup>”.

Dessa forma foi possível mensurar a influência dos sedimentos oriundos da Baía de Babitonga/SC, no assoreamento provocado no Canal do Linguado.

## 1.5 – ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está organizada inicialmente com esta Introdução, a Fundamentação Teórica, onde são abordados os temas relacionados no trabalho. Em seguida, serão apresentados os dados ambientais utilizados nos modelos da tese, ressaltando que os dados foram fornecidos pelo estudo realizado pelo Instituto Militar de Engenharia em cooperação da Universidade do Vale do Itajaí e outros órgãos.

O próximo capítulo, foi à construção dos modelos híbridos hidrodinâmico e transporte, neste capítulo são apresentadas as hipóteses do modelo para o canal do Linguado – SC. A seguir os resultados e discussões são apresentadas num capítulo onde a tese compara ainda o resultado obtido pelo modelo híbrido com os resultados fornecidos pelo modelo de elementos finitos, do programa MIKE21® *Flow Model*.

E finalmente, um capítulo contendo as conclusões, neste capítulo é sugerido inclusive perspectivas para trabalhos futuros sobre o tema. E outro capítulo com as referências utilizadas no trabalho.

## 1.6 – SISTEMA ESTUARINO DE BABITONGA

### 1.6.1 – LOCALIZAÇÃO E OCUPAÇÃO



A elaboração do estudo exigiu o levantamento, análise crítica e tabulação de diversas informações. Essas informações foram coletadas junto a fontes oficiais de informação para duas localidades: a praia da Enseada ( $26^{\circ}13'09''\text{S}$ ,  $48^{\circ}29'05''\text{W}$ ) e o porto de São Francisco do Sul ( $26^{\circ}14'05''\text{S}$ ,  $48^{\circ}38'02''\text{W}$ ). As informações relativas à praia da enseada foram geradas pela estação localizada na costa e, para a segunda localidade por uma estação distante 14 km à montante da barra da baía (Figura 1.1). Os dados consistem de constantes harmônicas de maré para os dois locais. As constantes harmônicas para o porto de São Francisco do Sul foram obtidas junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). As constantes harmônicas para a praia da Enseada foram obtidas aplicando-se o método harmônico descrito em Franco (1988), através de utilização do programa Pacmaré 9 Previsão e Análise de Maré do mesmo autor, sobre uma série de seis meses de monitoramento com frequência amostral de 0,5 hora, obtida a partir de um marégrafo de pressão Aanderaa (IME, 2003).

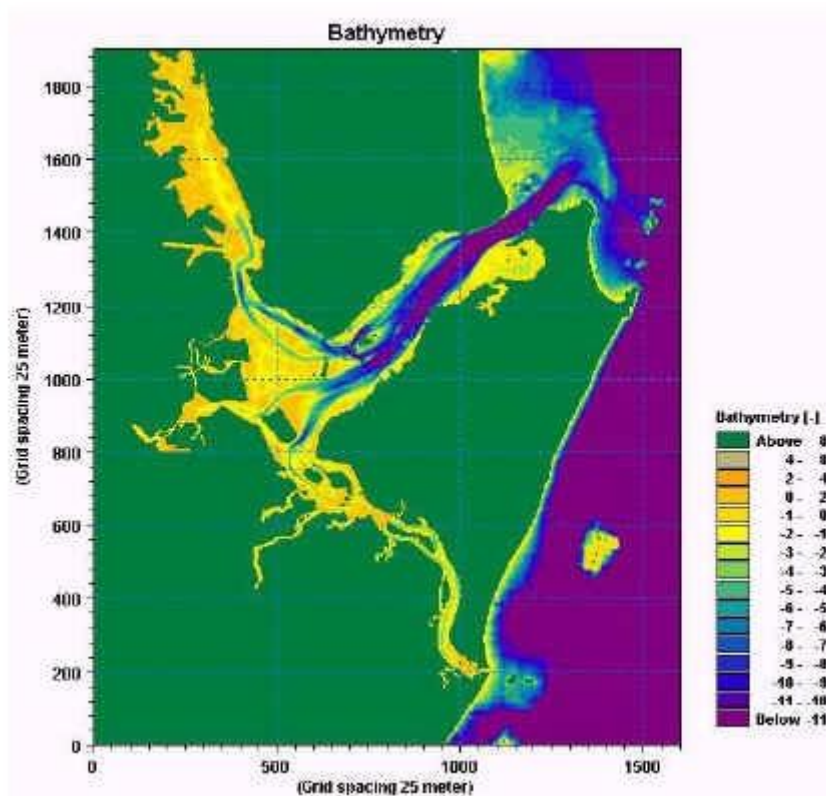


Figura 1.1 - Baía de Babitonga, Fonte: IME, 2003.

Considerando-se a relevância da Baía de Babitonga, não apenas pelo seu caráter econômico, em vista da importância das atividades produtivas ali desenvolvidas como geradoras de renda para famílias do local, bem como para outros segmentos indiretamente relacionados a essas atividades, onde se pode destacar um contingente de, aproximadamente, 1.632 pescadores artesanais.

Deve-se, ainda, observar que a baía exerce influência em relação a outros aspectos como, por exemplo, o cultural e histórico, em consequência do papel que a pesca catarinense exerce no contexto nacional. Estas questões, dentre outras, foram fatores considerados como relevantes para a definição da presente pesquisa, especialmente quando se admite que a partir dela possa ser feita a proposição de ações integradas, de forma participativa, no processo de gestão dos recursos ambientais existentes na Baía (RODRIGUES, 2000).

Historicamente, o local tem sido habitado por comunidades pesqueiras e sua ocupação vem ocorrendo desde a época da colonização europeia, em meados do século XVII. Atualmente essa ocupação se concentra em cinco municípios localizados no entorno da Baía da Babitonga, sendo que o de São Francisco do Sul concentra a maior parte dessas comunidades envolvendo um total de 22 (RODRIGUES *et al.*, 1998).

Ainda de acordo com o estudo citado no parágrafo anterior, cerca de 1.089 habitantes dessa região estão envolvidos diretamente com a pesca, utilizando uma frota composta por 493 embarcações, das quais 49% pertencem ao município de São Francisco do Sul. É importante destacar que cerca de 33% dessa frota não possui motor e 94% dessas embarcações é desprovida de cabine. Deve-se, ainda, citar que muitos pescadores não detêm os meios de produção e a grande maioria também se dedica à coleta natural não será coleta manual? de recursos disponíveis no manguezal, como atividade complementar de renda (caranguejo, ostras, berbigão, etc.).

#### 1.6.2 – Hidrodinâmica

A baía da Babitonga possui internamente, problemas de alteração dos canais preferenciais de circulação e de colmatagem, devido à crescente carga de sedimentos e poluentes domésticos e industriais carreados para o interior do complexo estuarino. Como grande parte da contaminação causada por compostos orgânicos e inorgânicos está associada aos sedimentos menores que 63  $\mu\text{m}$  (LAYBAUER & BIDONE, 2001), as partículas lamosas ricas em matéria orgânica são responsáveis pelo aporte e retenção de uma parcela significativa de poluentes.

Assim, o problema estudado possui características específicas relativas a circulação dos ventos, a rugosidade, a maré e a batimetria. Isto implicou na necessidade de uma compreensão simplificada na solução do problema. Por isso, para que o estudo seja aplicado em outros ambientes hidrológicos, as particularidades decorrentes nos processos da baía de Babitonga aqui consideradas, devem ser aprofundadas, em cada caso, a fim de permitir o uso do modelo do transporte e da hidrodinâmica em outros ambientes costeiros e marinhos, principalmente em baías e em complexos estuarinos, ainda pouco entendidos.

O levantamento e a análise de dados ambientais da área da Baía da Babitonga e do Canal do Linguado foram feitas sob a coordenação do Grupo de Pesquisa em Hidráulica do Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção do IME, em colaboração com o DHI - *Danish Hydraulic Institute*, o INPH - Instituto de Pesquisas Hidroviárias, e a UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí - SC. Esse levantamento serviu de base para um estudo que incluiu a análise das consequências ambientais de eventual reabertura do canal, e a previsão das obras necessárias e recomendadas para tanto, tendo observado a necessidade da manutenção do tráfego entre a Ilha de São Francisco e o continente. (IME, 2003).

#### 1.6.3 – Sistema Hidrográfico de Babitonga

A Baía da Babitonga recebe contribuições das bacias hidrográficas dos rios Palmital, Cachoeira, Cubatão e Parati (FUNDEMA, *no prelo*). A altitude, a estrutura geológica, a proximidade e a localização, paralela à costa da Serra do Mar, condicionam a caracterização da expressiva malha hídrica da região.

A rede hidrográfica que se origina na vertente atlântica da Serra do Mar, exhibe perfil acidentado no curso superior, com inúmeras cachoeiras, enquanto que no curso inferior, os rios meandram através da planície (SCHETTINI, 1999).

De acordo com informações concedidas pela FATMA (Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina), os rios que deságuam no interior da Baía banham o grande polo urbano-industrial de Joinville, além de extensas áreas agrícolas da região, sendo responsáveis pelo transporte de volumes consideráveis de efluentes industriais e domésticos, não tratados, para o seu interior.

#### 1.6.4 – Clima no Estuário

As relações entre os animais e os sedimentos em ambientes costeiros foram intensamente discutidas durante a segunda metade do século passado (SNELGROVE e BUTMAN, 1994). A distribuição espacial da fauna bêntica de praias, do entre marés ao sublitoral, é particularmente sensível a mudanças naturais e induzidas nos sedimentos.

A ocorrência das espécies depende, entre outros fatores, da exposição da praia e do conteúdo de água nos sedimentos. Marés e tempestades podem alterar a zonação no entre marés, enquanto correntes dirigidas por ondas dominam a zona sublitoral, onde barreiras e bancos migram em resposta às mudanças na condição das ondas (BROWN e McLACHLAN, 1990).

O nível do mar também pode oscilar devido a efeitos induzidos por processos meteorológicos. Estas oscilações, quando simultâneas às marés de sizígia, *i.e.*, as marés mais acentuadas porque a Lua e o Sol exercem sua atração em uma mesma linha. Podendo acarretar níveis extraordinários, muito acima dos níveis possíveis, devido somente à maré astronômica. Assim sendo, o conhecimento da importância relativa da maré astronômica e seu comportamento em ambientes aquáticos costeiros é uma informação essencial no gerenciamento apropriado desse fenômeno (TRUCCOLO, 1999) e para o presente estudo.

Durante muito tempo as abordagens e os métodos de estudo em praias oceânicas expostas e em praias de sistemas estuarinos foram bastante diferenciados. As relações entre os processos geomorfológicos da praia e a fauna recebiam grande ênfase em estudos com praias oceânicas (SHORT e HESP, 1999), enquanto as interações entre espécies eram o principal foco em praias de sistemas estuarinos (REISE, 1985). Entretanto, mais recentemente os efeitos da frequência e duração de tempestades, a ação das ondas, a amplitude das marés e os impactos das atividades humanas sobre a fauna, a morfologia da praia e as características dos sedimentos tem recebido uma atenção maior em praias estuarinas (JACKSON *et al.*, 2002).

Nestes ambientes, processos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos contribuem para uma maior complexidade dos sedimentos, determinando ambientes homogêneos ou formando distribuição agrupada de diferentes sedimentos numa pequena escala ambiental. Estudos estatísticos sobre as frequências da distribuição dos grãos seguindo, as tendências no tamanho desses grãos, grau de assimetria, curtose e as percentagens de granulo, areia, silte e argila podem auxiliar na indicação de mudanças instantâneas de pequena e grande escala em ambientes de fundo mole.

A região apresenta um clima mesotérmico úmido, com verão quente e sem estação seca. De acordo com o banco de dados meteorológicos da Gerência de Recursos Naturais Renováveis da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. (EPAGRI), no período entre 1939 e 1983, a região apresentou

temperatura média anual de 20,5° C e a precipitação média anual para a área foi de 1.700mm.

Dados atualizados, fornecidos pela Prefeitura Municipal de São Francisco do Sul (Administração 1997-2000 - Secretaria de Indústria, Comércio e Porto), informam uma elevação da temperatura média local, em torno de 4° C, passando à média anual aproximada para 24°C. A umidade relativa do ar é de 93% e o índice pluviométrico anual, não apresentou variação expressiva, se comparado aos dados pretéritos, permanecendo em torno de 1.600 mm (IME, 2003).

Embora situada abaixo do trópico de Capricórnio, a região da Baía da Babitonga apresenta características de áreas tropicais, com altos índices de precipitação, o que pode ser resultado de efeitos orográficos e às interações das massas de ar tropical atlântica e polar.

#### 1.6.5 – Flora e Fauna na Baía de Babitonga

A flora e a fauna na Baía de Babitonga são extremamente ricas e, em consequência dessa riqueza, uma série de atividades é realizada pela população local. Dentre estas atividades, em vista de sua relação com o presente trabalho, pode-se destacar a pesca artesanal. Esse tipo de pesca é realizado em toda a extensão costeira do estado de Santa Catarina, principalmente nas baías, lagoas e estuários, beneficiando direta ou indiretamente 150 mil pessoas. Na Baía existem, além das comunidades de S. Francisco do Sul, outras, de localidades adjacentes, totalizando 33 comunidades ligadas a essa atividade, que agregam 1.089 pescadores (RODRIGUES *et al.*, 1998).

A pesca artesanal é a principal atividade realizada pela população local, para fins de subsistência ou comerciais. Além da pesca e exploração dos recursos da mata atlântica, como a caça, extração de palmito, e de outros vegetais, incluindo-se madeira,

e a agricultura, embora esta em menor escala, além de, na região da Vila da Glória, a produção de farinha onde existem, aproximadamente, dez engenhos ativos (PINHEIRO et al., 2003).

O modelo de pesca prevalecente na região pode ser caracterizado como do tipo oportunista, uma vez que as saídas dos pescadores para o mar sempre dependem das condições do tempo e de maré. A pescaria é regida por um calendário que coincide com a abundância de determinadas espécies de peixes. O mercado também é importante. Na "safra" do camarão, por exemplo, o valor deste cai, desestimulando sua captura enquanto na entressafra, seu preço sobe, mas, como a captura desse pescado é difícil, apenas alguns pescadores se dedicam à essa pesca enquanto outros se dedicam a outros afazeres como, por exemplo, confecção de redes. Essa estratégia é diferente para os camaroeiros, que vão pescar em alto-mar ou, a alguns poucos que, ajudados pelo aumento do preço, continuam pescando na baía, embora com pouco resultado (PINHEIRO et al., 2003).

Quanto à flora pode-se destacar, os Bosques de manguezais, que circundam em grande parte a Baía da Babitonga, principalmente ao longo do rio Palmital, cobrindo uma área aproximada de 6.200 ha. (RODRIGUES, *et al.*, 1998).



Figura 1.2 - Escola Familiar do Mar de Babitonga/SC, onde os alunos aprendem a criar ostras. Fonte: OLIVEIRA, F., 2006.

O manguezal da Baía da Babitonga, com respeito aos aspectos estruturais de seus bosques, apresenta quatro (04) áreas distintas: Linguado, Palmital, Joinville e Ilha do Mel. A distinção dessas áreas é feita a partir da consideração de aspectos que envolvem a presença e predominância de espécies típicas de manguezal como a (*Rhizophora mangle* L., *Avicennia schaueriana* STAPF & LEECHMAN (Foto 04) e a *Laguncularia racemosa* GAERTN. F.), bem como a ocorrência de *Acrosticum aureum*, do *Hibiscus pernambucensis* L. e da *Spartina alterniflora* LOISELEUR em bancos de maré. Merece ainda referência a quantificação feita a partir de informações de área basal, de bosques bem desenvolvidos, apresentando certa uniformidade em sua altura média, que, de forma geral, não ultrapassa 15 metros (RODRIGUES *et alii.*, 1998).

No ecossistema da Baía em estudo é encontrado, entre outros mariscos, o Caranguejo-Uçá, destacado como um dos elementos mais importantes para o sistema local. Desde 1998, o Centro de Pesquisa e Gestão de Recursos Pesqueiros do Litoral Sudeste e Sul (CEPSUL/ICMBio), integrante do recém-criado Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, vem atuando na região. Sua presença tem se mostrado importante nas reuniões do Grupo Gestor, que é constituído por representantes do poder público, da academia e do setor produtivo. Esse Grupo, através de suas



atividades específicas, propõe medidas para gestão compartilhada dos recursos naturais, através de gestão compartilhada.



**Figura 1.3 - Projeto Caranguejo-Uçá na Baía de Babitonga, em São Francisco do Sul/SC. Coordenação do Prof. Dr. Marcelo Antonio Amaro Pinheiro (Laboratório CRUSTA – Grupo de Pesquisas de Biologia em Crustáceos).**

Pode-se citar, como resultado dessa participação na gestão, a elaboração de estudos, visando analisar aspectos da biologia do caranguejo-uçá, principalmente aqueles relativos à delimitação da época reprodutiva (dinâmica gonadal e de fêmeas ovíferas na população), cópula (repleção da espermateca e fenômeno da “andada”), bem como da avaliação a sua densidade populacional e a estimativa do estoque deste recurso nos manguezais da Baía da Babitonga (WUNDERLICH et al., 2008).

#### 1.6.6 – Geomorfologia e Relevô

As informações sobre estrutura morfológica predominante da região e da planície costeira, cujo limite continental encontra-se localizado no município de Itapoá e se estende até o fundo da Baía da Babitonga, foram obtidos a partir dos estudos elaborados por Barreto da Silva(1985), bem como os dados hipsométricos da planície costeira, envolvendo áreas que demarcam altitudes em torno de 10 m, sendo que, em

alguns terraços interiores nas encostas das montanhas e serras, ocorrem altitudes de 30 m (GAPLAN/SC, 1986).

De acordo com o mapa geomorfológico do Atlas de Santa Catarina, a oeste, essa região é limitada na parte setentrional pela unidade geomorfológica da Serra do Mar, que se estende por 1.193 km, o que representa, aproximadamente, 1,24% da área total do estado catarinense. Devendo-se observar que, ao norte do município de Aruva, os picos chegam a altitude de 1.500 m, (RODRIGUES, 2000).

Logo, os sedimentos do solo são do tipo podzólico combinado com areias quartzosas, possui baixa aptidão agrícola. Segundo o autor do estudo citado no parágrafo anterior, a formação geológica da planície é recente, datada do período quaternário da era Cenozóica. Os depósitos sedimentares são do tipo marinho, compostos, principalmente, por areias quartzosas e, em menor proporção, siltes e argilas, sendo uma formação propícia ao aparecimento de sambaquis.

A espacialização das características texturais dos sedimentos de fundo da baía da Babitonga (Figura 4) demonstra que os sedimentos presentes no complexo estuarino dividem-se em duas classes com características de posicionais distintas. Têm-se, assim, sedimentos mais grossos, classificados como areias, e mais finos, classificados como lamas (silte + argila), o que permite identificar ambientes distintos de sedimentação relacionados, principalmente, com a profundidade e com os padrões de circulação estabelecidos no interior do estuário (VIEIRA, 2008).

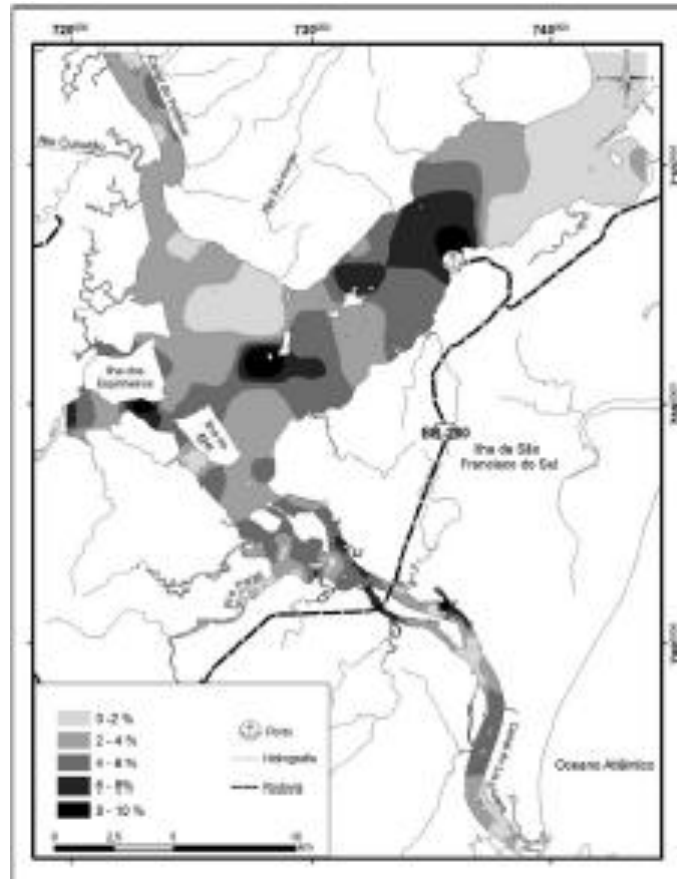


Figura 1.4 - Mapa textural dos sedimentos do fundo de Babitonga. Fonte: VIEIRA, 2008.

Os sedimentos compostos por areias (mais de 75% desta fração granulométrica em massa) representam 37 % das amostras obtidas para o estudo. As areias estão associadas às áreas de maior profundidade, e a maior granulometria pode estar associada a áreas de maior hidrodinâmica e/ou proximidade de fontes de material clástico do complexo estuarino. Nas duas conexões que a baía possui com o Oceano Atlântico, ocorre o visível predomínio da classe arenosa, assim como nas proximidades do conjunto de ilhas rochosas, no setor central da baía.

As classes constituídas por areia com lama ou lama com areia (25 a 75% de finos lutáceos) encontram-se, predominantemente, em áreas transacionais entre os locais com sedimentos mais finos (lamas) e os mais grossos (areia), revelando uma pequena variação de sedimentação no interior do estuário. A soma destas classes texturais compreende 36 % dos pontos de coleta (VIEIRA, 2008).

Os sedimentos classificados como lama (no máximo 25 % de areia), localizam-se principalmente próximo às desembocaduras fluviais, com maior representatividade espacial no extremo oeste da área de estudo, nas proximidades das ilhas dos Espinheiros e do Mel, no canal central nas proximidades do porto de São Francisco do Sul e no setor norte do canal do Linguado.

As amostras pertencentes a esta classe representam 24 % das amostras coletadas, sendo que a porcentagem de silte e argila variam de 77 % a 100 %. A deposição de sedimentos mais finos próximos ao porto de São Francisco do Sul pode estar relacionada com o aporte de sedimentos em suspensão através dos canais de marés, denominados “*gamboas*”, que deságuam nas imediações do porto e que, ao decantarem em períodos de estufa de maré, ficam aprisionados nas áreas mais profundas, submetidas à menor intensidade de correntes (VIEIRA, 2008).

No Canal do Palmital, ocorre uma maior homogeneidade quanto às classes texturais, que variam de areia com lama e, subordinadamente, areia. Mais ao sul, no Canal do Linguado, ocorre forte ruptura na distribuição das classes sedimentares, com diferenciação granulométrica entre os dois segmentos do canal, a norte e a sul do aterro da rodovia BR-280. No setor localizado a norte, predominam os sedimentos mais lamosos, enquanto que ao sul os sedimentos variam entre areia e lama.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estudos de pesquisa partem, de forma geral, da hipótese de que todo problema físico possa ser descrito, ainda que de forma simplificada, através de equações matemáticas. Quando estas equações não possuem solução analítica, uma das alternativas para a solução do problema é o uso de métodos numéricos e um modelo numérico é a representação desse problema, através de equações matemáticas governantes em um determinado sistema que possa descrever, adequadamente, o comportamento do mesmo.

Desta forma, com o objetivo de descrever uma questão em uma forma passível de ser solucionada com o auxílio de um sistema. Assim, algumas vezes, podem ser utilizados diferentes meios e tecnologias para a solução de um problema específico. Em consequência, pode-se acreditar ser interessante e conveniente o esclarecimento de alguns pontos. (REZENDE, 2005).

Primeiramente, deve-se observar que o dado a ser utilizado na proposição de um problema deve ser um elemento puro, quantificável, sobre um determinado tipo de atributo relacionado ao conhecimento que o analista tem do problema. Em seguida deve-se considerar o que significa uma informação para a solução do problema. O especialista considera informação como o resultado de um dado que foi analisado criticado e contextualizado, de vez que as análises são sempre feitas a partir do estabelecimento de um contexto, enquanto que o conhecimento representa a base para a formulação do modelo.

O processo de gerar conhecimento envolve uma situação na qual uma informação é comparada com outra e combinada com ligações úteis e consistentes com o sistema considerado. Isso revela, que o conhecimento é dependente de nossos valores

e de nossa experiência, estando sujeita a leis previamente definidas. Modernamente a ciência tem se valido de novas técnicas para demonstração de determinadas teses, podendo-se aqui destacar o emprego de técnicas do tipo Inteligência Artificial. Nesse contexto, através da aplicação da Inteligência Artificial podem-se criar modelos, baseados em sistemas biológicos, capazes de apreender e prever resultados, dentro de um conhecimento especializado, que apresentaremos, de forma sucinta, a seguir (REZENDE, 2005).

Nesse contexto os modelos baseados em lógica Fuzzy vêm ganhando impulso significativo, podendo-se citar trabalho de Cosenza *et al*, publicado em 1989. Um vasto campo de aplicação, nos mais diversos campos do conhecimento humano, é encontrado em consequência de dificuldades e limitações ao se lidar com problemas envolvendo a incerteza e a vagueza (YAGER, 1994). Essa dificuldade, por vezes torna quase impossível extrair o conhecimento e expressar o fenômeno a ser modelado através do emprego de técnicas clássicas e limitações computacionais (ANGELOV et al., 2003)

Alguns modelos baseados em regras da lógica Fuzzy, na área de Engenharia Civil, foram construídos e conseguiram representar um processo complexo, por vezes ambíguo, baseados em avaliação subjetiva (A.GEYER-SHULZ, 1995). Essas aplicações estimularam a busca de novos métodos de extração de regras, ajuste de função pertinência e formação de modelos baseados em regras Fuzzy para representar dados específicos usando Algoritmo Genético (GA) (ANGELOV, 1997 & de OLIVEIRA, 1999).

## 2.1 - CIRCULAÇÃO ESTUARINA

Um estuário pode ser definido de diversas maneiras, dependendo do ponto de vista empregado no trabalho e até mesmo de seus autores. Alguns conceitos de estuários são conflitantes quanto a sua definição física, geológica, biológica, e até mesmo

política. Levando em consideração a natureza deste trabalho, foi aqui adotado o conceito de estuário definido por Pritchard (1955) e adaptado por Dyer (1973).

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.*

O ambiente estuarino sofre diretamente com processos naturais e intervenções humanas. As águas, que circulam têm relação com a diferença de densidade, e principalmente, com o movimento das marés dentro do estuário e a morfologia local, gerando gradientes de pressão dos tipos barotrópico e baroclínico, que irão atuar no deslocamento e mistura das massas d'água costeira e fluvial (GRACEA et al., 2008).

O gradiente de pressão barotrópica é gerado pelas variações periódicas do nível do mar associadas às marés e à descarga fluvial. No Brasil a maré é a principal força envolvida na circulação barotrópica, e provoca oscilações semidiurnas, principalmente, na costa brasileira, enquanto a descarga fluvial gera gradientes de pressão no sentido continente-mar, e é regulada, principalmente, pelos ciclos sazonais de pluviosidade. O gradiente de pressão baroclínico é gerado pela diferença longitudinal e/ou lateral de densidade, associada à diluição da água salgada estuário adentro (KJERVE, 1989).

Para os estudos de oceanografia física, deve-se considerar uma importante aproximação na montagem do sistema de equações físico-matemáticas governantes. Nesse sentido deve-se admitir que a água do mar pudesse ser considerada como um fluido incompressível. Na verdade a compressibilidade da água do mar é muito baixa e a inclusão de tal característica física, aumentaria significativamente a complexidade da solução do sistema de equações governantes. Dessa forma, para a maioria dos estudos de oceanografia física dinâmica, a água é considerada um fluido incompressível.

Para se obter a equação matemática que represente essa característica física, deve-se partir da equação de conservação de massa. Essa equação pode ser deduzida a partir do balanço de massa no interior de um elemento de volume estacionário através do qual um fluido escoar, considerando ainda o efeito dos ventos, que, para uma Baía, deve ser pequeno e o atrito com o fundo do estuário. Para essa formulação será considerado então, que no interior do fluido a massa deve permanecer constante no tempo e no espaço (IME, 2003).

## 2.2 - MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Uma ferramenta muito utilizada atualmente para o estudo da hidrodinâmica estuarina e de outros ambientes, é a modelagem matemática. A utilização desta ferramenta em simulações hidrodinâmicas vem sendo possibilitada devido ao aumento do desenvolvimento tecnológico dos computadores, somado ao conhecimento da ciência envolvida nos processos hidrodinâmicos.

A modelagem numérica tem sido empregada em trabalhos de monitoramento da qualidade de água, de entendimento de processos dispersivos, em planejamento de ações para acidentes com óleo, e em estudos das variações geométricas de canais de navegação portuária, de baías e de estuários como um todo.

O crescimento do uso da modelagem numérica em ambientes estuarinos levou a um rápido desenvolvimento em áreas de pesquisa relacionadas à (HARRIS *et al.* 2004) podendo-se destacar:

- Mecânica dos fluídos e hidráulica; *i.e.* Modelagem de turbulência;



- Transporte de sedimento e processos de poluição; i.e. Dinâmica de sedimentos coesivos e não coesivos;
- Aspectos ecológicos, biológicos e químicos; i.e. Traçadores ambientais como metais traço e contaminantes orgânicos;
- Modelagem de descontinuidade; i.e. Gradientes de alta densidade em saídas de emissários;
- Aquisição e interpretação de dados de campo e dados experimentais.

A mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento é governada pelas equações de *Navier-Stokes*. Deve-se citar, ainda, sua aplicação em estudos de advecção-dispersão. A partir disto, pode-se admitir a aplicação de um modelo bidimensional construído a partir do conceito de rede Neuro-Fuzzy, o que justifica a aplicação, neste estudo de um modelo, cabendo citar que essa formulação tem grande aplicação na investigação de problemas ambientais, relacionados com a determinação do tempo de residência da água em canais, como é o presente caso, e, ainda, de possíveis fontes de poluição acidentais.

As equações de *Navier-Stokes* podem ser resolvidas para o caso específico chamado de Equação de Águas Rasas (*Shall Waters*) e para estudos sobre os movimentos de ondas e a circulação de fluidos, cuja dimensão horizontal é muito maior que a profundidade. Os Oceanos, os grandes Lagos e as Baías são os exemplos mais comuns de aplicação dessas equações (BRATT et al., 2010).

O trabalho acima citado demonstra que os fenômenos naturais podem ser previstos, monitorados ou estudados através de modelos de águas rasas -AR-. Para a situação estudada, a rotação da Terra não será considerada no problema, e por isso não teremos o termo correspondente à força de *Coriolis* ( $\Omega$ ). Esta força fictícia age perpendicular ao movimento, sendo a grande responsável pelos vórtices de grande dimensão, como apresentado abaixo para um modelo de águas rasas.

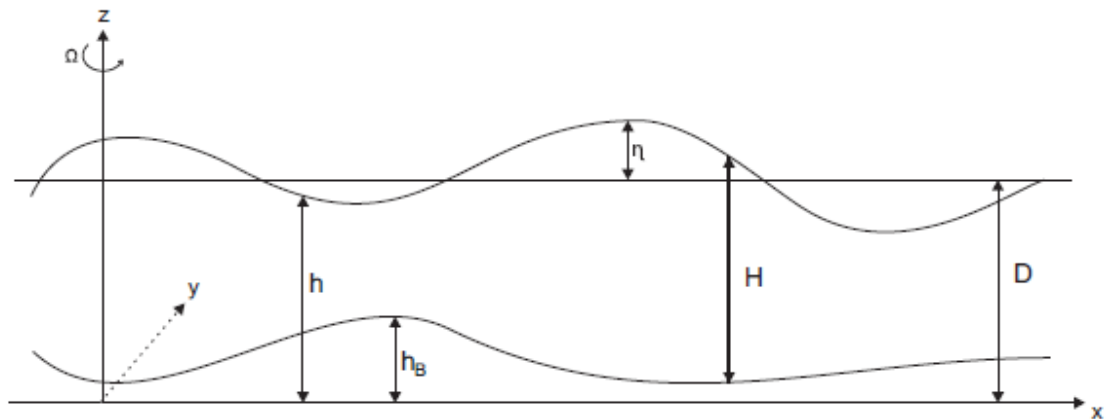


Figura 2.1 - Esquema modelo águas rasas

Sabe-se que a Conservação de massa pode ser representada pela relação 2.1(BRATT et al., 2010):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho(\vec{u})) = 0 \quad (2.1)$$

E a equação da continuidade ou segunda lei de Newton é dada pela relação 2.2(BRATT et al., 2010):

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + (\lambda + \mu)\nabla \div (\vec{u}) + \mu\Delta\vec{u} \quad (2.2)$$

Para um elemento de fluido,

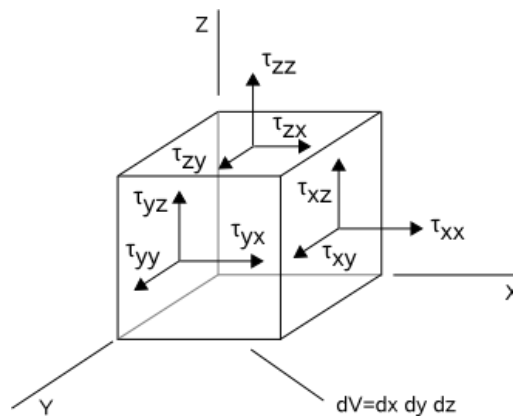


Figura 2.2 - Representação do elemento de fluido para conservação da quantidade de movimento. Fonte: VENNARD, 1978.

Com isso, a equação da Conservação da quantidade de movimento em "x" pode ser representada pela a relação 2.3, apresentada a seguir (DHI,2007):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{(p^2+q^2)}}{c^2h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

Onde:  $h(x,y,t)$  = profundidade;

$\zeta(x,y,t)$  = elevação da superfície;

$p(x,y,t)$  e  $q(x,y,t)$  = densidade do escoamento nas direções x e y;

$C(x,y)$  = coeficiente de Chezy;

$g$  = aceleração da gravidade;

$f(V)$  = fator de atrito do vento;

$V, V_x, V_y$  = velocidades do vento e de suas componentes nas direções x e y;

$\Omega(x,y)$  = parâmetro de *Coriolis*;

$p_a(x,y,t)$  = pressão atmosférica;

$\rho_w$  = massa específica da água;

x e y = coordenadas espaciais;

t = tempo; e

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componentes das tensões de cisalhamento.

As equações acima consideram que o somatório de todas as forças aplicadas no sistema será igual ao produto da massa pela aceleração. Dessa forma, para se descrever os movimentos hidrodinâmicos, ou seja, para descrever a variabilidade em duas dimensões (2DH) e temporal, do campo dinâmico, é necessário que sejam conhecidas às forças envolvidas no sistema e a massa do fluido (ASSAD et al., 2009).

Neste sentido, o escoamento de um fluido é o resultado da ação de forças de campo e de superfície ou contato, estão descritas na equação 2.3, na direção "x" e de forma análoga na direção "y". As forças criadas pela diferença de pressão e/ou da gravidade, onde a presença de termo relacionado com a pressão hidrostática na direção "x" (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície d'água na direção "x", associado ao forçante "Batimetria".

Além disso, o termo responsável pelas tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, esses termos são responsáveis por gerar os perfis de velocidade e transmitir o forçante "Vento" sobre a superfície livre para o escoamento. E ainda, representam a taxa de variação espacial do fluxo de quantidade de movimento na direção "x" por unidade de massa, associado aos forçantes "Maré" e "Rugosidade". O movimento do fluido é influenciado pela inércia do fluido e pelo efeito da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) exercida pelo fluido envolvente (ASSAD *et al.*, 2009).

O movimento do fluido pode ser definido como o caminho percorrido por esse fluido, composto por partículas individuais, ao longo de um período de tempo. Esse caminho é conhecido como trajetória e envolve a descrição desse deslocamento (posição a intervalos sucessivos de tempo) de uma partícula a partir da definição de uma determinada posição considerada como inicial. Pode-se admitir que a partir desse conceito se obtivesse uma imagem instantânea das posições de todas as partículas que tenham passado através de um ponto particular num dado momento.

Os atributos relativos à advecção-dispersão, do modelo bidimensional construído para o presente estudo, foram baseados numa rede Neuro- Fuzzy. O modelo usado pode ter aplicação na investigação de problemas ambientais, relacionados com a determinação do tempo de residência da água em canais, de forma geral, e foi considerado como adequado para o caso a Baía da Babitonga, ou de outras possíveis fontes de poluição acidentais

As parcelas das equações supracitadas, que agem conjuntamente no modelo, estão representadas aqui como “forçantes do modelo”. Os forçantes têm relação com as diferentes forças viscosas e com o campo, representadas no programa MIKE21<sup>®</sup>, do *WaterEnvironmentHealth* (DHI), em seu guia do usuário e pode ser encontrado, em detalhes, no sítio ([http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/document\\_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21\\_HD.pdf](http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21_HD.pdf)), na descrição do modelo de escoamento, módulo hidrodinâmico, publicado no ano de 2007.

## 2.3 – FORÇANTE MARÉ

O nível do mar costeiro está continuamente oscilando em resposta às forçantes astronômicas, atmosféricas e oceanográficas, em diferentes escalas de tempo e espaço (GILL, 1982; PUGH, 1987).

A maré astronômica é o movimento periódico de subida e descida do nível do mar que obedece à força do campo gravitacional no sistema Terra-Sol-Lua (Pugh, 1987). A onda de maré é uma onda longa e suas características são modificadas quando avança do oceano profundo para as plataformas continentais. Distorções da onda são notadas mais facilmente na sua propagação em regiões de pouca profundidade e com restrições laterais como em baías e estuários.

O espectro temporal destas flutuações varia de poucas horas até vários dias. Tais variações ocorrem principalmente em resposta ao forçante e sua origem astronômica, de natureza determinística, devido à ação do vento, maré e pressão atmosférica sobre o oceano, estas últimas de difícil previsão devido à natureza aleatória do fenômeno atmosférico (TRUCOLO, 1999).

A propagação da maré em estuários envolve um processo advectivo intenso, numa região de topografias muitas vezes complexas, cujas características são

importantes para obter as diferenças de fase entre a propagação da onda, a corrente de maré e a variação de salinidade (MIRANDA *et al.* 2002).

Quando uma onda de maré se propaga estuário adentro sofre distorções devido à diminuição da profundidade e do estreitamento dos canais, o que, seguindo o princípio de conservação de volume, tende a elevar a amplitude da maré. Esse atrito com o fundo e com as margens controla a energia da maré, e conseqüentemente, o seu alcance continente adentra (MASSELINK & HUGHES, 2003).

Um dos efeitos causados pela assimetria da maré nos estuários é a corrente de maré. Estas correntes podem ter fluxos dominantes de enchente ou de vazante, dependendo do gradiente horizontal do nível de água e da morfologia da região de escoamento. Em estuários com canais de maré profundos e grandes áreas intermareais há um predomínio de correntes de vazante mais intensa, enquanto estuários com canais rasos e pouca área intermareal tendem a gerar correntes de enchente mais intensas (DRONKERS, 1986).

Essas correntes, assim como as correntes residuais (que representam a velocidade média das correntes ao longo de um tempo, ou seja, ao longo de vários ciclos de maré), exercem um papel relevante no tempo de residência de materiais (nutrientes, sedimentos, Material Particulado em Suspensão- MPS) dentro do estuário, controlando a importação ou exportação dos mesmos no interior do corpo d'água (LE HIR *et al.* 2000).

## 2.4 – FORÇANTE VENTO

Sistemas de baixa pressão atmosférica em latitudes subtropicais, tais como os ciclones extratropicais, introduzem significativa variabilidade nos movimentos oceânicos em escalas temporais de dias a semanas. Estes sistemas meteorológicos são ditos sinóticos ou sub-sinóticos e influenciam diretamente o nível do mar e, por

consequência, o estuarino, gerando oscilações como as marés meteorológicas, ressacas, e inundações costeiras através da atuação de ventos norte-sul, ditos longitudinais à costa (ELLIOT, 1982; GEYER, 1997; SCULLY et al., 2005).

Considerando a orientação geral, aproximadamente de sudoeste-nordeste da linha de costa sul-sudeste brasileira, uma sobre-elevação do nível do mar está diretamente relacionada à atuação de ventos longitudinais à costa, do sul e que resultam em empilhamento de águas, transporte transversal em direção ao litoral e subsidência costeira.

O efeito oposto ocorre com ventos provenientes do norte, originando um abaixamento do nível do mar, transporte transversal para alto mar e ressurgência costeira. Ambos os processos são explicados pelo mecanismo de transporte transversal de *Ekman* (CASTRO et al., 1995). O movimento de água gerado ocorre numa grande região oceânica devido à abrangência da forçante atmosférica. A escala temporal dos movimentos marinhos é longa, de vários dias a semanas, ou, também denominados de baixa frequência, em função da duração da atuação dos ventos (TRUCCOLO, 2011).

A energia gerada pelo vento é transferida para a superfície do oceano através de uma força chamada tensão de cisalhamento do vento. Essa força causa o deslocamento das águas superficiais e das camadas subjacentes até uma determinada profundidade.

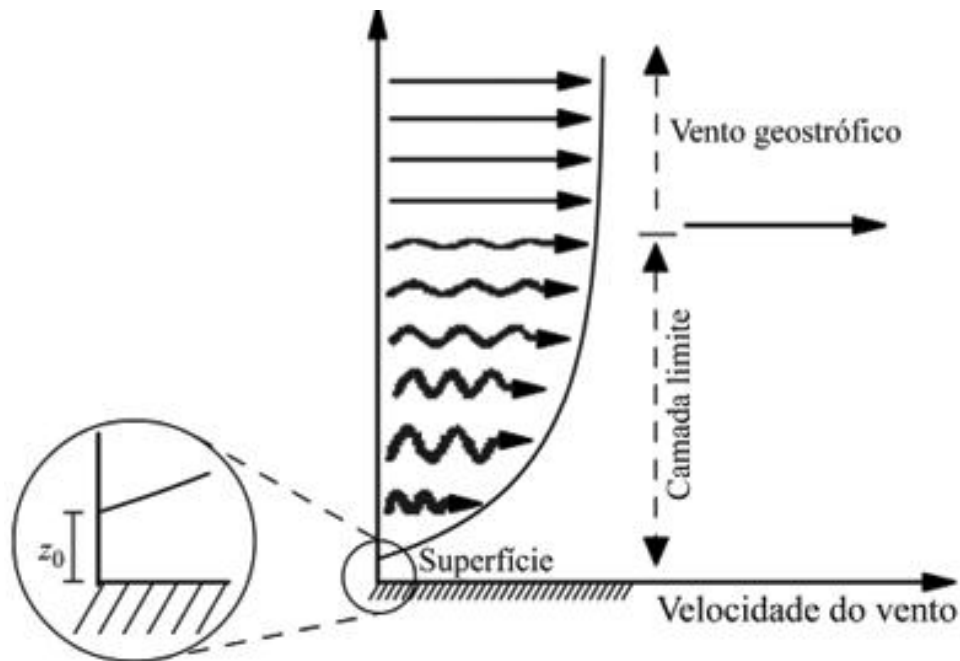


Figura 2.3 - Desenho esquemático de perfil vertical de velocidades gerado a partir da transferência de energia do vento para a coluna d'água adjacente. ( F.R. Martins1; R.A. Guarnieri e E.B. Pereira Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São José dos Campos, SP, Brasil)

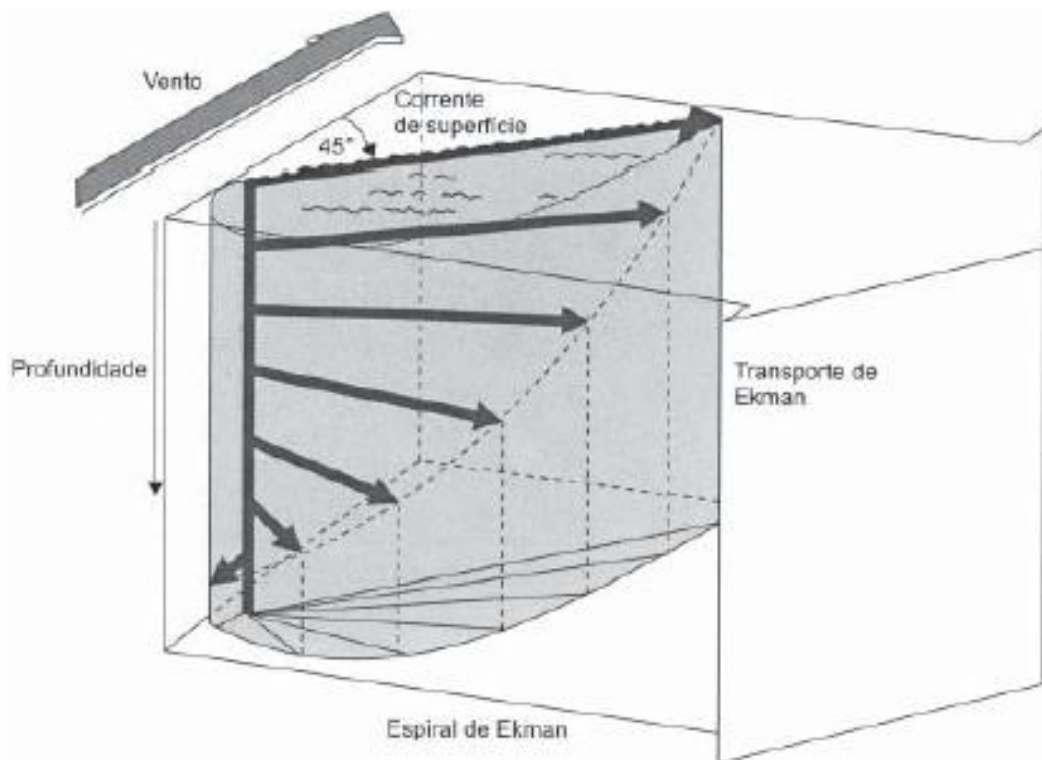
Deve-se observar que à medida que a profundidade aumenta, nota-se um aumento na deflexão da corrente em relação ao vento que a gerou seguido da diminuição de intensidade da mesma. Em se admitindo que seja possível traçar uma figura final, com os vetores de velocidade por faixa de profundidade pode-se obter um perfil de velocidades com forma próxima a uma espiral. Dessa forma, pode-se definir esse perfil vertical de velocidades gerado pelo vento como “Espiral de Ekman” (ASSAD *et al.*, 2009).

Dentro de um estuário, as ondas de maré podem se comportar de formas distintas dependendo das características topográficas do local e dos efeitos que estas sofrem devido ao atrito com os fundos e com as margens (DYER, 1973).

No caso de propagação em forma *progressiva*, as preamares e baixamares ocorrem em diferentes momentos, dado o tempo em que a “crista” ou a “cava” da onda leva em progredir de um local a outro dentro do estuário. Já no caso do comportamento



*estacionário*, o nível da água apresenta um comportamento mais uniforme com as preamares ou baixa-mares ocorrendo no mesmo instante em qualquer local do estuário.



**Figura 2.4 - Espiral de Ekman. Perfil vertical de velocidades gerado a partir de imposição do vento no Hemisfério Norte.**

Fonte: [http://oceanografiafisicaymas.blogspot.com.br/2011/10/corrientes-superficiales\\_22.html](http://oceanografiafisicaymas.blogspot.com.br/2011/10/corrientes-superficiales_22.html).

As características dos ventos na região e a coerência espaço-temporal entre elas foram estudadas a partir de análises estatísticas no domínio do tempo e frequência, tal como, análise de variância e análise espectral. A análise espectral permitiu caracterizar de forma mais detalhada a distribuição da variância no domínio da frequência, sendo então utilizada com este fim em todas as séries temporais observadas. Foi empregado o método de sobreposição e soma de Welch (WEI, 1994), que consiste em dividir o registro original em blocos, estimar o espectro para cada bloco, e, por fim, calcular a média dos resultados (TRUCCOLO, 2011).

## 2.5 – FORÇANTE BATIMETRIA

No modelo a força resultante de um diferencial de pressão esta computada através de sua relação com a batimetria. A força do gradiente de pressão (FGP) possui sentido contrário ao gradiente de pressão e, portanto, aponta sempre das regiões de maior pressão para as de menor pressão.

Essa componente está associada aos gradientes de pressão causados pela variação da pressão atmosférica na superfície livre do mar (efeito do barômetro invertido) e é muito pouco significativa quando comparada as demais componentes. Essa componente está associada aos gradientes de pressão causados pelas variações da superfície livre do mar em relação ao nível de repouso (ASSAD et al., 2009).

Essa componente está associada aos gradientes de pressão causados pelas variações horizontais de densidade ao longo da coluna d'água. Observa-se que, para um mesmo nível de interesse em dois diferentes pontos no espaço, há uma variação no campo de temperatura e conseqüentemente no campo de densidade, o que causará o surgimento de um diferencial de pressão, que pode ser estimado pela simples aplicação da fórmula da pressão hidrostática.

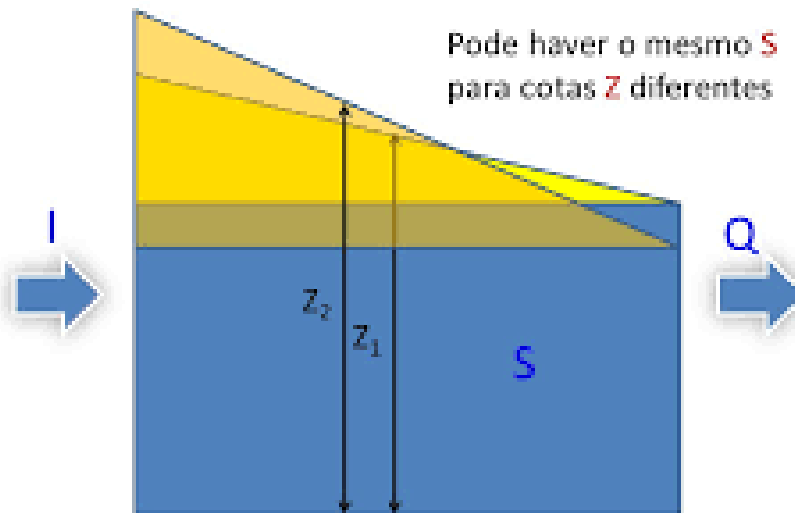


Figura 2.5 - Desenho esquemático de uma perturbação na superfície livre do oceano(S).

Na figura 2.3, apresentada acima,  $Z_2 > Z_1$  e  $P_2 > P_1$ . A seta indica o sentido do gradiente de pressão e sua relação com a batimetria. Essa figura foi extraída da apresentação dos professores Carlos Ruberto Fragoso Jr. e Marllus Gustavodas Neves, do curso de Modelagem e simulação hidrológica (<http://slideplayer.com.br/slide/3259907/>).

No modelo, as superfícies isopicnais, isto é, superfícies de mesma densidade, (mesma densidade) são paralelas às superfícies isobáricas, de mesma pressão. Tal fato assegura a ausência de variação de velocidade na vertical. O perfil de velocidades barotrópica é constante na vertical (ASSAD et al., 2009).

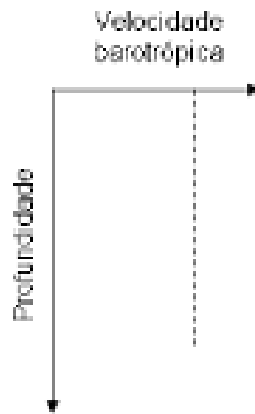


Figura 2.6 - perfil típico de velocidade associado à componente barotrópica da força do gradiente de pressão (figura extraída do trabalho do Professor Paulo Cesar-UFRJ/Escola Politécnica).

## 2.6 – FORÇANTE RUGOSIDADE

A rugosidade equivalente do fundo é um parâmetro importante da modelagem, dado que é responsável pelo cálculo das tensões de fundo e é o principal parâmetro ajustável responsável pela calibração das tensões turbulentas verticais do modelo. As tensões geradas pelo atrito de fundo devem ser conhecidas para que se possa estimar a variação do coeficiente de *Chézy*, que por sua vez depende do valor da rugosidade equivalente ( $\epsilon$ ) do fundo (BRANT, 2012).

Como a rugosidade depende do tipo de material que compõe o leito do corpo d'água, torna-se fundamental o conhecimento da distribuição de sedimentos no fundo, a fim de prescrever amplitudes de rugosidade equivalentes condizentes com a realidade. No projeto integrado elaborado pela CEPEMAR (Serviços de Consultoria em Meio Ambiente Ltda.), foram obtidas informações de várias campanhas de coleta de sedimentos e também diversos dados, do Relatório Final de pesquisa: Processos atuais de sedimentação marinha e praia do litoral de Vitória ES. Nov. 2001. UFES.

De acordo com ROSMAN *et al.*, (2008), o modelo hidrodinâmico admite especificação pontual da amplitude da rugosidade equivalente, em função do tipo de material de fundo para os casos de pedra, areia, lama, vegetação, etc. Essa estimativa

pode ser feita usando- se interpolação bi quadrática para valores de rugosidade equivalentes do fundo e permite resultados com boa precisão na representação física do leito.

A amplitude da rugosidade equivalente do fundo é um parâmetro básico de calibração. Se as amplitudes da rugosidade consideradas no modelo forem muito grandes e diferentes do real, as alturas de maré calculadas pelo modelo serão menores do que as observadas no campo. Por outro lado, se as amplitudes forem menores que as existentes, as alturas de maré calculadas pelo modelo deverão ser maiores que as medidas (BRANT, 2012).

## 2.7 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O conhecimento relativo ao transporte de sedimentos no litoral é um dos temas básicos da Engenharia Costeira, estando diretamente vinculado ao impacto ambiental produzido pelas obras costeiras e portuárias. Diversos pesquisadores têm trabalhado intensamente no desenvolvimento de fórmulas e metodologias que resultem em uma estimativa, senão precisa, pelo menos confiável do transporte litorâneo de sedimentos. Pode- se constatar que a cada ano, são propostas novas fórmulas e métodos para o cálculo do transporte de sedimentos litorâneos. Isto ocorre principalmente devido aos avanços dos recursos computacionais e ao aumento da disponibilidade de dados, medições e monitoramento de praias em todo o mundo (de ARAÚJO et al., 2001).

Os processos morfológicos relacionam-se diretamente com os movimentos dos sedimentos no meio fluido. Pode- se constatar que a passagem da água sobre um fundo fixo sofre a atuação de duas forças que podem provocar o movimento dos sedimentos. Essas forças, que atuam sobre a partícula, são o arrasto e a sustentação (ADRIOLO et al., 2008).

A força de arrasto é composta pelas forças de fricção e pelas diferenças de pressão que, por sua vez, são influenciadas pela vazão. Esta diferença de forças gera um fluxo, impulsionando a partícula, ou seja, esta força atua atrás da partícula, atuando na velocidade do fluxo. A fricção age ao longo da superfície da partícula e trava o

movimento devido ao contato entre a água e a partícula.

Um caso especial de transporte é o modelo 2D de Águas Rasas ("*Shall Waters*"), que consiste em: plano horizontal para a área limitada composta de contornos abertos e fechados (terra); e em plano vertical (número de camadas). O modelo matemático bidimensional vertical para sedimento em suspensão apresentado por Van Rijn possui uma velocidade do fluido e os coeficientes de mistura são descritos por uma camada perfil, que se baseia na aplicação de perfis flexíveis para representar a distribuição vertical das variáveis básicas (Van Rijn et al., 1986).

No sistema de coordenadas cartesianas, o modelo de camadas múltiplas representa o sistema, tanto no fundo como na superfície livre. E ainda, pode ser modelado por derivadas parciais, dentro do sistema de coordenadas cartesianas originais, essas camadas são expressas da forma das equações de Saint-Venant em canais prismáticos com fundo fixo, como vemos a seguir (STELLING e VAN KESTER, 1994).

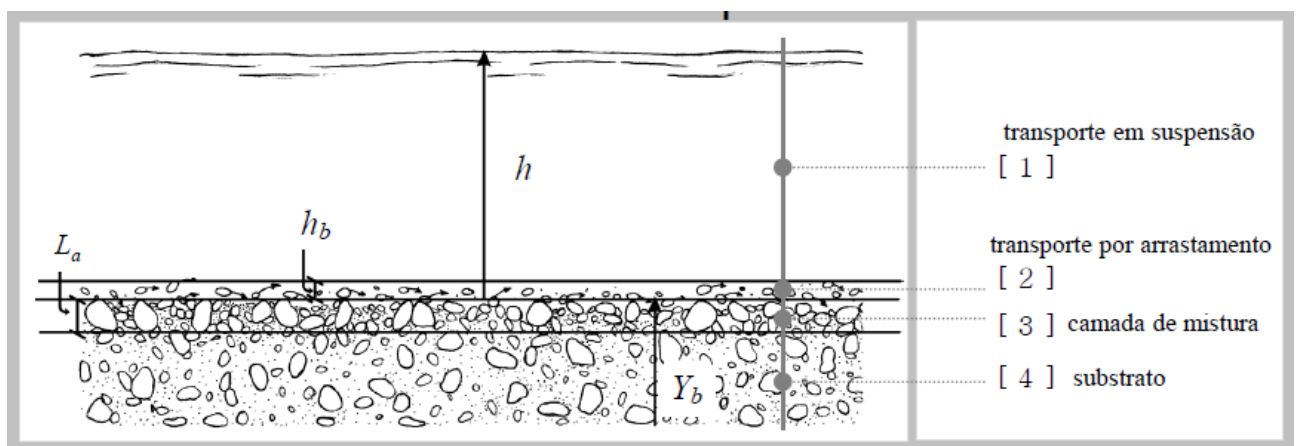


Figura 2.7 - Esquema transporte de sedimentos águas rasas.

Em que " $h_s$ " é a espessura da camada de transporte em suspensão; " $h_b$ " é a espessura da camada de transporte por arrastamento; " $L_a$ " é a espessura da camada de mistura; " $h$ " é a profundidade do escoamento, a soma de " $h_s$ " com " $h_b$ "; " $Y_b$ " é a cota do

fundo; “ $u$ ” é a velocidade do fluxo local longitudinal (x) direção; “ $q_s$ ” é a concentração de sedimentos; “ $J$ ” é o declive da linha de energia.

Considerando a massa total do sistema igual a:

$$d_x(hu) = 0 \leftrightarrow q = uh = \text{constante} \quad (2.4)$$

Sendo a conservação de massa de sedimentos como:

$$\partial_t(Y_b) + \frac{u\partial_u(q_s)}{(1-p)h(1-Fr^2)}\partial_x(Y_b) = \frac{-u\partial_u(q_s)}{(1-p)h(1-Fr^2)}J \quad (2.5)$$

A quantidade de movimento de sedimentos fica:

$$d_x(hu^2) + \frac{1}{2}gd_x(u^2) + gh d_x(Y_b) = -\frac{\tau_b}{\rho(w)} \quad (2.6)$$

A força atuante nos sedimentos pode ser modelada, considerando- se o grão como esférico, representadas pelas variáveis que se relacionam com estas forças exercidas ( $\tau_b$ ) em grãos de sedimento unitários no fundo. Na ausência de melhores medidas, é usada uma aproximação feita com base na teoria das esferas (ADRIOLO et al., 2008).

Observa-se também na literatura, que a relação entre a vazão ( $u$ ) e a tensão ( $\tau_b$ ) pode ser descrita pela força distribuída na área “A”. Em estudos de processos morfológicos que não trabalham com uma área conhecida tem sido usado como significativo o termo tensão (DYER, 1986).

Em 1986 Van Rijn *et al.*, propuseram um modelo matemático bidimensional vertical, baseado na convecção-difusão, integrado com área por onde as partículas do sedimento, onde estão incluídos os efeitos de decantação. A velocidade local do fluido e

as variáveis do processo da mistura são descritos por uma nova camada, que se baseia na aplicação de perfis flexíveis para representar a distribuição vertical das variáveis básicas. As velocidades medidas e calculadas dos fluxos.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_S \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (w - w_S)c - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_S \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.7)$$

Onde: “c” = é a concentração de sedimentos local;

“u” = velocidade do fluxo local longitudinal (x) direção;

“w” = velocidade do fluxo local em (z) na direção vertical;

“w<sub>S</sub>” = velocidade de queda da partícula;

“ε<sub>S</sub>” = coeficiente de sedimentação da mistura; e

“t” = tempo do processo.

Esse modelo está sintetizado na figura 2.8 a seguir.

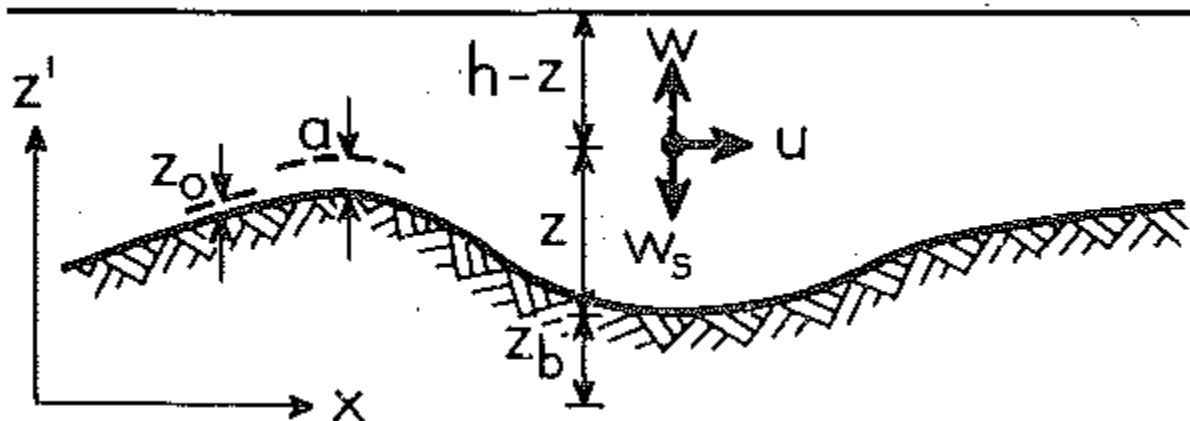


Figura 2.8 - Variáveis da equação 2.7 do transporte de sedimentos.

Neste tipo de relação em canais, ADRIOLO *et al.* 2008, afirma que a produção de sedimentos provocada pelo escoamento superficial, pode ser modelada como sendo :



$$Q_{sed} = \alpha_0.(Q_v.S)^{\alpha_1}.K.C.P.L.S.CF \quad (2.8)$$

onde,  $Q_{sed}$  = produção de sedimento, em dia / Ton,

$Q_v$  = vazão de escoamento, em m<sup>3</sup>/s;

$S$  = área, em m<sup>2</sup>;

$K$  = fator de erodibilidade do solo;

$C$  = fator de uso e manejo do solo;

$P$  = fator de práticas conservacionistas;

$LS$  = fator topográfico; e

$CF$  = fator de rugosidade.

$\alpha_0$  e  $\alpha_1$  = parâmetros a serem determinados.

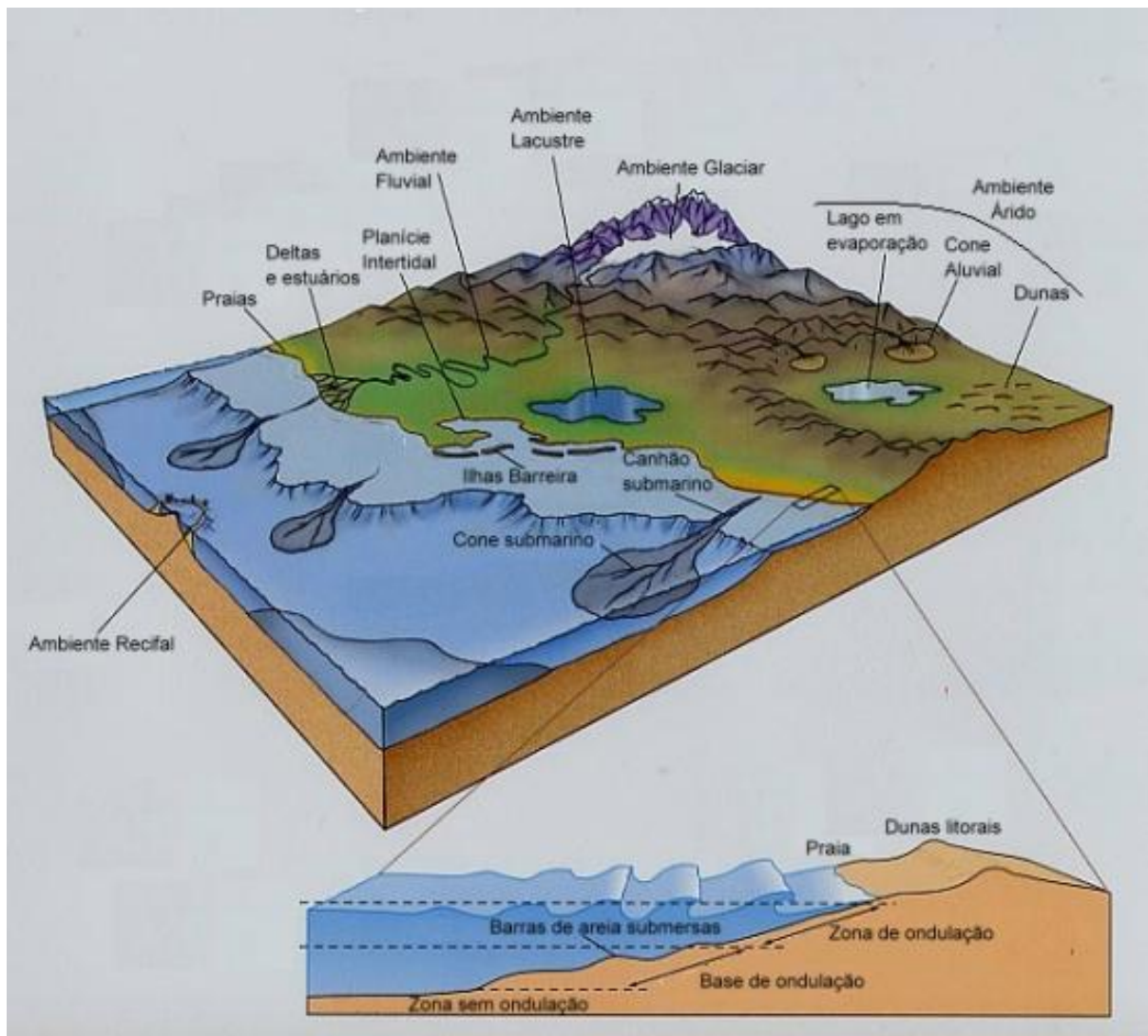
No estudo elaborado por Adriolo esses parâmetros assumiram os valores:

$$\alpha_0 = 11,8 \text{ e } \alpha_1 = 0,56$$

Admitindo- se que os fatores estão relacionados com a região onde ocorre o transporte e, ainda, que possam ser adotados os parâmetros da função em bases semelhantes às do modelo citado, o transporte de sedimento pode ser escrito como,

$$Q_{sed} = 11,8.(Q_v.S)^{0,56}.K \quad (2.9)$$

Onde as variáveis assumem as definições dadas em 2.8



**Figura 2.9 - Figura envolvida no transporte de sedimentos pelas forças de contato nos diferentes ambientes sedimentares (Adaptado de GRANT e MADSEN, 1986).**

A partir de uma determinada velocidade, os efeitos das forças combinadas de arrasto e sustentação provocam um deslocamento dos sedimentos mais superficiais quanto à posição original. Essa velocidade é conhecida como a velocidade crítica e, conseqüentemente, possui uma tensão crítica. Uma vez que existe uma fase de transição entre o começo de um movimento discreto dos primeiros sedimentos e um deslocamento geral e mais longo de muitos sedimentos, a determinação dessa tensão crítica possui características estáticas.

As ondas têm um importante papel no transporte de sedimentos. Sendo que, com a diminuição de profundidade e os processos subsequentes de empenamento e

arrebentação essa importância aumenta. No caso em estudo, o efeito das ondas é desprezível, de vez que está sendo modelado o transporte de sedimentos no canal da Baía de Babitonga/SC e a ocorrência de ondas no local é reduzida.

## 2.8 - LÓGICA FUZZY

O termo “*Fuzzy*” em língua inglesa pode ter vários significados, de acordo com o contexto de interesse, mas o conceito básico, deste adjetivo, passa sempre pelo sentido de *vago, indistinto, incerto*. As tentativas de trabalhar com modelos capazes de relacionar a complexidade e a certeza são importantes embora aceitem relaxar essa hipótese quando se trata de lógica *nebulosa ou difusa* o que tem resultado em uso frequente em estudos na área de Engenharia (ROSS, 2004).

A literatura técnica apresenta, de forma geral, inicialmente, os conceitos da teoria de conjuntos Fuzzy a partir de elementos da teoria clássica de conjuntos. As ideias de variáveis linguísticas e de modelos de interferência *Fuzzy* são importantes exemplos de representação e de processamento de conhecimento utilizando-se a lógica Fuzzy (REZENDE, 2005).

Para a teoria clássica de conjuntos, o tratamento de classes de objetos e suas inter-relações em um universo definido, pode ser discreto ou contínuo, dependendo da natureza dos objetos que compõem o conjunto. Esse conceito é aplicável também à abordagem feita nos modelos Fuzzy.

Uma abordagem completa de todas as aplicações que podem ser desenvolvidas a partir da teoria de conjuntos Fuzzy envolveria material suficiente para um livro, o que não está no escopo deste trabalho. Este capítulo se propõe a, apenas, apresentar alguns conceitos básicos da lógica Fuzzy e o funcionamento das principais ferramentas que

utilizam essa lógica importante para o entendimento da proposta de solução aqui desenvolvida.

Em Fuzzy, os objetos de uma mesma classe ou que possuem características semelhantes são agrupados em conjuntos. Neste contexto, um conjunto consiste de uma coleção de objetos ou elementos do universo de discurso. A teoria clássica de conjuntos sugere três formas de se definir um conjunto e essa distinção será aqui utilizada. A definição mais usual de conjunto considera que o mesmo é uma coleção de objetos ou elementos do universo de discurso (CAUSEY, 1994).

A forma de definição de conjunto baseia-se no fato de que os objetos de uma mesma classe possuem características semelhantes e podem ser agrupados em conjuntos que refletem estas características. Assim, um conjunto consiste de uma coleção de objetos ou elementos do universo de discurso que possuem uma relação bem definida entre si.

Outro conceito importante é da função de pertinência. No caso de estudos empregando Fuzzy a função de pertinência ( $\mu$ ) de um conjunto Fuzzy ( $\tilde{A}$ ) parte do pressuposto de que o conjunto Fuzzy depende do significado linguístico definido para ele e de sua interpretação no contexto do universo de discurso utilizado. Assim, na lógica Fuzzy, o grau de pertinência de um elemento em relação a um conjunto é definido por uma função característica real, que assume como valor qualquer número pertencente ao intervalo real fechado  $[0,1]$ .

Sistemas de apoio à decisão, utilizando algoritmos para aproximação de funções e sistemas de controle baseados em lógica Fuzzy, estão entre as formas mais populares de utilização desses conceitos. Pode-se citar, adicionalmente, o princípio da de extensão de Zadeh utilizado para extensão da imprecisão Fuzzy em modelos matemáticos, permitindo aplicação de sistemas Fuzzy em inúmeras perspectivas na engenharia, além

de aplicação na economia, como por exemplo, na localização de indústrias (COSENZA, 2000).

O **Teorema da Separação** relaciona a teoria clássica de conjuntos e a lógica clássica “*booleana*”. Neste caso, um conjunto é definido por um predicado da lógica clássica que caracteriza os elementos que pertencem ao conjunto. Desta maneira, se um elemento “*x*” do universo de discurso “*U*” pertence a um dado conjunto, então este elemento satisfaz um predicado associado a este conjunto e pode-se definir este conjunto por meio de uma função, dita função característica “*f*”, que associa a cada elemento do universo de discurso “*U*” um valor binário (ZADEH, 1975).

Existem aplicações na área de engenharia, entretanto, que o conhecimento lida com propriedades consideradas incertas ou imprecisas e, portanto, impossíveis de ser caracterizado por predicados da lógica clássica bivalente o que torna interessante a consideração dessa nova abordagem. A teoria dos conjuntos Fuzzy pode ser vista como uma extensão da teoria clássica de conjuntos e foi criada para tratar graus de pertinência intermediários entre a pertinência total e a não pertinência de elementos de um universo de discurso com relação a um dado conjunto. Assim, um conjunto Fuzzy é uma generalização da noção clássica de um conjunto deste universo (REZENDE, 2005).

#### 2.8.1 - Representação Fuzzy de Conhecimento

Quando um ser humano está resolvendo um problema complexo, o primeiro passo do processo de solução é tentar elaborar a representação desse problema através de uma estrutura geral, montada com os conceitos gerais envolvidos no problema, de forma que lhe permita criar as relações essenciais entre os elementos considerados. Esse procedimento é fundamental especialmente quando se trata de fazer uma representação nebulosa do conhecimento (ZADEH, 1975).

A teoria Fuzzy oferece duas abordagens para obtenção de regras nebulosas em seus sistemas de classificação Fuzzy. A primeira parte de uma solução é dada, diretamente, por especialistas; a segunda segue um processo de aprendizagem a partir de uma solução inicial geral. Nos últimos anos, outros métodos foram apresentados para gerar regras difusas de instâncias de formação (CHEN et al., 2000).

Em 1997 foi apresentado por CASTRO et al. um método para lidar com o problema de classificação dos dados. No artigo, foi apresentado um algoritmo indutivo de aprendizagem para os sistemas Fuzzy que seria utilizado no processo de solução, este processo foi apresentado como segunda abordagem no parágrafo acima. Em 2000 foi apresentado em, CHANG et al. um novo método para gerar regras difusas a partir dos dados numéricos, com base na exclusão de termos de atributos para lidar com o problema de classificação de dados. Posteriormente foi apresentada uma nova abordagem para gerar regras difusas a partir de dados numéricos disponíveis em um banco de dados relacional, feita por, CHEN et al., como um complemento para aquele método.

Uma alternativa usada para modelagem Fuzzy consiste em uma abordagem, através da qual, se convertam relações gerais e imprecisas, obtidas no primeiro momento, em algoritmos operacionais mais detalhados, numa segunda fase. Essa perspectiva, essencialmente humana, de encarar um problema, geralmente não permite a definição precisa de uma solução, em termos de números exatos, mas conduz a uma classificação ou agregação qualitativa em categorias gerais ou conjuntos de possíveis soluções.

A capacidade de classificar de modo impreciso as variáveis de um problema, em termos de conceitos qualitativos em vez de quantitativos, traduz a ideia de uma variável linguística e o processo de representação Fuzzy de conhecimento aqui descrito depende fundamentalmente deste conceito (REZENDE, 2005).

Uma variável linguística é definida como uma entidade utilizada para representar, de modo impreciso, e, portanto, linguístico, um conceito ou uma variável de um dado problema. Ela admite como valores apenas uma expressão linguística (frequentemente chamada de termo primário), como, por exemplo, “fria”, “muito grande”, “aproximadamente alta” e assim por diante. Estes valores contrastam com os valores assumidos por uma variável numérica que admite apenas valores precisos, definidos, ou seja, números.

Um termo primário de uma dada variável linguística pode ser representado por um conjunto Fuzzy existente no universo de discurso no qual esta variável está definida. Assim, cada conjunto Fuzzy definido neste universo é associado a um conceito linguístico que classifica ou define um valor impreciso para a variável em questão. Para um dado elemento “x” do universo de discurso, o valor de pertinência  $\mu$ , representa o quanto este elemento satisfaz o conceito representado pelo conjunto Fuzzy ( $\tilde{A}$ ).

A forma de utilização das variáveis linguísticas depende basicamente da definição das propriedades sintáticas e semânticas que vão reger o comportamento do sistema de conhecimento Fuzzy. As propriedades sintáticas definem o formato em que serão armazenadas informações linguísticas Fuzzy. Elas proporcionam a criação de uma Base de Conhecimento contendo sentenças estruturadas, sistematizando os processos de armazenamento, busca e processamento dos dados existentes. Por outro lado, as propriedades semânticas vão especificar de que modo é extraído e processado o conhecimento armazenado na forma de declarações condicionais Fuzzy ou nas regras de produção Fuzzy, contidas na estrutura definida pelas propriedades sintáticas (REZENDE, 2005).

Os conjuntos Fuzzy possuem operações específicas. Para isso suponha, por exemplo, três conjuntos Fuzzy: “pequeno”, “médio” e “grande”, em um universo de discurso real  $U: [0,5]$ , estes conjuntos estão representados na figura abaixo e descrevem as operações Fuzzy básicas executadas entre estes conjuntos.

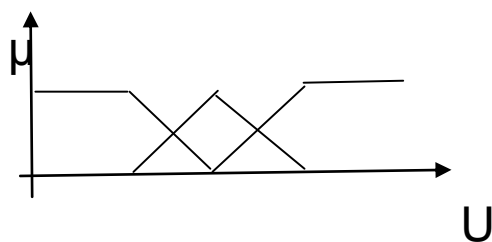


Figura 2.5 - Diagrama Hassi-Euler dos conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande”.

Então, o complemento de um conjunto Fuzzy A do universo de discurso U, denotado por  $\tilde{A}$ , tem uma função de pertinência respectiva. Definida por  $\mu$ , o complemento corresponde ao conectivo “NÃO”. Assim, a partir das definições dos conjuntos e da definição para o complemento, resulta que o complemento do conjunto “grande” é o conjunto “não grande”, mostrado a seguir.

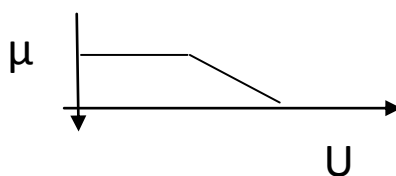


Figura 2.6 - Conjunto Fuzzy resultante da operação de complementação “não grande”.

A união de dois conjuntos Fuzzy A e B do universo de discurso U, também podem ser encontradas na literatura técnica como definida de forma diferente. Por exemplo, pode-se representar  $A \cup B$  ou  $A + B$  pela seguinte função de pertinência (JANG, 1997):

$$\mu_{A \cup B} = \max [\mu_A(x_i) , \mu_B(x_i)] \quad (2.10)$$

Esta é uma definição particular da operação de união proposta por Zadeh (1965) na década de 1960. Na verdade, uma forma mais geral de definir a operação de união



entre conjuntos Fuzzy é por meio das normas “S”, ou seja, de uma família de funções com as seguintes propriedades:

- Comutatividade:

$$S(a,b) = S(b,a) \quad (2.11)$$

- Associatividade:

$$S(a,S(b,c)) = S(S(a,b),c) \quad (2.12)$$

- Monotonicidade:

$$\text{se } a \leq b \text{ e } c \leq d, \text{ então } S(a,c) \leq S(b,d) \quad (2.13)$$

- Coerência nos contornos:

$$S(a,1) = 1 \text{ e } S(a,0) = a \quad (2.14)$$

Assim, qualquer função da família das normas S pode ser utilizada como um operador generalizado da união entre conjuntos Fuzzy. Alguns trabalhos apontam, inclusive, vantagens desta substituição de operadores para certos tipos de aplicações (PEDRYCZ, 1993). De qualquer forma, a união corresponde sempre ao conectivo “OU”.

A interseção entre dois conjuntos Fuzzy A e B do universo de discurso U é definida de diversas formas. Por exemplo, pode-se representar  $A \cap B$  ou  $A \cdot B$  por meio de seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A \cap B} = \min [\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)] \quad (2.15)$$

Similarmente ao caso da união, a operação de interseção entre conjuntos Fuzzy pode ser generalizada por meio de famílias específicas de funções, chamadas de normas “T”, com as seguintes propriedades (JANG, 1997):

- Comutatividade:

$$T(a,b) = T(b,a) \quad (2.16)$$

- Associatividade:

$$T(a, T(b,c)) = T(T(a,b),c) \quad (2.17)$$

- Monotonicidade:

$$\text{se } a \leq b \text{ e } c \leq d, \text{então } S(a,c) \leq S(c,d) \quad (2.18)$$

- Coerência nos contornos:

$$T(a,1) = a \text{ e } T(A,0) = 0 \quad (2.19)$$

## 2.8.2 – Modelos de Raciocínio Fuzzy

A maneira mais comum de armazenar informações em uma Base de Conhecimento Fuzzy é a representação por meio de regras de produção Fuzzy. Uma regra de produção normalmente é formada de duas partes principais (ROSS, 2004):

**Se** <antecedente> **Então** <conseqüente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas, mesmo que parcialmente, determinam o processamento do conseqüente por um mecanismo de inferência Fuzzy. O processo acima descrito denomina-se disparo de uma regra.

Por sua vez, o conseqüente é composto por um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com o disparo da regra. Os conseqüentes das regras disparadas são processados em conjunto para gerar uma resposta determinística para cada variável de saída do sistema.

Como já mencionado, a semântica é que vai definir o mecanismo de inferência, como serão processados os antecedentes, quais serão os indicadores de disparo das regras e quais os operadores utilizados sobre os conjuntos Fuzzy existentes para executar o processamento de conhecimento. Tipicamente, utilizam-se modelos de inferência Fuzzy específicos de acordo com as propriedades sintáticas definidas, ou

seja, o modelo de processamento definido para o sistema de conhecimento vai depender basicamente da forma de armazenamento de informações escolhida (REZENDE, 2005).

MAMDANI (1974) propôs na década de 1970 um método de inferência Fuzzy, que foi, por muitos anos, padrão para a utilização dos conceitos da lógica Fuzzy em processamento de conhecimento. As regras de produção do modelo MADANI possuem relações Fuzzy tanto em seus antecedentes como em seus consequentes.

Uma regra típica é:

**Se** Temperatura = “Aumentando Muito” e Pressão = “Muito Alta”,

**Então** Perigo de Explosão = “Grande”

Como a maioria das aplicações de interesse possui sistemas convencionais de aquisição e atuação baseados em grandezas numéricas, o modelo MAMDANI inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos Fuzzy equivalentes e posteriormente, as variáveis Fuzzy geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes.

A máquina de inferência recebe valores Fuzzy provenientes do módulo de interface de entrada, processa as regras existentes na Base de Conhecimento e gera um conjunto Fuzzy de saída para o módulo de interface correspondente, a partir da composição de todas as regras disparadas. Por uma regra disparada, entende-se uma regra cujo processamento do antecedente para as entradas atuais gerou graus de pertinência “não nulos”, ou seja, a relação Fuzzy entre as entradas e os termos primários do antecedente é maior que zero (REZENDE, 2005).

### 2.8.3 – O Modelo de Raciocínio Fuzzy Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

Na década de 1980, foi proposta uma estrutura de inferência baseada na teoria de conjuntos cujos detalhes podem ser obtidos na referência (TAKAGI & SUGENO, 1985;

SUGENO & KANG, 1988). Esta estrutura, denominada sistema de inferência TAKAGI-SUGENO-KANG (TSK), é um modelo de inferência Fuzzy paramétrico, também conhecido como modelo TSK. Os autores demonstraram que estes modelos funcionam como boas aproximações para sistemas que podem ser completa ou satisfatoriamente representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída.

Similarmente ao modelo de MAMDANI, os modelos Fuzzy TSK são também baseados na utilização de uma base de regras condicionais de inferência, porém, no modelo TSK os consequentes das regras, em vez de serem formados por relações Fuzzy, compõem-se de equações paramétricas relacionando as entradas e as saídas do processo.

A sintaxe da Base de Conhecimento é diferente do caso do modelo de MAMDANI, implicando em alterações também das propriedades semânticas correspondentes. A expressão a seguir mostra regra genérica de um modelo TSK.

$$\text{Se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \dots \text{ e } x_p = A_n \text{ Então } y = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_p), \quad (2.20)$$

O processamento de conhecimento em um modelo TSK é similar ao dos modelos de MAMDANI. A etapa de conversão de escalar para Fuzzy é idêntica. A saída numérica é calculada diretamente pela soma das saídas das regras, ponderada pelos valores de ativação  $D^{(k)}$  de cada uma delas. Um modelo TSK com múltiplas saídas sempre pode ser transformado em múltiplos modelos de saída única.

$$D^{(k)} = T[ \mu_{A1}(x_1), \mu_{A2}(x_2) \dots \mu_{Ap}(x_p) ] \quad (2.21)$$

A utilização de um modelo TSK em substituição a um modelo matemático convencional, em um esquema de controle ou modelagem de sistemas reais, é usual. Para ser utilizado desta maneira, é necessário que o modelo seja ajustado para se comportar como o sistema real que está representando. Assim, devem ser criadas partições Fuzzy para as variáveis de entrada, ou seja, são definidos conjuntos Fuzzy para cada um dos diversos universos de discurso das variáveis.

Considerando- se que as partições Fuzzy e os parâmetros de saída estão otimizados segundo o índice escolhido pelo usuário, o modelo está pronto para substituir o modelo convencional existente. A equação 2.22, a seguir, relaciona as entradas e as saídas de um modelo TSK de primeira ordem, utilizando um conjunto de K regras de produção Fuzzy e p entradas. Ela é consistente coma regra de produção genérica mostrada na equação 2.22.

$$y(x_1, x_2, \dots, x_p) = \Sigma [ \beta_i \cdot (P_{ij} + P_{ij} \cdot x_1 + P_{ij} \cdot x_2 + \dots + P_{ip} \cdot x_p) ] \quad (2.22)$$

Onde:  $x_i$  ( $i=1, \dots, p$ ) = variáveis linguísticas;

$P_{ij}$  ( $j=0, \dots, p$ ) = peso associado à respectiva variável lingüística; e

$\beta_i$  = parâmetro ajustado.

Por meio de um conjunto de dados de entrada e saída do sistema a ser modelado, os parâmetros “P” dos consequentes destas regras são estimados segundo algum índice de desempenho definido pelo usuário. O resultado obtido com a minimização do erro quadrático entre a saída do modelo de TSK e os dados de saída disponíveis é normalmente utilizado como medida do desempenho. Neste caso, um algoritmo de Mínimos Quadrados (MQ) pode ser utilizado para realizar esta estimação (REZENDE, 2005).

## 2.9 - REDES NEURO FUZZY (ANFIS)

Uma Rede Neural Artificial, RNA, ou simplesmente uma rede neural, é um modelo computacional biologicamente inspirado em elementos de processamento, chamados neurônios, e conexões entre eles com coeficientes (pesos) vinculados às conexões, que constituem a estrutura neuronal e a formação e recordação de algoritmos ligados à estrutura. As redes neurais são chamadas modelos connectionist, expressão utilizada em sua forma original na lingua inglesa, por causa do principal papel das conexões. As Redes Neurais Artificiais (RNA) conseguem perceber o paradigma simbólico, representando e processando as informações. Isto é feito, por meio de interconexão de unidades de processamento simples, realizando classificações de

padrões, e permitindo a generalização de conhecimento contido no chamado conjunto de treinamento (KASABOV, 1998).

O modelo mais simples de RNA, no qual várias unidades de processamento estão conectadas unicamente a uma unidade de saída através dos pesos sinápticos, é conhecida como *Perceptron*. A descrição desse modelo em detalhes pode ser encontrada em Frank Rosenblatt (JAIN, 1998). Uma RNA, chamada de Rede *Perceptron* multicamadas (MLP) é uma rede onde a quantidade de neurônios na camada intermediária é um fator importante a ser determinado de vez que, quanto maior a quantidade de neurônios tanto maior será a capacidade de mapeamento não linear da rede MLP (VALENÇA, 2010).

A Rede de Função de Base Radial (RBF) é uma abordagem, apresentada em 1988, como uma possível alternativa às redes MLP. Em sua formulação tradicional é composta por três camadas: sendo a primeira, camada de entrada, uma camada escondida e uma camada de saída. Esta RNA se distingue das outras RNA's pelo fato da normalização dos dados, ser feita através de um algoritmo de treinamento eficiente, chamado de "*backpropagation*", *i.e.*, a normalização é feita com o auxílio da retropropagação de dados. Esta característica é admitida devido ao comportamento local da sua camada escondida, e a consequência é uma precisão alta dentro do intervalo de dados, no entanto, sua generalização é bastante pobre (MARTIN, 1998).

A partir de meados da década de 1980, diversos autores têm procurado unir as potencialidades de sistemas Fuzzy com as redes neurais nos chamados sistemas Neuro-Fuzzy. Conforme já citado, as Redes Neurais Artificiais (RNA), por meio da interconexão de unidades de processamento simples, realizam classificações de padrões permitindo a generalização do conhecimento contido no chamado conjunto de treinamento. Uma RNA é, na verdade, um modelo não linear generalizado cujos parâmetros são identificados a partir de um conjunto de dados e de algoritmos eficientes. Apesar dos bons resultados numéricos, alcançados com o emprego de uma RNA, essa abordagem tem o inconveniente, ou limitação, de não permitir a

incorporação do conhecimento de especialistas numa determinada aplicação, e o modelo resultante pode ser centrado nos dados (REZENDE, 2005).

Em 1993, Roger Jang propôs uma rede neural, importante como um sistema de apoio a decisão, baseada num sistema híbrido, capaz de representar o conhecimento de especialistas sobre um determinado domínio e interpolar decisões a partir de entradas contaminadas com incertezas. A rede Neuro- Fuzzy (ANFIS) possui o formalismo matemático do sistema Fuzzy mas permite incluir a representação de algumas características do raciocínio humano sendo, portanto, aplicado para os chamados sistemas a base de conhecimento. Em outras palavras, essa abordagem consiste de um sistema desenvolvido a partir de sistemas Fuzzy e pode ser considerado como centrado no homem (REZENDE, 2005).

O modelo Neuro-Fuzzy conhecido como sistema ANFIS é um anacronismo do inglês *Adaptative Neuro- Fuzzy Inference System* (JANG et al, 1993). Na rede ANFIS, a utilização de operadores continuamente diferenciáveis (soma- produto) dos sistemas TSK, permite a utilização de algoritmos de otimização baseados no método do gradiente para adaptação dos parâmetros. Entretanto, a simples utilização de algoritmos de programação não linear não implica necessariamente na fusão de sistemas Fuzzy e redes neurais. Além disso, a utilização de técnicas de otimização visando o aumento da precisão numérica dos resultados pode prejudicar a interpretação dos conjuntos Fuzzy obtidos após o tratamento.

A simples utilização de algoritmos de programação não linear para adaptação de parâmetros não implica, necessariamente, na fusão de sistemas Fuzzy com redes neurais. Além disso, a utilização de técnicas de otimização, visando o aumento da precisão numérica dos resultados, pode prejudicar a interpretação dos conjuntos Fuzzy obtidos após o treinamento.

Deve- se observar que, na literatura, pode- se encontrar o termo ANFIS como uma designação de certo número de modelos ligeiramente diferentes entre si (Keller, Yager, & Tahani 1992; Pedrycz & Rocha 1993; Jang, Sun, & Mizutani 1997). Embora, uma grande parte desses modelos seja apenas uma versão neural de sistemas Fuzzy, ou uma

interpretação Fuzzy de uma RNA.

### 2.9.1 - Arquitetura e Construção das Redes ANFIS

As redes Neuro-Fuzzy (ANFIS) são modelos matemáticos que se assemelham às estruturas neurais biológicas e têm capacidade computacional adquirida por meio de aprendizado e de generalização (BRAGA, CARVALHO & LUDEMIR, 2000; HAYKIN, 1994).

O Modelo ANFIS consiste em utilizar as entradas não combinadas no módulo de inferência, de maneira que a entrada da RNA seja obtida pela concatenação dos vetores de pertinência associados a cada variável ( $\mu_{ij}$ ) é o vetor de pertinência resultante, obtido pela discretização Fuzzy do domínio da variável. A saída do Sistema Neuro-Fuzzy é calculada pela última camada da ANFIS, o que permite que os parâmetros possam ser adaptados pela solução de um problema de mínimos quadrados (JANG, 1993).

A idéia do sistema ANFIS (JANG, 1993-1997) é implementar um modelo Fuzzy do tipo TSK numa rede neural, sem perda de generalidade. Considere um modelo TSK de primeira ordem descrita por sua regra como:

$$\text{Se } x = A_1 \text{ e } y = B_1 \text{ Então } f_1 = p_1 \cdot x + q_1 \cdot y + r_1 \quad (2.23)$$

Onde:  $x, y$  = entradas (números Fuzzy); e

$f_1$ =saída TSK de 1a. ordem.

O Sistema ANFIS corresponde ao modelo definido pela equação 2.23. Nesse modelo as unidades na mesma camada têm funções similares, e pode ser descrito pelas camadas apresentadas a seguir:



**Camada 1.** As saídas desta camada são a função pertinência das entradas em relação aos termos (conjunto Fuzzy) nas regras:

$$o_{1i} = \mu_{A_i}(x), \text{ para } i = 1, 2, \dots \quad (2.24)$$

Onde:  $\mu_A(x)$  é a função pertinência A;

$\mu_B(x)$  é a função pertinência B; e

$$\mu_A(x) \text{ e } \mu_B(x) \text{ são iguais a } 1 / (1 + \left| (x - c_i) / a_i \right|^{2b}) \quad (2.25)$$

De forma geral as funções de pertinência utilizadas são funções gaussianas, definidas pela equação 2.25, que, por serem continuamente diferenciáveis, permitem que os parâmetros que definem o centro e o suporte da função sejam otimizados na base da adaptação. Os parâmetros que definem as funções de pertinência são chamados parâmetros da premissa.

**Camada 2.** As saídas das unidades desta camada são valores de ativação das regras. Haverá tantas unidades na camada “2” quantos forem o número de regras. O operador ( $\Pi$ ) realiza a função de um operador conjuntivo nos sistemas Fuzzy, agregando as saídas das camadas anteriores. Geralmente, o operador-produto é utilizado, como um operador que o sistema usa seja continuamente. Esse operador deve ser diferenciável, favorecendo a otimização dos parâmetros:

$$o_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), \text{ } i = 1, 2, \dots \quad (2.26)$$

Onde:  $w_1, w_2, w_3$  = pesos da função pertinência.

**Camada 3.** As saídas das unidades desta camada são valores normalizados dos valores de ativação das regras:

$$o_{31} = \bar{w}_1 = w_1 / (\sum_1^n(w_i)) \quad (2.27)$$

Onde:  $w_i$  = peso médio “i”.

**Camada 4.** As saídas das unidades desta camada representam a contribuição de cada regra na saída total e são calculadas pelo valor da função no consequente da regra ponderado pelo valor normalizado de ativação da regra:

$$o_{41} = w'_1 \cdot f_1 = w'_1 \cdot (p_1 \cdot x + q_1 \cdot y + r_1) \quad (2.28)$$

No modelo TSK de primeira ordem, como definido pelas regras (*Se ... Então*), os parâmetros que definem os consequentes das regras, chamadas de parâmetros dos consequentes, ocorrem linearmente na saída de cada regra, permitindo sua adaptação pelo método dos mínimos quadrados. (REZENDE, 2005)

**Camada 5.** Nesta camada, a saída parcial de cada regra é somada para o cálculo da saída total, produzindo a saída do modelo TSK definido pelas regras:

$$o_{51} = \frac{\sum_1^n (w'_1 \cdot f_i)}{\sum_1^n (f_i)} = \frac{\sum_1^n (w_i \cdot f_i)}{\sum_1^n (f_i)} \quad (2.29)$$

A adaptação dos parâmetros do ANFIS é feita em duas etapas: na primeira, os parâmetros (lineares) dos consequentes das regras são adaptados pela solução de um problema de mínimos quadrados; na segunda etapa, os parâmetros das premissas, que definem as funções gaussianas (funções de pertinência do modelo TSK) são adaptados por meio do algoritmo do gradiente. O vetor de entrada do módulo de inferência é obtido pela concatenação dos vetores de ativação obtidos na *fuzzificação* (JANG, 1993).

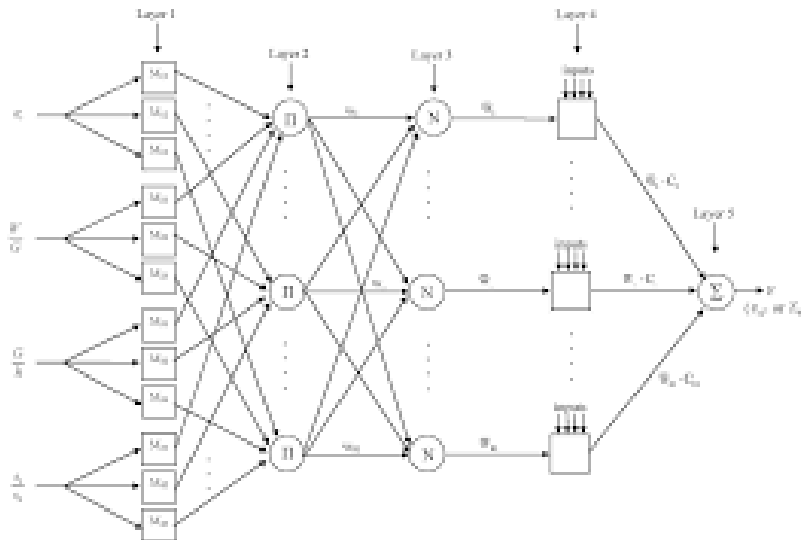


Figura 2.7 - Arquitetura da rede ANFIS, modelo TSK. Fonte: JANG, 1997.

O Sistema ANFIS apresentado na figura 2.12 pode ser adaptado a partir de um conjunto de treinamento, uma vez que o número de parâmetros cresce linearmente com número de atributos, considerando-se o mesmo número de conjuntos Fuzzy para todos os atributos.

Em problemas reais, a complexidade está justamente no grande número de variáveis do problema. Soluções aproximadas com precisão razoável podem ser obtidas utilizando o modelo concatenado. Entretanto esse modelo não permite a separação de classes não linearmente separáveis, como se pode obter no modelo geral.

O processamento da informação em ANFIS é feito por meio de estruturas neurais artificiais em que o armazenamento e o processamento da informação são realizado de maneira paralela e distribuído por elementos processadores relativamente simples. Cada elemento processador corresponde a um neurônio artificial, também conhecido como de McCulloch e Pitts (MCP), ou, simplesmente, modelo MCP (McCulloch & Pitts, 1943). Para as entradas do neurônio temos o vetor correspondente:

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}^T, \text{ de dimensão "n"} \quad (2.30)$$

Onde: X = matriz transposta "T" do vetor de entrada

Para cada uma das entradas  $x_i$ , há um peso correspondente  $w_i$ , na entrada dos neurônios. A soma das entradas  $x_i$  ponderadas pelos pesos correspondentes  $w_i$  é chamada de saída linear “u”, onde:

$$u = \sum_1^n (w_i \cdot x_i) \quad (2.31)$$

Onde=  $w_i$ ,  $x_i$  assumem os significados já definidos

A saída  $y$  do neurônio, chamada de saída de ativação, ou função de ativação, é obtida pela aplicação de uma função  $f(u)$  à saída linear  $u$ , indicada por:

$$y = f(u) \quad (2.32)$$

A função  $f(u)$  é chamada de função de ativação e pode assumir várias formas, geralmente não lineares. Os valores dos pesos “ $w_i$ ” e do aprendizado do neurônio artificial das diferentes funções (REZENDE, 2005).

#### 2.9.2 - Treinamento de Rede ANFIS por Erros (Backpropagation/Feedforward)

As Redes ANFIS são capazes de resolver, basicamente, problemas de aproximação, predição, classificação, categorização e otimização. Dentre as mais conhecidas aplicações das Redes ANFIS, pode-se citar, por exemplo, reconhecimento de caracteres, reconhecimento de voz, projeção de séries temporais, modelagem de processos e controle, entre outras, essas, são na verdade, novas formas de apresentação destas classes de problemas.

O treinamento de redes de mais de uma camada foi considerado um problema aberto até surgir à descrição do algoritmo de treinamento “*backpropagation*”, ou retro propagação em português, em meados da década de 1980 (Rumelhart, Hinton, &

Willians 1986). O termo “*backpropagation*” surge do fato que o algoritmo se baseia na retro propagação dos erros para realizar os ajustes de pesos das camadas intermediárias. A maneira de calcular as derivadas parciais do erro de saída em relação a cada um dos pesos da rede é o que caracteriza o modelo “*backpropagation*”.

Os problemas de aproximação de funções, ou de regressão, são caracterizados pela interpolação, ou seja, dados são fornecidos dentro de determinados limites onde a função é definida e o modelo neural é ajustado para dar uma boa aproximação dentro dos mesmos.

Em problemas de classificação, o objetivo é atribuir um padrão de entrada a uma classe, entre um conjunto de classes conhecidas. Exemplos típicos de problemas de classificação são: reconhecimento de voz, de caracteres e de imagens faciais. Para estes casos, as classes são bem definidas e representadas pelos sons a serem reconhecidos, pelo conjunto de caracteres a ser reconhecido ou por um grupo de pessoas que se deseja identificar por meio de suas imagens.

Problemas de categorização envolvem a descoberta de características estatisticamente relevantes de um determinado conjunto de dados e como estes podem ser divididos em classes. Neste tipo de problema, somente os dados de entrada são conhecidos, cabendo à rede encontrar classes presentes neste conjunto de dados.

O objetivo do processo de aprendizado é, então, encontrar o ajuste do vetor de pesos  $w_i$  para que o objetivo do treinamento que visa à convergência seja atingido. De forma genérica, o próximo valor do vetor de peso  $w$ , na iteração “*n-ésima mais um*” pode ser escrito como:

$$w(n+1) = w(n) + \Delta w(n) \quad (2.33)$$

Onde:  $w(n+1)$  = peso da iteração “*n-ésima mais um*”;

$w(n)$  = peso da iteração “*n-ésima*”; e

$\Delta w(n)$  = função da taxa de aprendizagem ( $\eta$ ).

Os algoritmos de aprendizado se diferem então na maneira de obter o ajuste  $\Delta w$  e podem ser classificados basicamente em três paradigmas distintos: aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado e aprendizado por reforço (REZENDE, 2005).

O aprendizado supervisionado caracteriza-se pela existência de um professor ou supervisor, externo à rede que tem a função de monitorar a resposta  $y_i$ , para cada vetor de entrada  $x_i$ . O conjunto de treinamento é formado por pares de entrada e saída ( $x_i, y_i^d$ ).

Sabe-se, portanto, de antemão, qual deve ser a resposta da rede para cada entrada  $x_i$  e o ajuste de pesos é feito de maneira que a resposta “ $y_i$ ” da rede para o vetor de entrada  $x_i$  se aproxime de “ $y_i^d$ ” dentro de limites de tolerância pré-estabelecidos. Cada resposta  $y_i$  da rede é comparada pelo supervisor com o valor esperado  $y_i^d$  para se obter a direção de ajuste dos pesos  $\Delta w$ . Exemplos típicos que utilizam o aprendizado supervisionado são problemas de aproximação de funções, modelagem de sistemas e classificação de dados.

O aprendizado não supervisionado caracteriza-se pela não existência de saídas desejadas para as entradas  $x_i$ , sendo o conjunto de treinamento formado apenas pelos vetores de entrada. Portanto, não há supervisor externo e o ajuste de pesos  $\Delta w$  é obtido com base nos valores dos vetores de entrada. O aprendizado não supervisionado aplica-se, tipicamente, a problemas de categorização de dados. Um exemplo de categorização de fácil entendimento é o de identificação de classes de usuários de cartões de crédito com base em seus perfis de compra. Neste caso, os perfis de compra estariam representados nos vetores  $x_i$ . Como resultado do treinamento a rede deve retornar o número de classes de usuários e quais pertencem a cada classe (REZENDE, 2005).

O aprendizado por reforço pode ser considerado um paradigma intermediário entre o aprendizado supervisionado e o não supervisionado. O conjunto de treinamento é formado apenas pelos vetores de entrada, mas há existência de um crítico externo em substituição ao supervisor do aprendizado supervisionado. Como não há valores de saída desejados para a saída, o crítico, em vez de retornar o erro de saída da rede, retorna um sinal de reforço ou penalidade associado à última ação da rede. Caso a ação tenha acarretado uma degradação no desempenho, ela será penalizada, ocorrendo com menor chance em situações futuras. Caso a ação tenha como resultado uma melhora de desempenho, ela deverá ser reforçada, ocorrendo com maior probabilidade em situações futuras. Os algoritmos de aprendizado por reforço visam então à maximização do reforço e conseqüente melhora de desempenho.

Para redes de uma única camada a atualização dos pesos é obtida diretamente em direção contrária ao gradiente do erro. Similarmente, equações de ajuste de peso são obtidas diretamente para neurônios da camada de saída. O ajuste de pesos pelo método do gradiente é descrita por:

$$\Delta w_{ij}(n) = -\eta \cdot \frac{dE}{dw_{ij}} \quad (2.34)$$

Onde:  $\eta$  = taxa de aprendizado; e

$$\frac{dE}{dw_{ij}} = \text{derivada parcial do erro.}$$

Em relação ao peso  $w_{ij}$  as redes de uma única camada, como a *Perceptron* (ROSENBLATT, 1958) e ADALINE (WIDROW & HOFF, 1960), para o ajuste de cada peso “ $i$ ”, ela assume uma função simples como:

$$\Delta w_i(n) = \eta \cdot e \cdot x_i \quad (2.35)$$

Onde:  $\eta$  é a taxa de aprendizagem (fixado em 0,05 no trabalho)

“ $e$ ” = erro; e

“ $x_i$ ”= entrada “i” do neurônio.

A extensão do método do gradiente para redes de múltiplas camadas é conhecida como regra delta generalizada, *ou “backpropagation”* (RUMERLHART, HINTON & WILLIAMS, 1986). Na primeira fase do treinamento o sinal de entrada é propagado para frente, *ou “feedforward”*, das entradas até a saída da rede. Como o valor de saída desejado  $w_i$ , para a entrada corrente  $x_i$ , é conhecido, o erro para a camada de saída pode ser calculado, permitindo então que os pesos da camada de saída sejam ajustados. Como não existem valores de saída desejados para as camadas intermediárias da rede, somente para as saídas, o ajuste dos pesos das camadas intermediárias é feito através da propagação para trás do erro da camada de saída, sendo exatamente esse detalhe que caracteriza o treinamento com *“backpropagation”* (JANG, 1997).

A forma irregular da superfície de erro em razão das não linearidades das funções de ativação causa dificuldades para o treinamento com algoritmos baseados no gradiente descendente, como o *“backpropagation”*. As não linearidades podem provocar o surgimento de mínimos locais e regiões planas de gradiente nulas, dificultando o treinamento. Exemplos das situações que podem surgir são mostrados em Rezende, 2005.

Pode-se identificar, ainda, dificuldades, para o treinamento de uma Rede ANFIS, onde algumas expressões analíticas polinomiais podem não permitir a obtenção de expressão para a superfície de erro e somente informações locais sobre a superfície são geralmente conhecidas.

### 2.9.3 – Validação da Rede ANFIS

Conforme já descrito, as Redes ANFIS caracterizam-se pelo aprendizado por meio de exemplos. Para um determinado conjunto de dados o algoritmo de aprendizado deve ser responsável pela adaptação dos parâmetros da rede de maneira que, em um



número finito de iterações do algoritmo, haja convergência para uma solução. O critério de convergência varia de acordo com o algoritmo e com o paradigma de aprendizado, mas pode envolver, por exemplo, a minimização de uma função-objetivo, a variação do erro de saída, ou mesmo a variação das magnitudes dos vetores de peso da rede (JANG, 1997).

A validação da ANFIS está normalmente associada à capacidade de como as mesmas se adaptaram os seus parâmetros como consequência da sua interação com o meio externo. O processo de validação deve confirmar o seu desempenho, à medida que interage com o meio externo. Os critérios de desempenho que determinam a qualidade do modelo neural e o ponto de parada de treinamento são preestabelecidos pelos parâmetros de treinamento e podem estar associados, por exemplo, ao valor do erro quadrático médio das respostas da ANFIS para um determinado conjunto de dados (REZENDE, 2005).

## 2.10 - ALGORITMOS GENÉTICOS

Primeiramente será apresentada uma introdução à Teoria da Evolução Natural e à Genética necessárias para que se possa compreender a nomenclatura e a inspiração para as técnicas de Computação Evolutiva que serão discutidas neste capítulo. A Teoria da Evolução Natural foi elaborada por Charles Darwin entre os anos de 1832 e 1844. O cientista inglês explicou a adaptação e especialização dos seres vivos através da seleção natural, onde apenas os indivíduos mais aptos sobrevivem.

Os Algoritmos Genéticos, AG's, são programas evolutivos baseados na teoria de seleção natural e na hereditariedade. Ou seja, partem do pressuposto que, em uma dada população, indivíduos com boas características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de produzirem indivíduos cada vez mais aptos.

Como resultado, os indivíduos menos aptos tenderão a desaparecer. Assim, os

Algoritmos Genéticos favorecem a sobrevivência dos indivíduos mais aptos, ou seja, os candidatos mais promissores para a solução de um dado problema. Após essa, pesquisadores aplicaram estes conceitos na busca de soluções para os problemas por eles formulados.

Quando Algoritmos Genéticos são empregados para resolução de problemas do mundo real, cada indivíduo da população, denominado cromossomo, normalmente corresponde a uma possível solução para o problema. Um mecanismo de reprodução, baseado em processo evolutivo, é aplicado sobre a população atual com o objetivo de explorar o espaço de busca e encontrar melhores soluções para o problema (REZENDE, 2005).

Toda tarefa de busca ou otimização possui vários componentes, cabendo destacar entre eles: o espaço de busca, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e a função de avaliação,  $\mu$  (ou função de custo), que é uma maneira de avaliar os elementos do espaço de busca. Existem diversos métodos de busca e funções de avaliação (GINSBERG, 1993).

Algoritmos Genéticos têm se mostrado muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, em uma grande variedade de problemas e seu emprego tem sido estimulado pelo fato de não imporem muitas das limitações como ocorre com os métodos de busca tradicionais (M. SAKAWA, 2002).

As técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam seu processamento com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas, normalmente estáticas, diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Geralmente, estes processos heurísticos não são algorítmicos e sua simulação em computadores pode ser muito complexa. Apesar de esses métodos não serem suficientemente robustos, isto não implica que eles sejam inúteis. Na prática, eles são amplamente utilizados, com sucesso, em inúmeras aplicações (WINSTON, 1992).

Além de seguir uma estratégia de gerar e testar soluções elegantes, por serem baseados na evolução biológica, os AG são capazes de identificar e explorar aspectos do ambiente onde o problema está inserido e convergir globalmente para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas (HOLLAND, 1992). “*Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, tanto maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes*”: este é o conceito básico da seleção natural, mecanismo da evolução genética biológica. Como se pode verificar pelo exposto a área biológica mais proximamente ligada aos Algoritmos Genéticos é a Genética Populacional.

O processo de solução admite, inicialmente, a geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Os indivíduos são codificados através dos cromossomas e durante o processo evolutivo, a população é avaliada da seguinte forma: para cada indivíduo é dada uma nota, ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Esse procedimento é também chamado de “*darwinismo*”.

Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais por meio de parâmetros genéticos de mutação e de cruzamento (“*crossover*”) ou recombinação genética gerando descendentes para a próxima geração. Esse processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos poderosos e robustos de busca adaptativa (GOLDEBERG, 1989).

#### 2.10.1 – Parâmetros Genéticos

O desempenho de um Algoritmo Genético (AG) é fortemente influenciado pela definição dos parâmetros a serem utilizados. Portanto, é importante analisar como os

parâmetros podem ser utilizados diante das necessidades do problema e dos recursos disponíveis (JONG, 1980).

O primeiro parâmetro genético é a população, onde seu tamanho afeta o desempenho global e a eficiência dos AG's. Em uma população pequena o desempenho pode cair, pois ela fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais em vez de globais.

Outro parâmetro genético, também conhecido como operador genético, é a Taxa de Cruzamento ou “*Crossover*”, este parâmetro é fundamental no AG. O operador pode ser utilizado de várias maneiras. A primeira é chamada de “Cruzamento de Um-ponto”. Onde um ponto de cruzamento é escolhido e a partir dele as informações genéticas dos Pais serão trocadas. Outra maneira é o “*Cruzamento Multiponto*”. Esta é uma generalização da ideia de troca de material genético através de vários pontos, nesse caso vários pontos de cruzamento podem ser utilizados.

A terceira forma é conhecida como “Cruzamento Uniforme”, não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, por meio de uma máscara, quais os genes de cada cromossomo que cada filho herdará. A escolha do analista deve ter em mente que uma probabilidade alta deste operador pode gerar estruturas com boas aptidões e poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas, por outro lado se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar (REZENDE, 2005).

O parâmetro genético de mutação é um operador randômico de manipulação, onde é possível, através dele, introduzir uma variedade genética na população. O operador visa garantir a possibilidade de se alcançar qualquer ponto do espaço de busca e contornar mínimos locais (REZENDE, 2005).

Outro aspecto importante na formulação de um AG é o intervalo da geração. Este parâmetro é o responsável pelo controle da população, sendo um elemento fundamental na constituição da próxima geração. Com um intervalo grande, a maior parte da população será substituída e isso pode levar à perda de estruturas de alta aptidão, enquanto que, com um intervalo pequeno, o algoritmo pode se tornar muito lento.

O critério de parada utilizado em um Algoritmo Genético para terminar sua execução após um dado número de gerações é chamado de aptidão, ou do melhor indivíduo. O uso de um operador poderá não permitir melhorar uma solução quando as aptidões dos indivíduos de uma população se tornar muito parecidas. Ao conhecer, previamente, uma possível resposta máxima da função- objetivo é possível utilizar este valor como critério de parada (REZENDE, 2005).

Desta forma, pode- se admitir que o objetivo básico dos operadores genéticos seja transformar a população por meio de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório (JANG, 1997).

#### 2.10.2 – Programação Genética

Um dos principais desafios da computação é conseguir que computadores façam as tarefas requisitadas a eles sem a necessidade de informá-los como fazê-las. A Programação Genética (PG) originada na década de 1980 procura responder a este desafio fornecendo um método para a criação automática de programas a partir de uma descrição em alto nível do problema a ser atacado. Para tal, a programação genética procura evoluir uma população de programas de computadores utilizando princípios da genética e evolução natural (KOZA, 1992).

Na Programação Genética, os indivíduos de uma população são programas de computador em vez de cadeias de valores binários ou reais. Para explicar os procedimentos fundamentais de algoritmos genéticos, considere uma população com “N” indivíduos, que representam possíveis soluções para um problema. Em AG's, um indivíduo, também chamado de cromossoma, em uma população é representado por uma cadeia de comprimento “n” como:

$$h = h(n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_N), \quad (2.36)$$

Onde: “ $n_i$ ”= indivíduo “i”; e

“N” é a população considerada .

Para trabalhar com grandes populações, são necessários mais recursos computacionais ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior. Outro parâmetro importante é a Taxa de Cruzamento, quanto maior for essa taxa, tanto mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população.

A Programação Genética começa seu processamento com um conjunto de programas de computador, usualmente gerado de forma aleatória. Estes indivíduos, e seus descendentes, devem ser programas sintaticamente válidos, que podem ser executados e, dependendo de sua posição na árvore, os nós exercem papéis diferentes nos programas.

Os nós internos, que formam o conjunto funcional, podem ser representados por funções aritméticas, funções lógicas, operadores condicionais, atribuições e funções específicas do domínio onde o programa será utilizado. Os nós terminais ou folhas, que formam o conjunto terminal, podem representar variáveis, constantes ou entradas externas (operações de leitura). Para programas mais complexos, cada chamada de função pode ser representada por um nó interno da árvore, e os nós descendentes deste nó podem ser os argumentos da função (REZENDE, 2005).

Em muitos casos, o AG combina os dois operadores genéticos e o cruzamento (Cr, “*crossover*”) é o operador responsável pela recombinação de características dos Pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características.

$$Cr = Cr ( h, P_c), \quad (2.37)$$

Onde: Cr = cruzamento

h = população

P<sub>c</sub>= probabilidade de cruzamento

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, o que fornece meios para introdução de novos elementos na população. Assim, a mutação assegura que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois este mecanismo altera levemente a direção da busca (JANG, 1997).

$$Mut = Mut (h, P_m), \quad (2.38)$$

Onde: Mut = mutação

h = população

P<sub>m</sub>= probabilidade de mutação

O Operador genético predominante é aplicado com probabilidade de cruzamento (P<sub>c</sub>),  $60\% \leq P_c \leq 90\%$  , devendo ser esta taxa maior que a probabilidade de mutação(P<sub>m</sub>), sendo, usualmente, utilizado o intervalo  $1\% \leq P_m \leq 9\%$ .

Os operadores genéticos são adaptados para lidar com estruturas do tipo árvore. Basicamente, três operadores genéticos são utilizados nesse tipo de estudo: cruzamento, mutação e alteração de arquitetura.

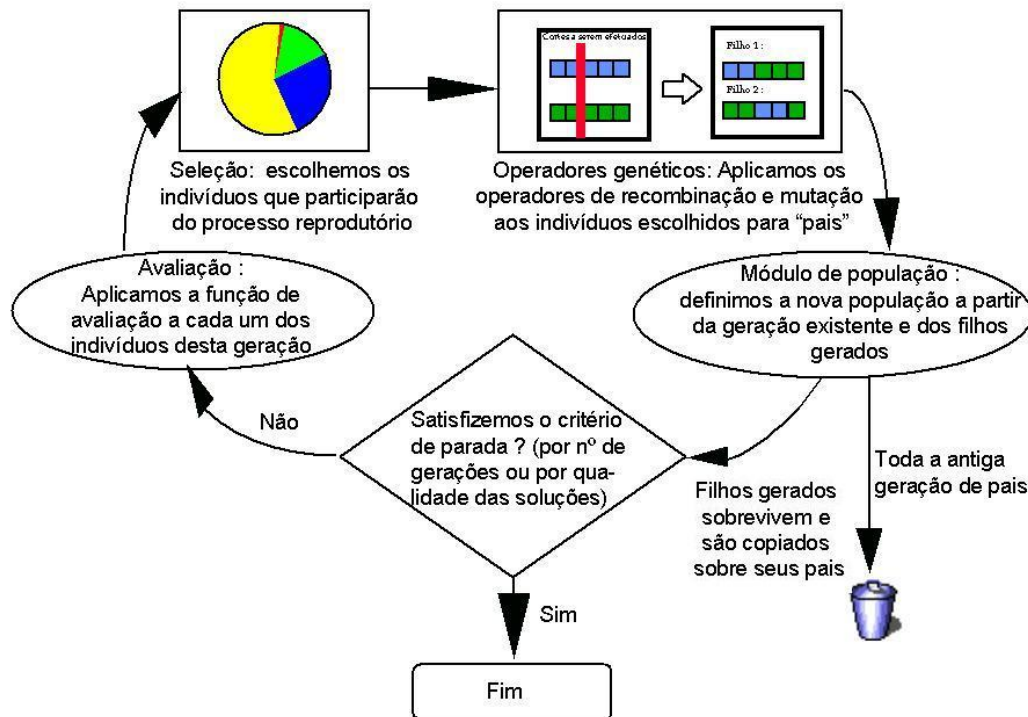


Figura 2.8 - Representação esquemática do Algoritmo Genético. Fonte: [www.algoritmosgeneticos.com.br](http://www.algoritmosgeneticos.com.br).

O operador de cruzamento, por exemplo, realiza a troca de indivíduos. Os dois Pais que participam de uma operação de cruzamento geralmente possuem tamanhos e formas diferentes. Um ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente em cada Pai. O Pai 1, cuja raiz é o ponto de cruzamento escolhido para ele, é substituído pelo Pai 2, cuja raiz é o ponto de cruzamento escolhido (REZENDE, 2005). Operação inversa ocorre quando o Pai 2 substitui o Pai 1. O interessante da operação de cruzamento na Programação Genética (PG) é que filhos diferentes podem ser produzidos por Pais iguais. Basta que os pontos de cruzamento selecionados sejam diferentes.

### 2.10.3 – Estratégias de Evolução



Essa abordagem foi proposta na década de 70 na Alemanha (RECHEMBERG, 1973) com o objetivo de resolver problemas hidrodinâmicos e de controle e tem sido usada, principalmente, por pesquisadores da Engenharia Civil.

A abordagem da estratégia de evolução utiliza mutações normalmente distribuídas para modificar vetores de valores reais. Os principais operadores utilizados são: mutação e cruzamento. Esses são utilizados tanto para busca no espaço de soluções quanto para busca no espaço de parâmetros de estratégia (REZENDE, 2005).

A Estratégia de Evolução (EE) busca o indivíduo com maior aptidão. A aptidão de um indivíduo é determinada executando o programa por ele representado através de um conjunto de dados de entrada. O desempenho do programa define sua aptidão, após várias gerações, pode ser obtida uma solução que resolve completa ou aproximadamente o problema apresentado.

A primeira versão das Estratégias de Evolução utilizava apenas operadores de seleção e mutação. Como as populações utilizadas tinham apenas dois indivíduos, esta versão foi chamada (1 + 1) – E E, ou EE com dois membros. Os dois indivíduos, um Pai e um Descendente, são vetores reais. O Descendente ou Filho é gerado através da aplicação do operador de mutação ao indivíduo-Pai e o melhor dos dois indivíduos se torna Pai na geração seguinte.

O operador de mutação adiciona valores produzidos de acordo com uma distribuição normal com média zero e desvio padrão “ $\delta$ ” para cada elemento do vetor Pai. Diferentes critérios de parada são utilizados, como tempo de processamento, número de gerações, progresso absoluto ou relativo por geração (REZENDE, 2005).

Uma segunda versão da técnica EE, chamada  $(\mu + 1)$  - EE, ou EE com vários membros, permite que mais de um Pai participe do processo de geração de um Filho.

Como sugerido pelo nome, Pais ( $\mu$ ) podem gerar um Filho ( $\lambda$ ). Com mais de um Pai, o algoritmo pode imitar a reprodução sexual. Para isso, ele incorpora um operador de cruzamento. Todos os Pais têm a mesma chance de participar da operação de cruzamento, e os Pais escolhidos geram um Filho. O indivíduo menos apto, entre a população atual e o filho gerado, é eliminado e os demais constituem a população da geração seguinte.

Uma terceira versão, chamada  $(\mu + \lambda)$  - EE, estende a versão anterior permitindo a geração de vários Filhos de vários Pais. Como o nome sugere, Pais podem produzir  $\lambda$  Filhos. Os melhores  $\mu$ , destes indivíduos  $(\mu + \lambda)$ , serão Pais na próxima geração. O operador de elitismo faz parte dessa versão. Em uma variante dessa terceira versão, conhecida como  $(\mu, \lambda)$  - EE, onde  $\lambda > \mu$ , os melhores indivíduos são selecionados utilizando apenas os Filhos,  $\lambda$ .

Embora exista a possibilidade da estratégia  $(\mu + \lambda)$  - EE, ignorar que a melhor solução atual seja aparentemente equivocada, ela permite ao algoritmo escapar de mínimos locais e seguir um movimento ótimo, além lidar com funções-objetivo ruidosas e auto adaptar os parâmetros da estratégia, sendo esta principal diferença entre EE's e AG's. Para um estudo mais profundo da matéria, detendo-se nas principais semelhanças e diferenças entre EE's e AG's a bibliografia citada deve ser consultada, em especial (HOFFMEISTER & BACK, 1990).

Em 2001, Oscar Gordon et al., na sua obra "*GENETIC FUZZY SYSTEMS EVOLUTIONARY TUNING AND LEARNING OF FUZZY KNOWLEDGE BASES*", apresenta um teorema para o Algoritmo Genético, que relaciona a frequência das modificações genéticas no indivíduo com os operadores de cruzamento e de mutação e a função aptidão.

Para isso, o autor considerou o número de iterações, " $m(h, t)$ ", sendo " $h$ " a população para numa geração " $t$ ". A Aptidão do Indivíduo está relacionada com

função objetivo “ $f(h)$ ”, e os operadores genéticos e a expressão da Evolução é dada por “ $E$ ”,  $E(m(h, t + 1))$  (Holanda, 1975; Goldberg, 1989) assumindo a expressão a seguir:

$$E(m(h, t + 1)) \cong n(h, t) \cdot \frac{f(h)}{\bar{f}} \cdot \left[1 - P_c \cdot \frac{\delta(h)}{l-1}\right] \cdot [1 - P_m]^{o(h)} \quad (2.39)$$

Sendo ainda, “ $\bar{f}$ ” a função objetivo média da população, “ $l$ ” o tamanho do vetor cromossoma, “ $\delta(h)$ ” o desvio padrão da população, “ $P_c$ ” a probabilidade de cruzamento e “ $P_m$ ” a probabilidade da mutação. O teorema afirma que a evolução se relaciona com o termo “ $\left[1 - P_c \cdot \frac{\delta(h)}{l-1}\right]$ ” responsável pela parcela competente ao cruzamento na evolução. Da mesma forma, o termo “ $[1 - P_m]^{o(h)}$ ” reflete os efeitos da mutação e o termo “ $\frac{f(h)}{\bar{f}}$ ” refere-se a seleção influencia a amostragem. Avaliando uma população de cromossomos, estima implicitamente a aptidão de todos os esquemas que correspondam (Holland, 1975).

### 3. DADOS EXPERIMENTAIS DE BABITONGA

O trabalho, aqui desenvolvido considera a construção de um modelo sob uma Rede ANFIS. Esse modelo se baseou nos estudos de advecção-dispersão disponíveis na literatura técnica. A partir das aplicações encontradas em publicações técnicas pode-se admitir que esse tipo de modelagem seja possível a aplicação em diversas áreas como, por exemplo, em estudos econômicos e estudos sobre impactos ambientais, além de avaliações em trabalhos sobre portos e bacias.

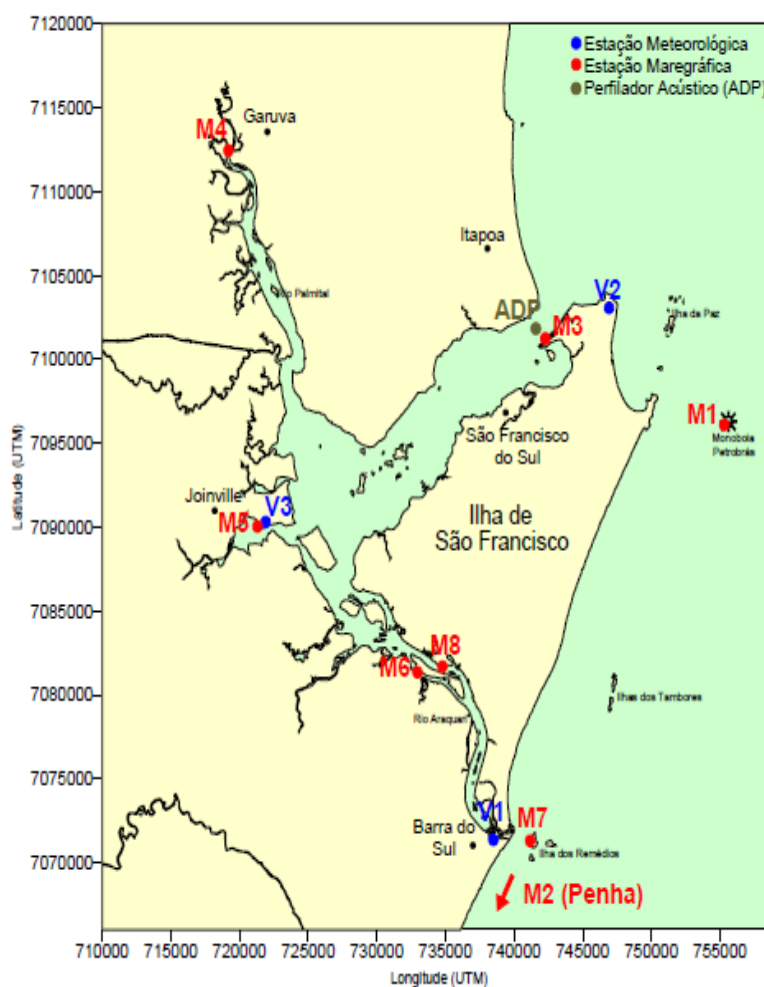


Figura 3.9 - Situação da área de estudo e a localização dos pontos de coleta dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos. Fonte: IME, 2003.

Para o desenvolvimento de um processo de solução adequado, em vista da dificuldade de levantamentos de novas informações, foi considerado o cenário proposto no trabalho realizado pelo IME, supracitado, além de estudos específicos de turbidez, onde estão disponíveis medições relativas aos oito pontos considerados relevantes para o presente estudo pontos  $M_1$  ao  $M_8$ , localizados ao longo da Baía de Babitonga, conforme apresentado na figura 3.1.

Pelo fato da construção do modelo ter sido baseada na equação da quantidade de movimento, adotando-se uma abordagem onde foi escolhido modelo Fuzzy TSK. Faz-se necessário para esse tipo de modelo as conclusões das regras são funções das variáveis de entrada. Assim, deve-se destacar que, para um modelo de entrada simples, devem ser definidas regras específicas, o que será feito em item posterior, cabendo aqui, apenas, a descrição dos elementos que constituem o cerne do modelo, denominados forçantes e a indicação das variáveis selecionadas para explicar o fenômeno.

### 3.1 – COLETA DE DADOS PARA O MODELO

Considerando-se que o problema tratado diz respeito ao escoamento no canal de Babitonga, as vazões e as forçantes serão as variáveis de maior importância na explicação do fenômeno em estudo. Assim, deverão ser levantadas todas as informações que permitam tratar esse problema.

Por outro lado, pode-se admitir que o escoamento aberto pudesse ser caracterizado pelos níveis d'água e pelas velocidades das correntes, no Canal do Linguado e na Baía da Babitonga, gerados pelos ventos, pelas marés e pelas contribuições fluviais. Essas condições gerais permitem supor que, em vista de ter esse canal pouca profundidade, os resultados ao longo do canal do Linguado/SC, deva ser considerada como dependentes de: batimetria, marés, ventos e rugosidade do canal.

## 3.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA MARÉ

Neste campo, a variável corrente será considerada, como a contribuição relativa à maré, para o sistema. Como condições de contorno, para a fronteira aberta do domínio, foram prescritos valores de elevação da superfície livre que possam variar ao longo do tempo e do espaço. Os valores de nível d'água impostos correspondem à maré medida nas proximidades da fronteira aberta. Em cada cenário, todos os nós da malha computacional pertencentes à fronteira aberta recebem a mesma série de valores de elevação da superfície livre, porém com uma defasagem no tempo para cada nó. A defasagem da propagação da maré ao longo do domínio foi calculada a partir do trabalho de HARARI & CAMARGO (1994).

As informações de nível de água foram obtidas através de sensores de pressão acoplados em correntógrafos acústicos *Falmouth 2-D* (Figura 3), marégrafo de pressão XL SERIES - *submersible data loggers* RBR (Figura 4) e um marégrafo *Orphimedes* da marca *OTT-Hidrometrie* (Figura 5). Este último trabalha segundo o princípio de borbulho de ar. Os dados foram amostrados a cada 20 minutos e armazenados no próprio equipamento. Os instrumentos foram dispostos nos diversos pontos de coleta da área de estudo (Quadro 3.1).

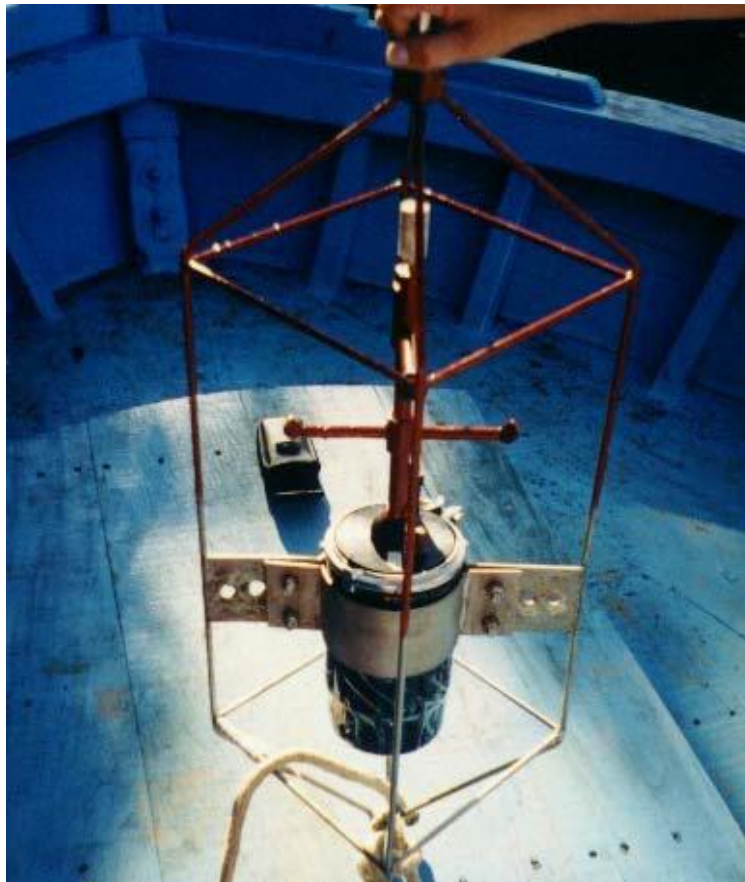


**Figura 3.2** - Estação metereológica Davis utilizada na medição de parâmetros. Fonte: IME, 2003.

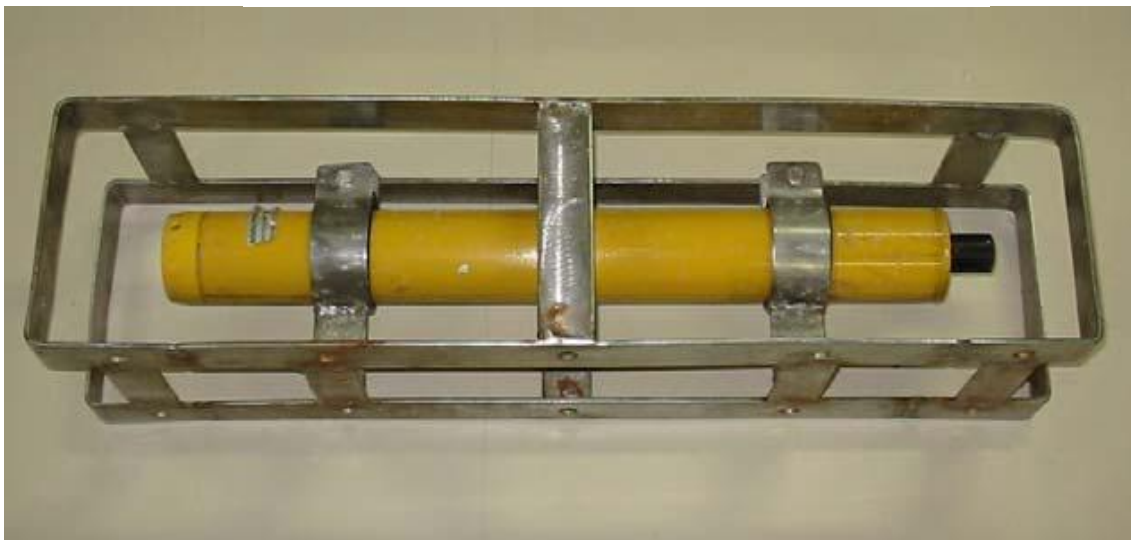
Os dados da amostra utilizada no presente estudo foram levantados a intervalos de 20 minutos e armazenados no próprio equipamento. Os instrumentos foram dispostos nos diversos pontos de coleta da área de estudo conforme pontos já apresentados. Através da utilização do método de Franco (1988), foram estimadas as principais constantes harmônicas. O fator de forma da maré,  $F$ , foi calculado segundo Femar (2000), possibilitando a classificação da maré. Os níveis apresentados para as estações maregráficas M1 e M2 são arbitrários, já as estações M3, M4, M5 M6, M7 e M8 foram niveladas em relação ao nível zero da DHN, representado pela média histórica dos níveis de baixamar das marés de sizígia.

**Quadro 3.1** - Localização das estações maregráficas ao longo da área de estudo. Fonte: IME, 2003.

	Localização	Latitude	Longitude
Est. Maregráfica 1-M1	Monobóia	26 <sup>o</sup> 13,80'	048 <sup>o</sup> 25,05'
Est. Maregráfica 2-M2	Penha	26 <sup>o</sup> 46,50'	048 <sup>o</sup> 38,50'
Est. Maregráfica 3-M3	Praia do Capri	26 <sup>o</sup> 10,90'	048 <sup>o</sup> 34,00'
Est. Maregráfica 4-M4	Montante do Rio Palmital	26 <sup>o</sup> 08,00'	048 <sup>o</sup> 48,50'
Est. Maregráfica 5-M5	IateClube Joinville	26 <sup>o</sup> 17,50'	048 <sup>o</sup> 46,00'
Est. Maregráfica 6-M6	Canal do Linguado (Norte)	26 <sup>o</sup> 22,00'	048 <sup>o</sup> 40,50'
Est. Maregráfica 7-M7	Ilha dos Remédios	26 <sup>o</sup> 27,40'	048 <sup>o</sup> 34,85'
Est. Maregráfica 8-M8	Canal do Linguado (Sul)	26 <sup>o</sup> 22,00'	048 <sup>o</sup> 39,00'



**Figura 3.3 - Correntógrafo Acústico, com sensor de pressão acoplado, utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficas M1, M2, M3, M4 e M6. Fonte: IME, 2003.**



**Figura 3.4 - Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água na estação maregráfica M7. Fonte: IME, 2003.**





**Figura 3.5** - Marégrafo de Pressão utilizado na determinação dos níveis de água nas estações maregráficas M5 e M8. Fonte: IME, 2003.

As marés são geradas pelas forças de atração da Lua e do Sol sobre a água. Estas forças se somam duas vezes durante um movimento de revolução da Lua, que seria o movimento em que a mesma gira ao redor da Terra. Essa soma de forças ocorre durante as luas cheia e nova, gerando as chamadas marés de sizígia. As mesmas forças se opõem duas vezes em cada ciclo, durante a lua crescente e minguante, produzindo marés de quadratura (MIGUENS, 1996).

Os resultados dessas forças explicam a diferença entre as marés. Diz-se maré de enchente quando ocorre variação da elevação de um ponto com altura mais baixa para um ponto mais alto que o observado para os pontos mais altos, e maré de vazante quando ocorre o contrário. Os momentos em que a altura de maré alcança valores de máximas e mínimas alturas são conhecidas como estofa de preamar e de baixamar, respectivamente.

A partir do levantamento de uma série temporal de dados, realizado pelo grupo de trabalho que elaborou o estudo do IME, para o ano de 2002, foi possível determinar as componentes harmônicas para predição da maré em datas selecionadas. Através da utilização do método de Franco (1988), foram estimadas as principais constantes

harmônicas. O fator de formação da maré, F, foi calculado segundo Femar (2000), esses cálculos permitiram elaborar uma classificação da maré.

Os níveis apresentados para as estações maregráficas M1 e M2 são arbitrários, já as estações M3, M4, M5 M6, M7 e M8 foram niveladas em relação ao nível zero do IBGE, bem como, a estimação das contribuições fluviais. Quanto à salinidade e a temperatura da água na área de interesse deste estudo, estas apresentaram padrões de comportamento similares à variação geral de nível, indicando a possibilidade de existir uma relação direta entre esses parâmetros como função dependente da maré (SCHETTINI, 1999).

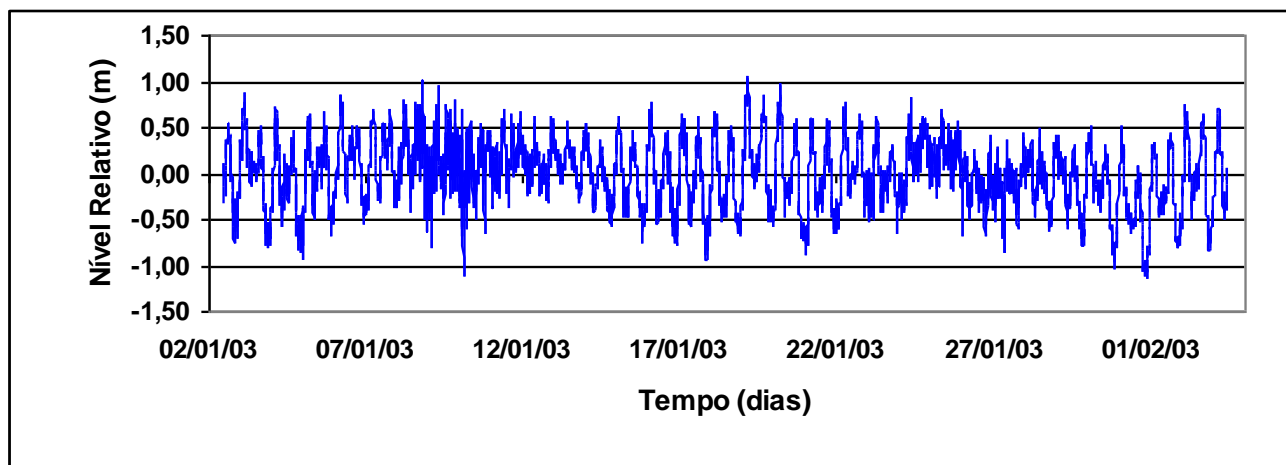


Figura 3.6 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M7 entre 02 jan e 03 fev 2003.

Na Figura 3.6, apesar do comportamento caótico do forçante maré, pode ser verificada uma variação, no intervalo de tempo para o qual se dispõe de dados, de aproximadamente, 01(um) metro acima ou abaixo da média, média essa aqui admitida como ponto zero, que pode ser traduzida numa variação total de vazão entre 0 (zero) m à 1 (um) m.

### 3.3 – DADOS DE BATIMETRIA NA BAÍA DE BABITONGA

Para a realização dos estudos propostos neste trabalho, fez-se necessário a obtenção da batimetria atualizada do Canal do Linguado e da Baía da Babitonga, das características sedimentológicas do leito da baía, ou seja, o tipo e a granulometria do

sedimento de fundo, e dos dados meteorológicos e oceanográficos. Esses novos dados, devidamente analisados e tabulados, serão apresentados no próximo item.

Os trabalhos de levantamento batimétrico foram efetuados por uma equipe composta de três profissionais do INPH. Na metodologia adotada, a correção da maré foi realizada automaticamente pelo programa *Hypack* e os valores dos níveis d'água foram obtidos das leituras das réguas em intervalos de 10 minutos sendo, posteriormente, objeto de um trabalho, com vistas a compatibilizá-los com os dados históricos.

O *datum* horizontal adotado foi o WGS 84 e a escala considerada para o levantamento batimétrico foi de 1:10.000 para a Baía da Babitonga e de 1:2.000 para o Canal do Linguado, tem-se conseqüentemente as linhas batimétricas de sondagens espaçadas de 100 e de 20 metros respectivamente. O levantamento batimétrico realizado é, sem dúvida, o mais completo já efetuado na Baía da Babitonga, totalizando cerca de 230 km<sup>2</sup> de área levantada.

Os perfis batimétricos foram realizados empregando-se um ecobatímetro marca *Raytheon* modelo DE - 719 D. O sistema de aquisição para transformação de dados analógicos em dados digitais utilizado foi o da *Digitrace*. O sistema de posicionamento DGPS com G12 foi utilizado no trabalho. Como sistema de comunicação, utilizou-se um link de rádio modelo RFM 96. A aquisição e o processamento de dados foram feitos através de um notebook. O planejamento, inicialização e processamento das áreas a serem sondadas foram feitos através do software *Hypack*.



**Figura 3.7 - Preparação e instalação dos equipamentos. Fonte: IME, 2003.**



**Figura 3.8 - Equipe navegando e executando a batimetria. Fonte: IME, 2003.**

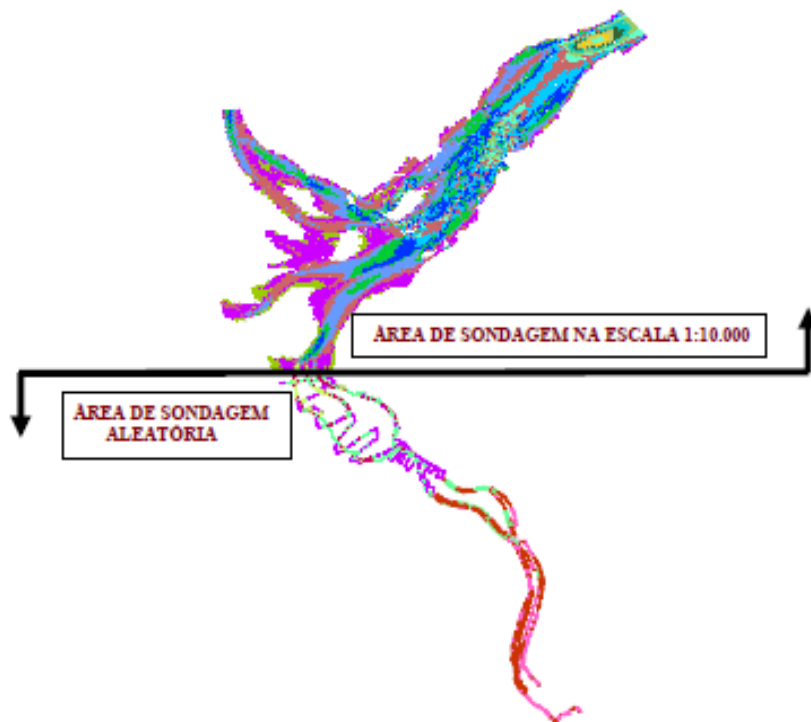


Figura 3.9 - resultado de batimetria. Fonte: IME,2003.

A referência de níveis adotada foi o Zero da DHN para a batimetria da região de domínio computacional utilizada. A Figura 3.9 apresenta o domínio computacional e a batimetria utilizada no modelo matemático, conforme o detalhe na região de interesse. Na Baía da Babitonga a escala foi respeitada em quase sua totalidade, ou seja, foram realizadas sondagens em linhas transversais ao canal principal a cada 100 metros.

No Canal do Linguado, nas regiões próximas ao aterro, não foi possível *executar* a sondagem na escala especificada. Em conseqüência, foi adotado um procedimento alternativo de sondagem aleatória, buscando o talvegue dos canais existentes, onde era possível navegar, principalmente nos períodos compreendidos entre a meia maré de enchente até a meia maré de vazante. O mesmo ocorreu na região adjacente à Barra do Sul (IME,2003).

A partir das informações acima descritas pode-se admitir que esse forçante possa ser representado por uma variável Fuzzy variando entre 0(zero) m à 15(quinze)m.

### 3.4 - VALORES DE RUGOSIDADE NA BAÍA DE BABITONGA

A distribuição espacial das texturas sedimentares predominantes mostra o domínio de areias ao longo da desembocadura do Canal do Linguado. Nas proximidades do molhe norte, onde está localizado o canal mais profundo, observa-se o domínio de areias médias, pobremente selecionadas, com assimetria negativa e uma distribuição leptocúrtica.

A espacialização das características texturais dos sedimentos de fundo da baía da Babitonga, apresentada sinteticamente na Figura 3.9, demonstra que os sedimentos presentes no complexo estuarino dividem-se em duas classes com características de deposição distintas. Têm-se, assim, sedimentos mais grossos, classificados como areias, e mais finos, classificados como lamas (silte + argila), o que permite identificar ambientes distintos de sedimentação relacionados, principalmente, com a profundidade e com os padrões de circulação estabelecidos no interior do estuário (VIEIRA et al., 2008).

No interior da baía, ocorrem canais com profundidades entre 5 m e 10 m, que podem condicionar a formação de vias preferenciais de circulação e promover áreas de maior hidrodinâmica. Estes canais estão localizados principalmente próximos a margem nordeste do Canal do Palmital e no início do Canal do Linguado, em sua margem leste.

De acordo com a classificação de Larsonneur (1977 *apud* Dias & Medeiros 2005), os sedimentos de fundo da baía da Babitonga podem ser agrupados em duas fácies distintas em função da quantidade de carbonato biodetrítico: litoclástica (carbonatos < 30 %) e litobioclástica (carbonatos < 50 %). A quantidade de carbonato presente nos sedimentos possui correlação negativa, ou inversa, com o diâmetro médio dos sedimentos dado em “phi” ( $r = -0,20 / p < 0,05$ ), ou seja, a porcentagem de carbonato aumenta proporcionalmente com o tamanho dos grãos.

**Quadro 3.2 - Resultados das análises estatísticas na Baía de Babitonga/SC.Fonte: TRUCCOLO,2008.**

<b>GRUPOS</b>	<b>TAMANHO MÉDIO ( phi)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>CARBONATO (%)</b>	<b>MATÉRIA ORGÂNICA (%)</b>	<b>FINOS (%)</b>	<b>AREIA (%)</b>
<b>GRUPO 1</b>	2,38 + 0,54	0,83 + 0,59	16,86 + 13,43	1,27 + 1,33	7,41 + 7,34	92,54 + 7,56
<b>GRUPO 2</b>	3,10 + 0,68	1,68 + 0,57	12,02 + 5,22	2,67 + 1,87	31,71 + 12,42	69,78 + 7,56
<b>GRUPO 3</b>	4,90 + 0,92	2,10 + 0,70	12,36 + 4,94	5,53 + 1,96	75,62 + 19,90	26,26 + 21,60

O modelo hidrodinâmico considerou o mapeamento geomorfológico na obtenção de correlações nos campos de correntes relativos aos vários cenários de interesse, os fatores relacionados com o atrito, a turbidez. A partir dos resultados, classificamos a rugosidade do canal do Linguado/SC, conforme o coeficiente de Manning de 0,000 a 0,004.

### 3.5 – CIRCULAÇÃO DOS VENTOS NA BAÍA DE BABITONGA

Na área de entorno da Baía da Babitonga foram instaladas três estações meteorológicas marca Davis (Figura 3.2). A primeira foi instalada na parte superior de um prédio, em Barra do Sul (V1), correspondendo às coordenadas 26<sup>0</sup> 27,2' S e 048<sup>0</sup> 36,1' W, ficando cerca 40 m de altitude. A segunda foi alojada na área interna do Forte Marechal Luz (V2), em São Francisco do Sul, correspondendo às coordenadas 26<sup>0</sup> 09,9' S e 048<sup>0</sup> 31,7' W, com cerca de 140 m de altitude. A terceira foi disposta nas dependências do Iate Clube de Joinville (V3), ficando com cerca de 4 m de altitude nas coordenadas 26<sup>0</sup> 17,5' S e 048<sup>0</sup> 46,0' W. Os valores de velocidade e direção do vento foram amostrados a cada hora e armazenados no próprio equipamento. Após, estes foram passados para um computador e devidamente processados.

O regime de ventos na região de estudo é influenciado por processos atmosféricos de escalas temporais e espaciais diferentes. Ventos provenientes do quadrante norte, principalmente de nordeste, predominam durante todo o ano. Estes

ventos sinóticos são gerados pelo sistema semi-estacionário de alta pressão atmosférica, figura 3.10, denominado de Anticiclone do Atlântico Sul (AAS) ou Alta Subtropical do Atlântico que, segundo Fedorova (2001) possui uma localização média em torno de 30° S (TRUCCOLO, 2011).

Os ventos úmidos e fracos são característicos para a região, devido à grande escala espacial deste sistema, que atuam em toda a costa sul e sudeste e parte da nordeste do Brasil, figura 3.10, ocorre, no entanto, mudanças nas condições meteorológicas nas regiões sul e sudeste, geralmente associadas à passagem, formação ou intensificação de frentes frias, sistemas meteorológicos sinóticos típicos de latitudes médias e atuantes no litoral brasileiro em todas as épocas do ano (Kousky, 1979; Satyamurty et al., 1998).

Durante o período considerado no levantamento de informações (05/12/2002 - 17:00h até 08/04/2003 - 10:00h) a estação Meteorológica V1 apresentou um pico máximo de intensidade de vento de 17,0 m/s e uma média de 4,32 m/s. As maiores velocidades estão relacionadas com o quadrante sudeste. A Figura 3.10 abaixo representa a série temporal de componente “Este” e “Norte” do vento.

Os resultados relativos às estações meteorológicas V2 e V7 estão apresentados no anexo do relatório. Durante o período considerado no levantamento, que incluiu o mesmo período coberto pelo levantamento da estação V1, (05/12/2002 17:00h até 08/04/2003 10:00h). As maiores velocidades estão relacionadas com o quadrante sudeste. A Figura 3.11 apresenta a série temporal de componente “Este” e “Norte” do vento. (IME, 2003)



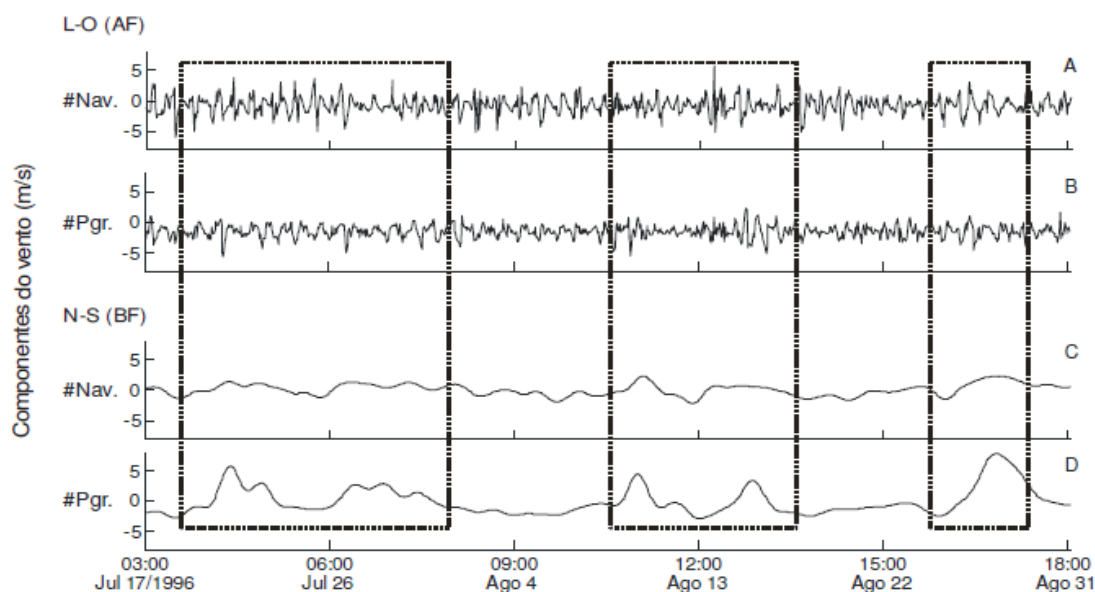


Figura 3.10 - Componentes leste-oeste (ab) e norte-sul (cd) do vento para a #Nav e #PGr. Valores positivos das componentes indicam ventos provenientes de sul e oeste. Componentes de alta frequência e baixa frequência são denominados de AF e BF, respectivamente (TRUCCOLO, 2011).

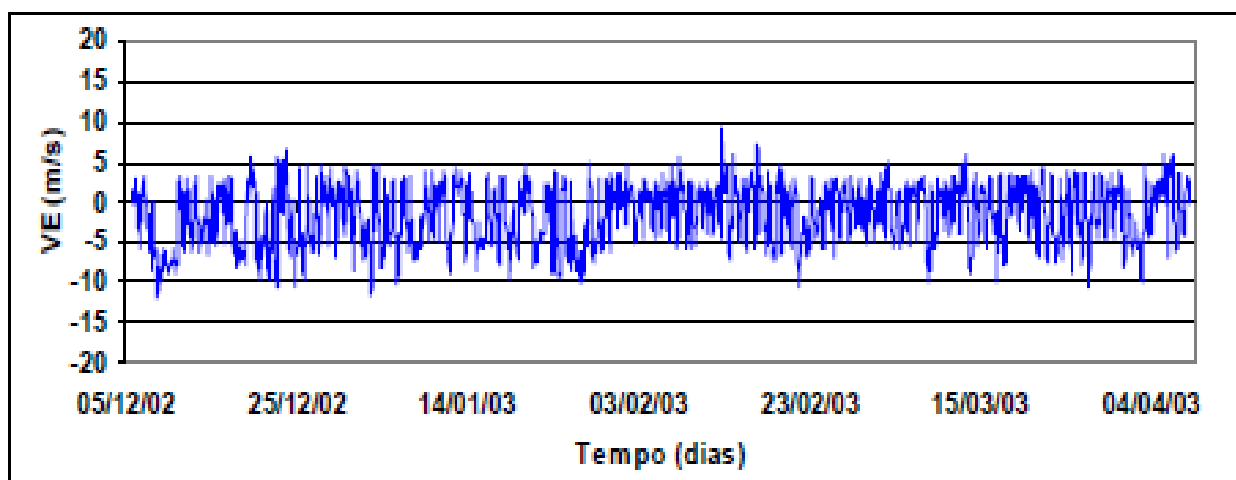
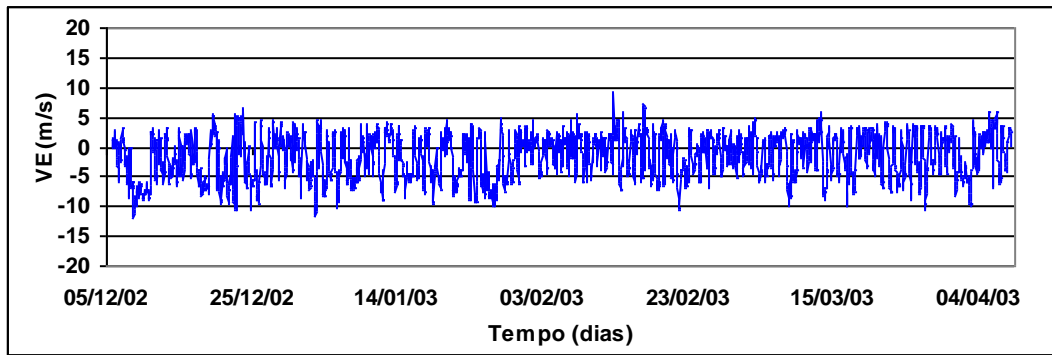


Figura 3.11 - Séries temporais de a) componente Este e b) componente Norte medidos na estação meteorológica V2 (convenção vetorial).

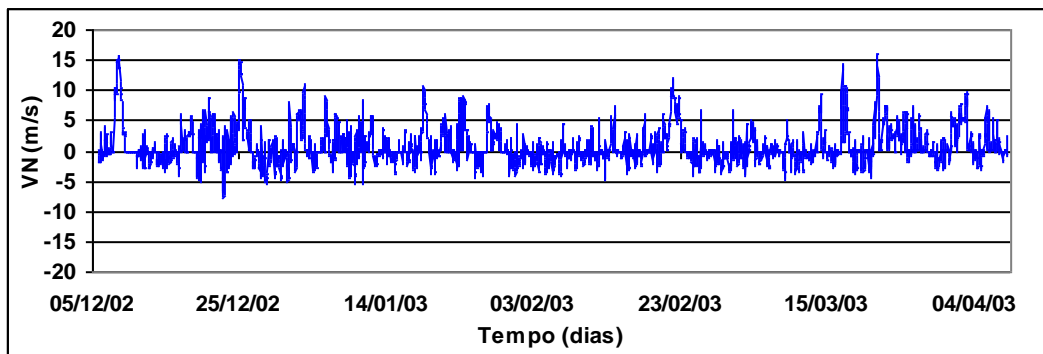
A partir das figuras 3.10 e 3.11 pode-se verificar um comportamento complexo, semelhante ao da forçante maré, no entanto, apesar do comportamento caótico do forçante ventos, pode-se admitir que esse comportamento possa ser expresso por uma variável Fuzzy, dentro do intervalo, de 10 (dez) m/s à 0 (zero) m/s. Os resultados

relativos às estações meteorológicas V2 e V3 serão apresentados no próximo relatório.

Durante o período amostrado (05/12/2002 17:00h até 08/04/2003 10:00h) a estação Meteorológica V1 apresentou um pico máximo de intensidade de vento de 17 m/s e uma média de 4,32 m/s. As maiores velocidades estão relacionadas com o quadrante sudeste. As Figuras 3.12-a e 3.12-b apresentam as séries temporais de componente Este e Norte do vento. A Figura 3.8 apresenta a mesma informação na forma de diagrama de dispersão. A Figura 3.13 mostra que o vento predominante soprou do quadrante nordeste, seguido por noroeste (convenção vetorial).

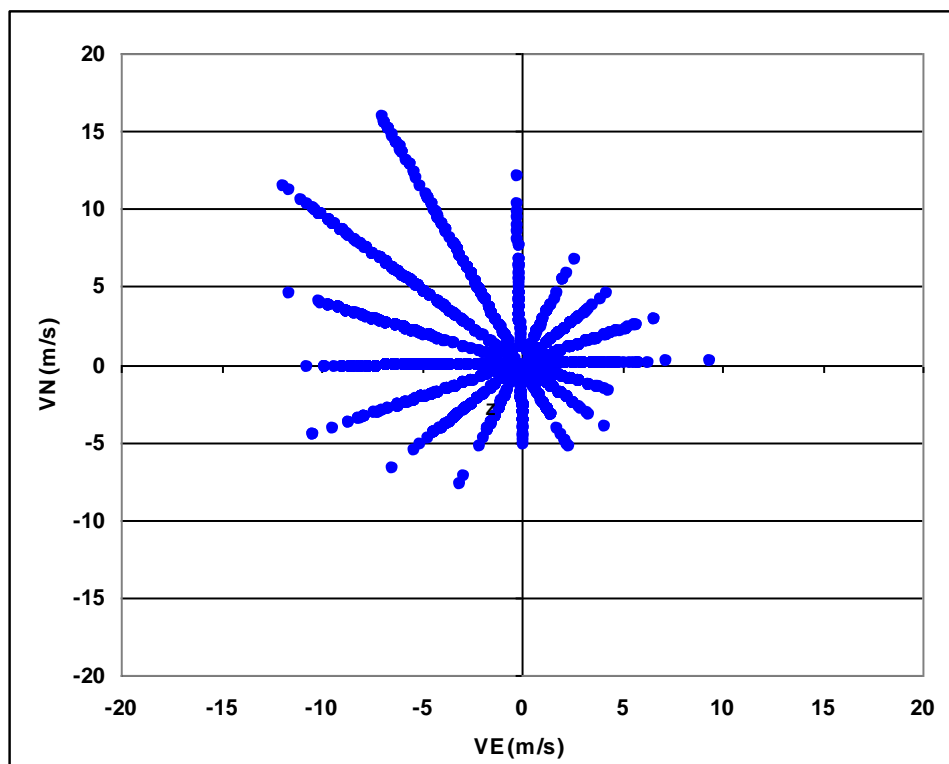


a)



b)

3.12 - Séries temporais de a) componente Este e b) componente Norte medidos na estação meteorológica V1 (convenção vetorial). Fonte: IME, 2003.



**Figura 3.13** - Diagrama de dispersão das componentes Este e Norte dos vetores de vento medidos na estação meteorológica V1 (convenção vetorial). Fonte: IME, 2003.

Durante o período amostrado (05/12/2002 17:00h até 08/04/2003 10:00h) a estação Meteorológica V1 apresentou um pico máximo de intensidade de vento de 17 m/s e uma média de 4,32 m/s. As maiores velocidades estão relacionadas com o quadrante sudeste. As Figuras 7-a e 7-b apresentam as séries temporais de componente Este e Norte do vento. A Figura 8 apresenta a mesma informação na forma de diagrama de dispersão. A Figura 9 mostra que o vento predominante soprou do quadrante nordeste, seguido por noroeste (convenção vetorial).

As Figuras 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam os resultados obtidos de níveis de água amostrados nas estações maregráficas M1, M2, M7 e M8. O quadro 3.3 apresenta os valores dos níveis mínimos e máximos, da oscilação máxima, do Fator de Forma F e da classificação da maré, para cada estação maregráfica.

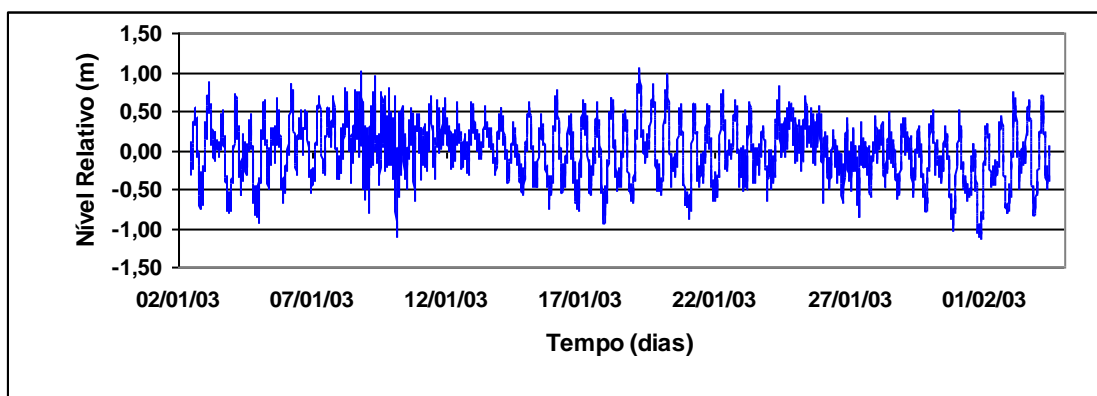


Figura 3.104 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M1 entre 02 de janeiro e 03 de fevereiro de 2003. Fonte: IME, 2003.

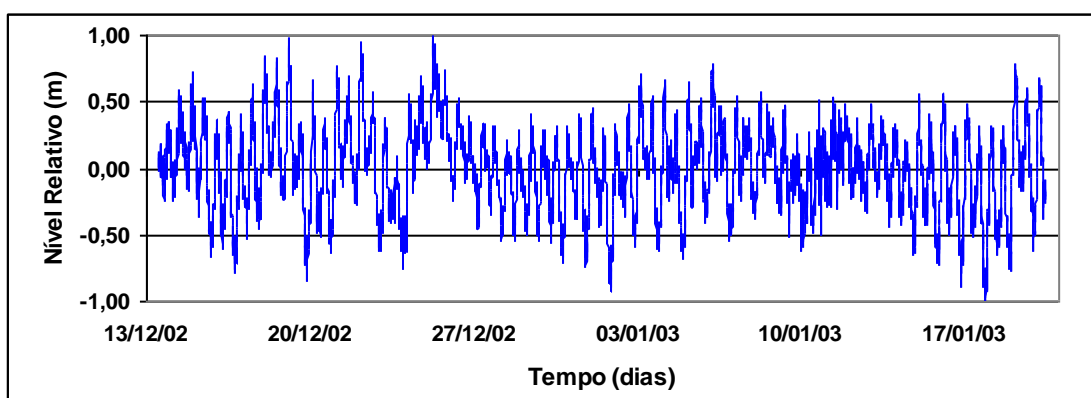


Figura 3.11 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M2 entre 13 de dezembro de 2002 e 20 de janeiro de 2003. Fonte: IME, 2003.

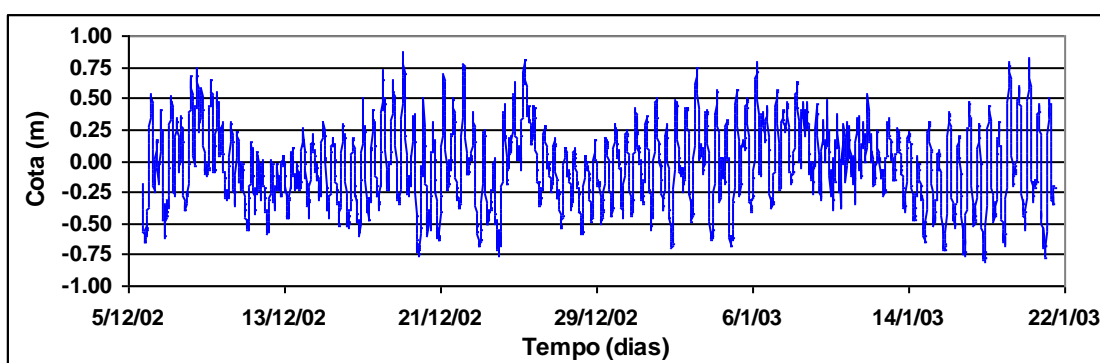
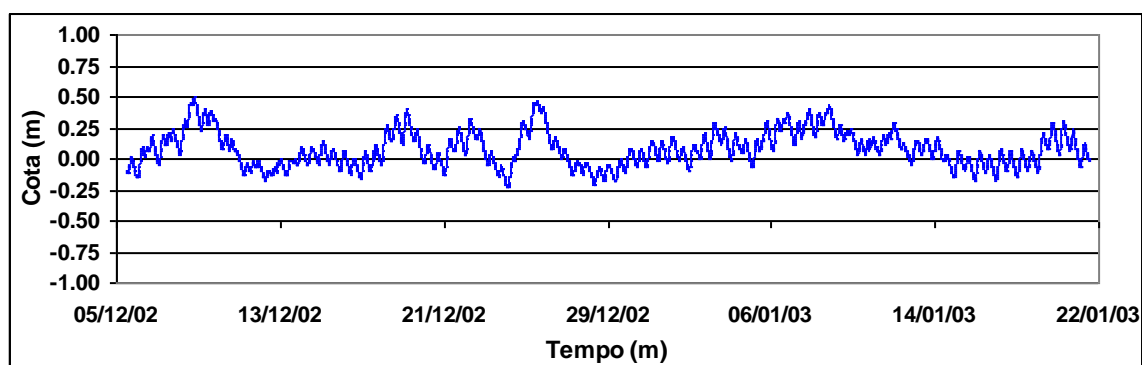


Figura 3.16 - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M7 entre 05 de dezembro de 2002 e 21 de janeiro de 2003. Fonte: IME, 2003.

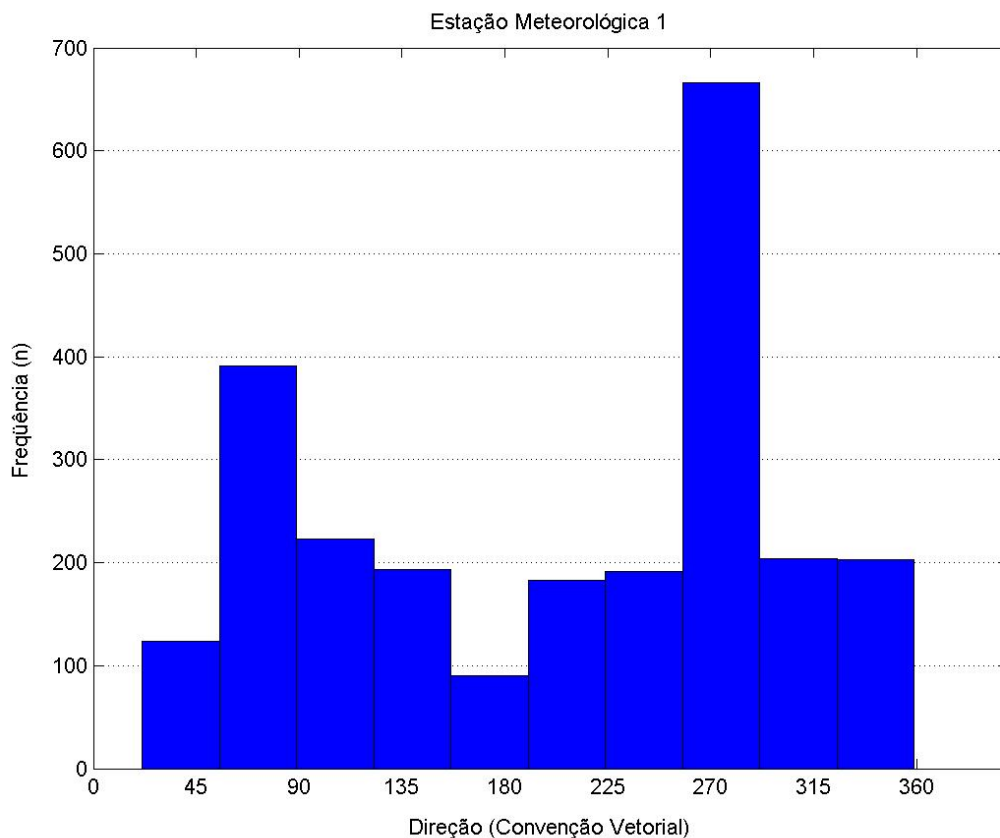


**Figura 3.17** - Série temporal de nível d'água medida na estação maregráfica M8 entre 05 de dezembro de 2002 e 21 de janeiro de 2003. Fonte: IME, 2003.

O quadro 3.3 apresenta as constantes harmônicas calculadas a partir das informações de nível de água, o valor do Fator de Forma  $F$  e a classificação da maré, para cada estação maregráfica. Para todas as estações maregráficas ocorreu, durante o período amostrado, a predominância da componente  $M2$ , seguida pela  $S2$ .

Constante Harmônica	Estação Maregráfica M1		Estação Maregráfica M2		Estação Maregráfica M7		Estação Maregráfica M8	
	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase
$M2$	31.50	87.91	27.96	84.78	29.19	117.76	6.08	165.42
$S2$	20.33	66.83	15.69	58.05	16.09	95.87	3.19	142.08
$O1$	11.26	92.47	9.51	101.68	10.44	115.97	3.65	159.14
$M4$	10.71	168.27	7.80	147.32	8.81	221.52	1.31	247.16
$N2$	4.90	178.87	5.27	177.08	5.87	211.60	1.10	254.23
$K1$	5.94	127.60	8.11	122.76	6.10	145.35	1.48	199.52
$K2$	5.53	65.12	4.27	55.88	4.38	94.10	0.87	140.19
Fator $F$	0.3318		0.4036		0.3652		0.5534	
Classificação	Semidiurnas com desigualdade diurna		Semidiurnas com desigualdade diurna		Semidiurnas com desigualdade diurna		Semidiurnas com desigualdade diurna	

Quadro 3.3 - Principais constantes harmônicas determinadas nas estações maregráficas M1, M2, M7 e M8 com suas amplitudes (cm), fases (graus), valor do Fator  $F$  e classificação da maré. Fonte: IME, 2003. Obs.: em todas as estações a classificação considerada foi: Semi-diurna com desigualdade diurna.



**Figura 3.18** - Frequência da direção dos ventos medido na estação meteorológica V1 (convenção vetorial). Fonte: IME, 2003.

### 3.6 – SEDIMENTOS NO CANAL DO LINGUADO

O Complexo Hídrico da Baía da Babitonga teve seu mapeamento geomorfológico feito pela Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA, 2002) na escala 1:100.000, dividindo a região de Joinville em dois grandes táxons. O primeiro é composto por quatro diferentes Domínios Moro estruturais que, por sua vez, comportam um segundo táxon, as Unidades Geomorfológicas, que representam o resultado da *atuação de diversos processos morfogênicos* (OLIVEIRA F., 2006).



vez que deveria ser considerado: (1) necessidade de efetuar o conjunto de medições no mesmo dia, de modo a registrar um momento hidrológico semelhante para todos os rios e permitir comparações; (2) circuito total de aproximadamente 80 km a ser percorrido em curto intervalo de tempo disponível para realizar os procedimentos (cerca de 4 horas) devido à influência de maré; (3) diminuição de custos; (4) disponibilidade de ajuda.



Figura 3.20 – medida de vazão no canal. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

Quanto a coleta e as medidas de turbidez no Canal, as amostras de água foram coletadas regularmente entre abril de 2004 e maio de 2006 por ocasião das medições de vazão de frequência mensal, perfazendo um total de 26 meses de amostragem contínua, com 260 amostras coletadas.





Figura 3.21 - Procedimento de leitura de turbidez em bateria de amostras. Fotos: OLIVEIRA F., 2006. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

As leituras efetuadas leituras de turbidez foram feitas em quadruplicatas para cada amostra coletada. Havendo disparidade de valores, as leituras foram repetidas até apresentarem valores aproximados. Partes das amostras foram utilizadas para a quantificação dos sedimentos em suspensão. O peso final referente ao conteúdo do sedimento é dado pela diferença do peso das membranas com e sem sedimentos, cujo resultado é transformado em mg/L.

A quantificação de matéria orgânica foi realizada pela técnica apresentada por MELO *et al.* (1975). O conjunto de membranas é acondicionado em cadinhos ou cápsulas de porcelana, que foram previamente limpas, secas por uma hora em mufla à temperatura de 500<sup>o</sup>C, resfriadas e pesadas. Para se evitar a explosão das membranas pela alta temperatura quando introduzidas na mufla, estas são queimadas nas cápsulas com um pouco de álcool.

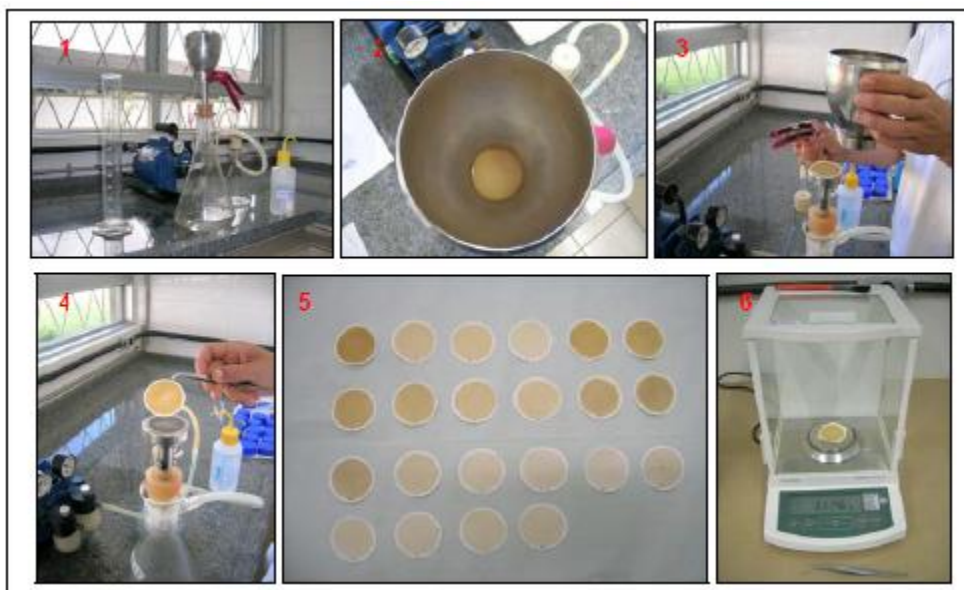


Figura 3.22 -procedimento de filtração em membranas de éster de celulose: (1) conjunto de filtração; (2, 3, 4) membrana no porta filtro após filtração; (5) conjunto de membranas após filtração de bateria de amostras, organizadas para secagem em estufa; (6) pesagem em balança analítica após secagem. Fotos: OLIVEIRA F., 2006.Fonte: OLIVEIRA F., 2006.



Figura 3.23 - procedimento de queima de matéria orgânica: (1) colocação das membranas em cápsulas previamente secas e pesadas; (2) queima com álcool; (3) queima em forno tipo mufla. Fotos: OLIVEIRA F., 2006.Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

### 3.7 - SÚMULA DOS DADOS

O resultado do trabalho de levantamento de informações das variáveis de interesse do estudo, descrito nos itens anteriores, para as variáveis Batimetria, Maré, Ventos e Rugosidade, após análise de coerência e consistência das informações, foi tabulado e está apresentado no quadro 3.4, de forma sintética e as informações relativas à deposição de Sedimentos, Área e Vazão estão apresentadas no quadro 3.5.

<b>Pontos</b>	<b>Batimetria (m)</b>	<b>Maré (m)</b>	<b>Ventos (m/s)</b>	<b>Rugosidade</b>	<b>Y, Vazão (m/s)</b>
1	0,5	0,9	9,0	0,015	1,05
2	4,5	0,9	2,0	0,030	1,00
3	4,0	0,2	6,0	0,020	0,40
4	2,5	0,7	6,0	0,010	0,60
5	4,0	0,3	8,0	0,020	0,40
6	4,5	0,6	6,0	0,015	0,50
7	2,0	0,7	7,0	0,010	0,60
8	2,0	0,7	8,0	0,010	0,60
9	1,0	0,8	7,0	0,000	1,00
10	1,0	0,8	9,0	0,000	1,00
11	1,0	0,6	6,0	0,000	0,70
12	3,5	0,7	2,0	0,015	0,90
13	4,5	0,6	4,0	0,015	0,60
14	4,5	0,6	5,0	0,025	0,70
15	3,0	0,7	9,0	0,000	0,70
16	4,0	0,7	9,0	0,010	0,90
17	2,0	0,7	6,0	0,000	0,70
18	3,5	0,9	2,0	0,015	0,90
19	5,0	0,6	4,0	0,020	0,60
20	2,0	0,8	5,0	0,015	0,70

Quadro 3.4 - Valores das forçantes ao longo da Baía da Babitonga/SC.

Fonte: IME, 2003 e OLIVEIRA F., 2006.

<b>Observação</b>	<b>Vazão (m/s)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Sedimentos (NTU)</b>
1	0,40	50	2
2	0,40	50	4
3	0,50	50	5
4	0,60	125	6
5	0,70	150	8
6	0,90	175	8
7	1,00	200	8
8	1,00	225	10

Quadro 3.5 - Valores de sedimentos para o canal do Linguado/SC.

Fonte: IME, 2003 e OLIVEIRA F., 2006.

## 4 – MODELO PROPOSTO

Prever com uma precisão aceitável a vazão da água do mar é importante para uma grande variedade de atividades relacionadas ao mar, à baía e aos diversos corpos d'água de interesse para algum tipo de atividade como, por exemplo, o transporte comercial costeiro e a construção de plataformas *offshore*. Por isso, a execução dessa tarefa, exige um monitoramento de ecossistemas marinhos e uma grande pesquisa oceanográfica, principalmente devido ao volume de água movimentado (PIERINI et al., 2013).

Deve-se observar que a variação do nível de água pode ser estudada por um modelo numérico hidrodinâmico, cuja precisão depende da precisão do conhecimento do campo de forças, parâmetros e condições de contorno ou por abordagens utilizando técnicas de inteligência artificial. A abordagem feita através de modelos numéricos, de modo geral é caracterizada por um grande número de prognósticos e variáveis, requerendo assim um grande esforço computacional (PIERINI et al., 2013).

Alguns estudos, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs), para construir um modelo hidrodinâmico, têm o objetivo de tentar superar o problema da relação não linear entre sistemas físicos e a previsão de fenômenos no ambiente marinho. Williams 1994, Grubert 1995, Mase 1995, Mase et al., 1995. Vaziri, 1997, propôs modelos RNA para prever a movimentação da água no Mar Cáspio. Esse modelo pretendia indicar o nível mensal de águas superficiais. Deo e Chaudhari, 1998, formularam um modelo utilizando a técnica RNA, treinando algoritmos, cujo erro de retropropagação, mantinha uma correlação em cascata e ajustava a função multivariável por meio de gradientes conjugados, prevendo com isso a maré. Tsai e Lee (1999) examinaram a aplicabilidade de uma rede de back-propagation (BPN) para prever a hora variação das marés.

Por outro lado, a literatura acadêmica aponta estudos na Baía de *Westernport* utilizando modelos numéricos de qualidade da água e transporte de sedimentos,

desenvolvidos para avaliar o impacto ambiental. Um desses modelos inclui os efeitos do vento, da maré e da inclinação da superfície da água (HINWOOD, 1979).

Os modelos consistem em resolver as equações hidrodinâmicas para “águas rasas” em duas dimensões, utilizando elementos finitos, sendo a resposta do modelo o resultado da altura da maré, com os seus dois componentes de velocidade (VAN RIJNET *et al.*, 2004).

O modelo proposto para o presente estudo está constituído por duas partes. A primeira calcula a vazão da Baía de Babitonga/SC, utilizando um modelo hidrodinâmico híbrido, combinando da rede Neural e lógica Fuzzy (ANFIS) e a segunda consiste de um modelo híbrido de transporte de Algoritmos Fuzzy-Genéticos, que calcula o transporte de sedimentos, utilizando a vazão calculada pela primeira parte para a vazão que atravessa o canal do Linguado na Baía de Babitonga/SC.

#### 4.1 – MODELO HIDRODINÂMICO HÍBRIDO

A vazão da água do mar é um processo não estacionário, porque dependem de variáveis, como marés, temperatura, salinidade e pressão atmosférica; Além disso, esse processo depende, também, da orla costeira e da batimetria. Portanto, o processo físico do nível do mar tem ampla variabilidade e é de estimação complexa, não sendo totalmente conhecido e compreendido (LOVALLO *et al.* 2012). O estudo desse processo torna-se mais complexo na área de *offshore* devido à batimetria e geomorfologia costeira.

Deve-se destacar que um fator importante nos estudos a respeito da variação do nível da água do mar que é uma limitação para a execução desses estudos, pode ser observado pelo fato de existirem somente algumas estações costeiras; de fato, devido ao alto custo das medições de dados de campo, as observações de nível de água estão

disponíveis apenas para um número limitado de locais em uma determinada região para um longo período de observação.

O modelo aqui proposto está calcado na tradução do conhecimento a respeito do fenômeno hidrodinâmico, para a construção da rede Neuro-Fuzzy. Para isso a formulação do modelo considerou como condição de contorno para a dinâmica do processo de movimentação na Baía de Babitonga, que as linhas de correntes individuais do escoamento são, apenas, ligeiramente convergentes e, em consequência, pode-se considerar como uma boa aproximação a hipótese de que elas possam ser admitidas como paralelas. Essa hipótese é importante de vez que com isso, se pode considerar que a linha de gradiente hidráulica coincidirá com a superfície do líquido.

Quanto às linhas de energia, estas serão admitidas a partir das distâncias correspondentes das respectivas cargas cinéticas. Portanto, o tratamento unidimensional da linha de energia – linha de gradiente hidráulica – pode ser usado no problema. Essas condições de contorno para tratamento do problema permitem definir os forçantes do modelo.

Para a ANFIS, outro importante ponto a ser considerado na sua construção, o diz respeito ao processo. Para isso serão definidas, primeiramente, as variáveis linguísticas, considerando-se, aqui, o raciocínio *Fuzzy* do modelo e a estrutura ANFIS do modelo proposto por Jothiprakash *et al.*, em 2009.

#### 4.1.1 – VARIÁVEIS LINGUISTICAS FUZZY

Os modelos matemáticos que usam lógica *Fuzzy* utilizam um sistema, onde os dados de entrada são identificados através das variáveis linguísticas. A partir das considerações iniciais do modelo hidrodinâmico, descritas nos itens anteriores, foi possível “*fuzzificar*” as variáveis linguísticas, na forma de números *Fuzzy* triangulares, e

atribuir seus respectivos valores. Neste contexto a fuzziificação foi o processo pelo pode-se representar uma quantidade "crisp".

Ross (2004) sugere que isto pode ser feito reconhecendo que as quantidades consideradas são nítidamente determinísticas e em sendo determinísticas podem carregar consigo um grau de incerteza considerável. Sendo a incerteza originada da imprecisão ou da ambigüidade, a variável pode ser "Fuzzyficável" e também pode ser representada por uma função de pertinência. No cenário estudado a informação é passível de uma gama de erros para uma leitura, representando tal imprecisão.

A representação de dados imprecisos por conjuntos difusos, bem como sistemas complexos, é um instrumento útil para se utilizar sistemas Fuzzy (ROSS, 2004). Com isso, as variáveis do modelo foram "Fuzzyficadas", conforme pode ser visto a abaixo, dentro dos respectivos valores atribuídos:

A variável "MARÉ" ficou definida como:

Maré "Alta", no intervalo de 0,8 m até 1,0m , para valores de 0,7 até 1,0;  
Maré "Média", no intervalo de 0,7 m até 0,4m , para valores de 0,4 até 0,6; e  
Maré "Baixa", no intervalo de 0,3 m até 0 m , para valores de 0,0 até 0,3.

A "BATIMETRIA" ficou definida como:

Batimetria "Alta", no intervalo de 5 m até 4 m, para valores de 0,7 até 1,0;  
Batimetria "Média", no intervalo de 3 m até 2 m, para valores de 0,4 até 0,6; e  
Batimetria "Baixa", no intervalo de 1 m até 0 m, para valores de 0,0 até 0,3.

A "RUGOSIDADE" ficou definida, a partir do coeficiente de *Manning*, como:

Rugosidade "Alta", no intervalo de 0,04 até 0,03, para valores de 0,7 até 1,0;  
Rugosidade "Média", no intervalo de 0,02 até 0,01, para valores de 0,4 até 0,6; e  
Rugosidade "Baixa", no intervalo de 0,009 até 0,0 , para valores de 0,0 até 0,3.



A variável “VENTO” ficou determinada como:

- Vento “Alto”, no intervalo de 10 m/s até 8 m/s , para valores de 0,7 até 1,0;
- Vento “Médio”, no intervalo de 7 m/s até 4 m/s , para valores de 0,4 até 0,6; e
- Vento “Baixo”, no intervalo de 3 m/s até 0 m/s , para valores de 0,0 até 0,3.

E finalmente, a VAZÃO, ficou definida como:

- Vazão “Alta”, no intervalo de 1,05 m/s até 0,96 m/s, para 0,8 até 1,0;
- Vazão “Média”, no intervalo de 0,95 m/s até 0,81 m/s, para 0,4 até 0,7; e
- Vazão “Baixa”, no intervalo de 0,80m/s até 0,60 m/s, para 0,0 até 0,3.

Além disso, os sistemas *Fuzzy* uma metodologia para construção de suas regras, os métodos de construção baseada em agrupamento difuso, estes têm origem a partir de análise de dados e do reconhecimento de padrões. Aqui o conceito de pertinência Fuzzy é usado para representar o grau de pertinência que um dado guarda com o modelo. O grau de semelhança pode ser calculado usando uma medida de distância adequada e é a partir desses padrões que podem ser feitas as hipóteses que irão gerar as regras a serem utilizadas no processo de solução.

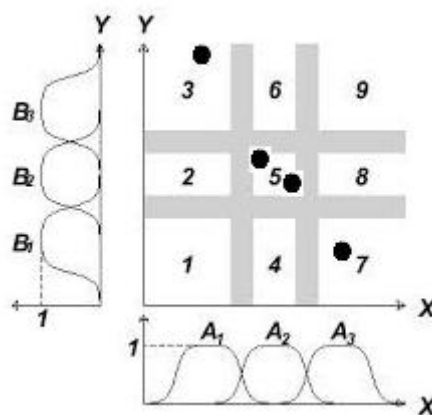


Figura 4.1 – Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Batimetria”.

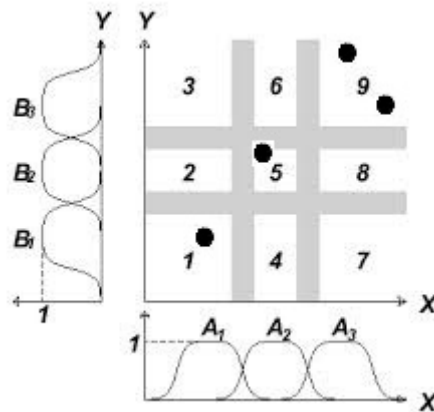


Figura 4.2 – Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Maré”.

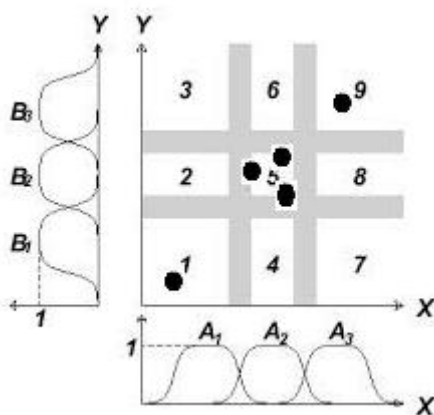


Figura 4.3 – Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Ventos”.

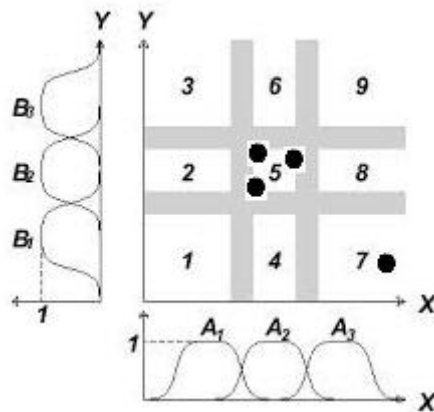


Figura 4.4 – Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Rugosidade”.

O particionamento dos dados é expresso na matriz de partição difusa  $U = [\mu_{ij}, x]$ , apresentados nas matrizes acima, cujos elementos são os graus de pertinência dos vetores de dados, na forma difusa, com as funções pertinência própria  $\mu_j$ . A partir das associações da função pertinência com as variáveis do problema, apresentadas a seguir,

é possível extrair-se as regras, para construção do raciocínio Fuzzy, que serão utilizadas para projetar os aglomerados e as variáveis individuais (BABUSKA, 1998).

#### 4.1.2 – SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY DA HIDRODINÂMICA

No modelo ANFIS, faz-se necessário um conjunto de regras capaz de descrever o fenômeno utilizando variáveis linguísticas que possam transpor incapacidade de traduzir um sistema complexo, de uma forma compreensível, suas decisões. Este é um aspecto importante a se considerar e tem representado um fator de motivação para várias pesquisas, através das quais têm sido desenvolvidas novas técnicas para formulação de regras, a partir de ANFIS, que permitam a obtenção de resultados consistentes com o problema (PIERINI *et al.*, 2013).

Em sistemas Fuzzy com várias entradas, a proposição antecedente é geralmente representada como uma combinação de termos com funções de pertinência uniu variada, utilizando os operadores lógicos 'e' (conjuntamente), 'ou' (disjunção) e 'não' (complemento). Esses operadores foram tomados emprestados à Teoria dos Conjuntos. Entretanto, na teoria dos conjuntos Fuzzy, além desses, várias famílias de operadores foram introduzidas para esses conectivos lógicos.

A solução para o problema hidrodinâmico será estimada através da aplicação de um algoritmo do tipo TSK, 1ª. Ordem, para ANFIS, feita por uma sucessão de processamentos e, em cada uma das saídas, denominadas camadas, são obtidas soluções intermediárias que podem ser melhoradas com a aplicação das regras previamente definidas (MENDEL *et al.*, 1992 e 1995).

A camada de saída apresenta o resultado do processamento das variáveis em uma dada iteração. Conforme descrito na fundamentação teórica, como o modelo aqui proposto considera 04 (quatro) variáveis, forçantes, a camada de saída deve ser definida,

com a aplicação de, no mínimo,  $2^4$  regras, relacionado com a camada de entrada, *i.e.*, pelo menos, 16(dezesseis) regras (YUNG-CHOU CHEN *et al.*, 2006). O processamento da solução, no presente estudo, foi feito com o auxílio do programa MATLAB<sup>®</sup>, utilizando-se um conjunto de 18 regras, listadas a seguir:

- R1 :**Se** Batimetria é “alta” e Maré é “média” e Rugosidade é “média” **Então** Vazão é “média”;
- R2 :**Se** Batimetria é “média” e Maré é “alta” e Rugosidade é “baixa” **Então** Vazão é “alta” ;
- R3 :**Se** Batimetria é “média” e Maré é “alta” e Rugosidade é “média” **Então** Vazão é “média”;
- R4 :**Se** Batimetria é “baixa” e Maré é “média” e Rugosidade é “média” **Então** Vazão é “baixa”;
- R5 :**Se** Batimetria é “baixa” e Maré é “alta” e Vento é “média” **Então** Vazão é “baixo”;
- R6 :**Se** Batimetria é “média” e Maré é “média” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “média” ;
- R7 :**Se** Batimetria é “média” e Maré é “alta” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “alta”;
- R8 :**Se** Batimetria é “alta” e Maré é “média” e Vento é “alto” **Então** Vazão é “alta”;
- R9 :**Se** Batimetria é “média” e Rugosidade é “média” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “média” ;
- R10 :**Se** Batimetria é “média” e Rugosidade é “baixa” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “média”;
- R11 :**Se** Batimetria é “média” e Rugosidade é “média” e Vento é “alto” **Então** Vazão é “média”;
- R12 :**Se** Batimetria é “alta” e Rugosidade é “média” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “alta”;
- R13 :**Se** Rugosidade é “média” e Maré é “alta” e Vento é “alto” **Então** Vazão é “alta”;
- R14 :**Se** Rugosidade é “média” e Maré é “média” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “média”;
- R15 :**Se** Rugosidade é “baixa” e Maré é “média” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “média”;
- R16 :**Se** Rugosidade é “média” e Maré é “alta” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “alta”;
- R17 :**Se** Batimetria é “alta” e Maré é “baixa” e Vento é “baixo” **Então** Vazão é “baixa”;
- R18 :**Se** Batimetria é “baixa” e Maré é “alta” e Vento é “médio” **Então** Vazão é “alta”.

Para os operadores, o conjunto completo de 18(dezoito) regras considerado, divide o domínio de entrada em uma rede de sobreposição de hyperboxes com eixos paralelos. Cada um destes é um hyperbox intersecção e está considerado nos gráficos correspondentes dos conjuntos Fuzzy, no MATLAB<sup>®</sup>, a seguir os quais, por sua vez, assumem a seguinte forma:

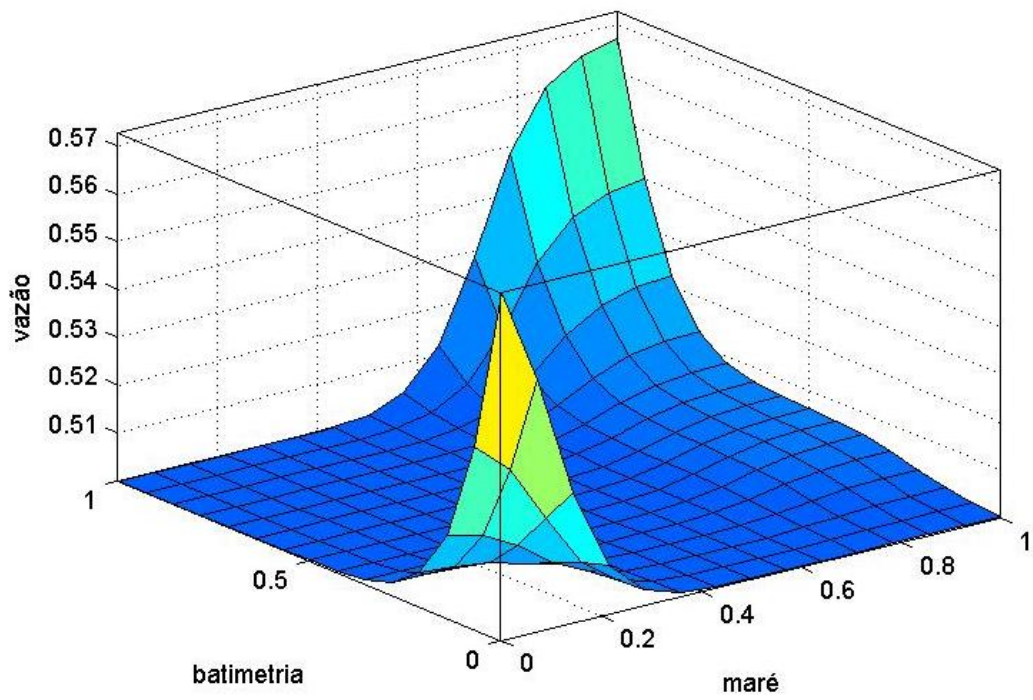


Figura 4.5- Hyperbox da variável Fuzzy “Batimetria” contra “Maré” contra “Vazão”, do MATLAB®.

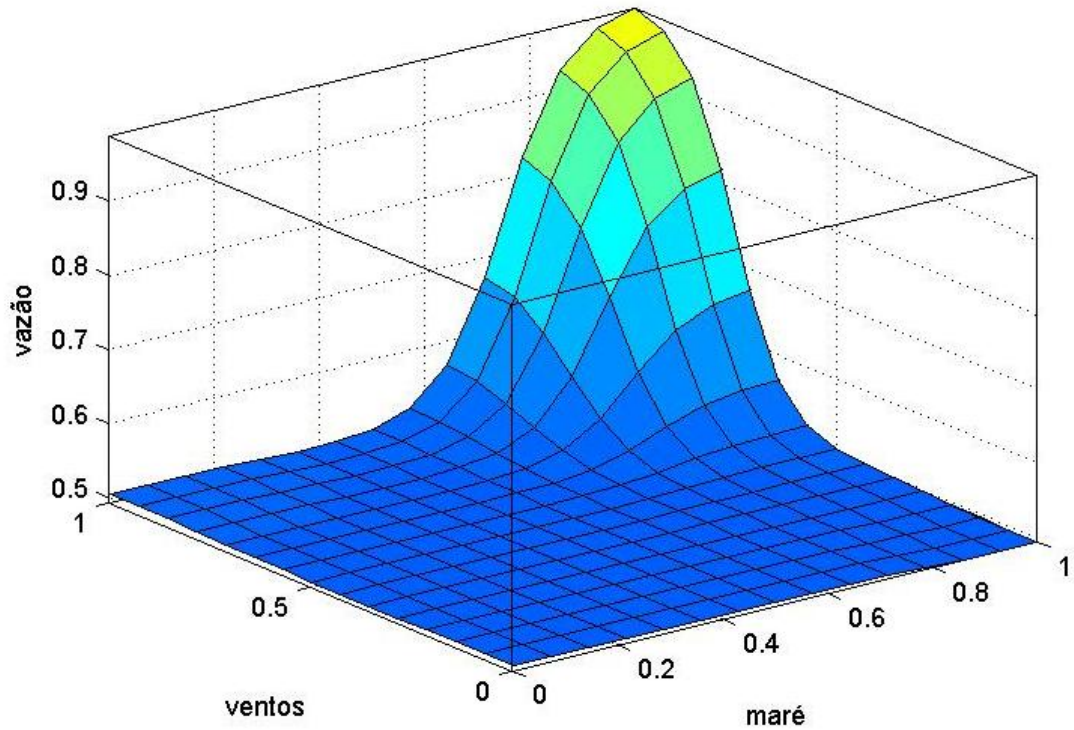


Figura 4.6 - Hyperbox da variável Fuzzy “Ventos” contra “Maré” contra “Vazão”, do MATLAB®.

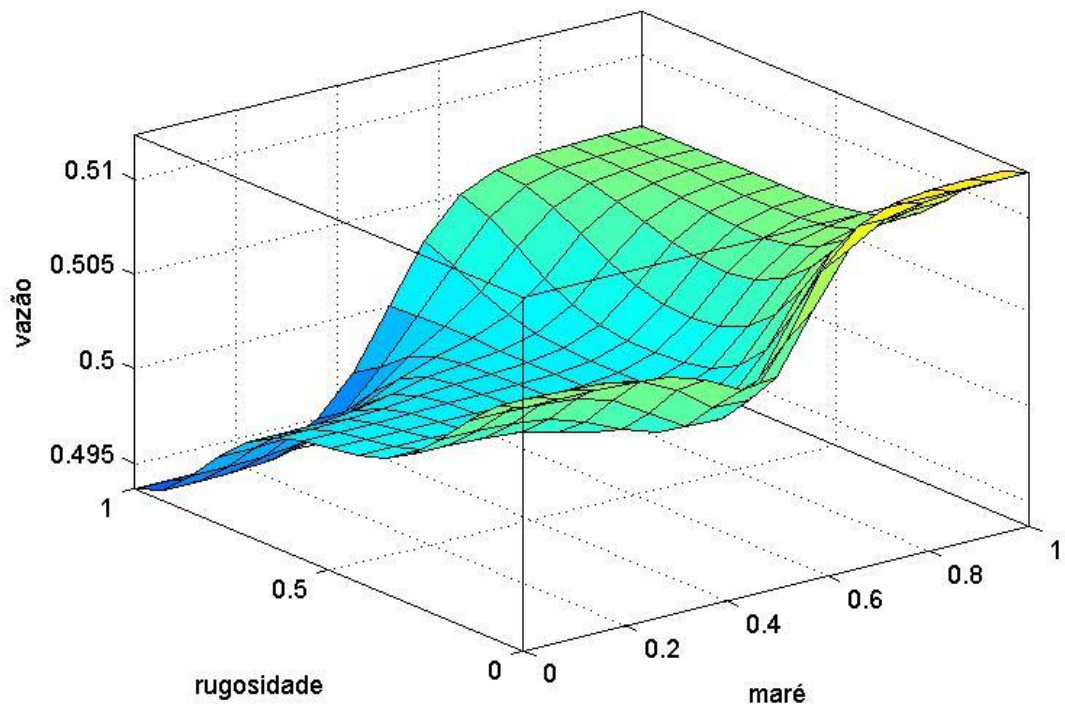


Figura 4.7 - Hyperbox da variável Fuzzy “Rugosidade” contra “Maré” contra “Vazão”, do MATLAB®.

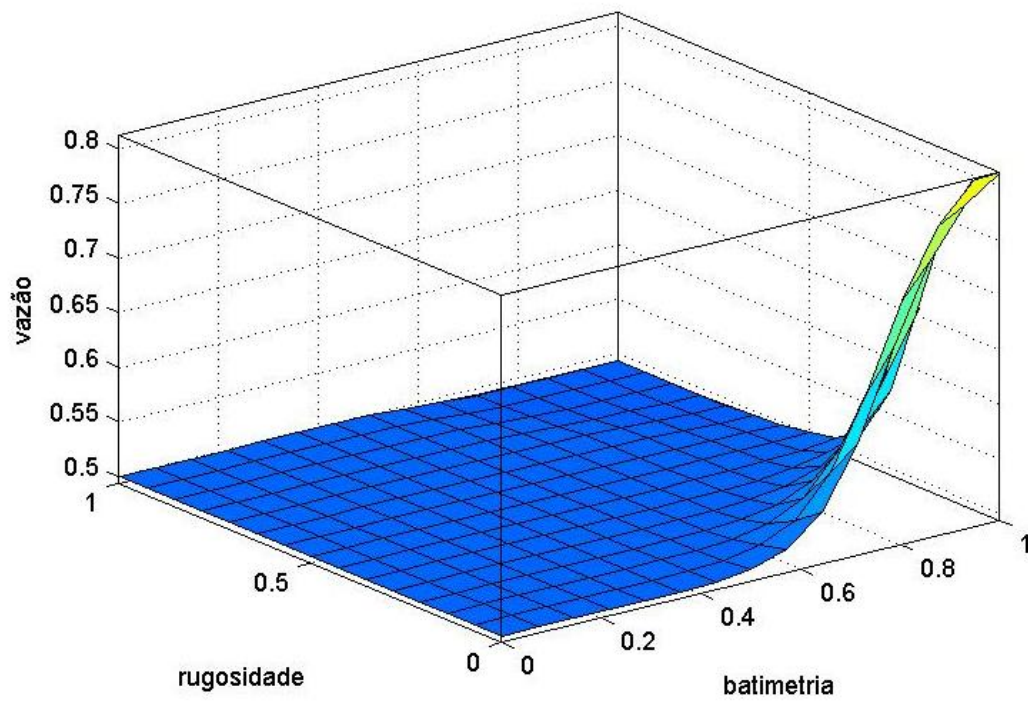


Figura 4.8 - Hyperbox da variável Fuzzy “Batimetria” contra “Rugosidade” contra “Vazão”, do MATLAB®.

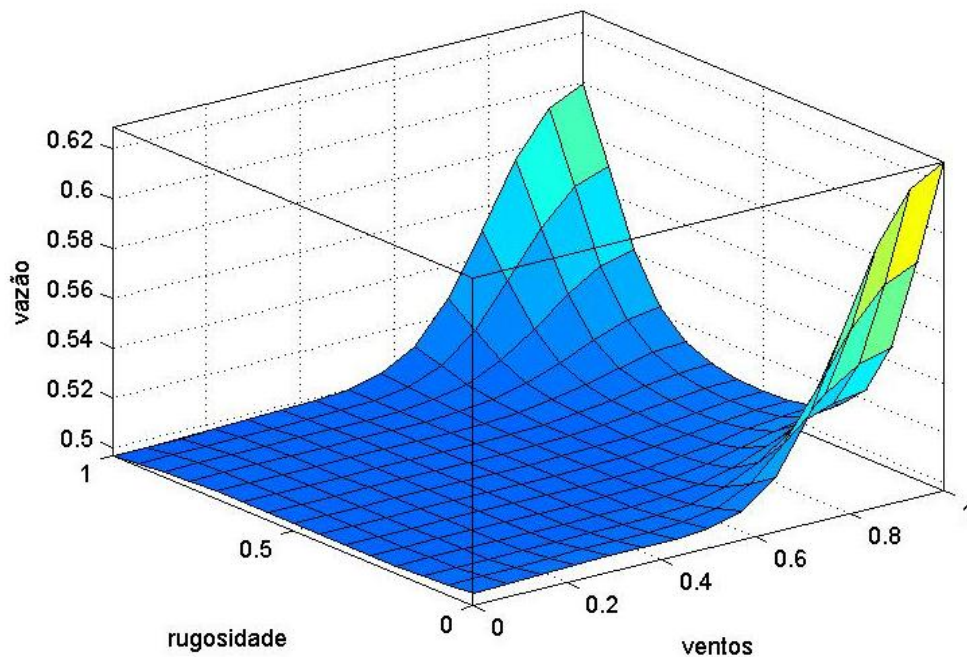


Figura 4.9 - Hyperbox da variável Fuzzy “Rugosidade” contra “Ventos” contra “Vazão”, do MATLAB®.

#### 4.1.3 – ARQUITETURA ANFIS DO MODELO

O modelo proposto possui uma estrutura robusta, capaz de se aproximar do comportamento da complexa função “vazão”, permitindo sua generalização. O conceito aqui expresso de generalização significa dizer que um conjunto de dados é bastante e suficiente para que se possa obter um bom desempenho do algoritmo, caso venha a ser utilizado em um processo definido de tratamento dos dados.

A estrutura da rede ANFIS deve considerar os aspectos relevantes para a construção do sistema Neuro-Fuzzy. É importante ressaltar, que o conhecimento prévio das condições gerais do sistema pode oferecer como uma visão aproximada da natureza do problema, do ponto de vista qualitativo (SCHNITMANET *et al.*, 2004).

A formulação do problema admite que o processo de cálculo seja feito a partir de dois passos básicos: o primeiro compreende a definição da estrutura da rede e o



segundo envolve a estimativa dos parâmetros. A escolha da estrutura do modelo é muito importante, pois é ela que determina a flexibilidade do modelo e sua efetiva aproximação com o sistema, aqui considerado como desconhecido.

Após a Fuzzyficação das variáveis, o passo seguinte para solução da rede Neuro-Fuzzy, no presente estudo, foi introduzir no software Excel Solver as regras de inferência, considerando os respectivos campos, para o modelo ser alimentado pelos dados levantados e processar através de um modelo matemático de uma planilha Excel. Desta forma, as fórmulas foram digitadas diretamente na planilha, o que permitiu obter o resultado diretamente do programa Excel.

O segundo passo no processo de solução envolveu a interação com a janela de diálogo do Solver para que fosse possível introduzir as alterações desejadas através da aplicação de critérios pré-estabelecidos. Esse procedimento permitiu a obtenção de uma solução para cada célula considerada conforme sugerido por Pananayotova, 2010.

A arquitetura proposta para o Sistema Neuro-Fuzzy aqui desenvolvido, foi construída a partir de uma Função de Inferência (FIS), já descrita e especificamente estabelecida para o problema. Esta função está composta por camadas, “*fuzzificadas*”, conforme descrito na fundamentação teórica. Esta arquitetura permitiu o cálculo das funções de pertinência e dos pesos. As entradas estão sempre definidas por um vetor de ativação  $u(t)$  e essa composição foi adotada para facilitar a identificação desse vetor com o vetor de saída  $y(t)$ , cujos componentes são os valores de pertinência de cada uma das classes.

A arquitetura do modelo considerou quatro variáveis de entrada e as operações efetuadas sobre as entradas de cada camada da rede ANFIS serão descritas a seguir. A estrutura a seguir, apresenta a representação de rede formulada de acordo com as regras previamente definidas. Os nós na primeira camada, camada relativa ao processo de cálculo de adesão das entradas, relacionam cada entrada de um conjunto Fuzzy com o seu peso. (JANG, 1993):

CAMADA 1, é constituída pelas Entradas, representadas pelos valores levantados para as variáveis batimetria, maré, ventos e rugosidade,  $x_i$ ,  $x_j$ ,  $x_k$ ,  $x_l$ , respectivamente, na função



pertinência TSK. A Saída ( $O_1$ ): Valor da função de pertinência (gaussiana) cuja equação é mostrada a seguir. O conjunto  $\{w_i\}$  representa os parâmetros lineares da ANFIS.

$$\bar{x}_{(k)} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{1(k)} \\ \bar{x}_{2(k)} \\ \bar{x}_{3(k)} \\ \bar{x}_{4(k)} \end{pmatrix}$$

Onde:  $X_{(k)}$  = k-ésima entrada;

$X_{1(k)}$ =variável k-ésima *Fuzzy* batimetria;

$X_{2(k)}$ =variável k-ésima *Fuzzy* maré;

$X_{3(k)}$ =variável k-ésima *Fuzzy* ventos;

$X_{4(k)}$ =variável k-ésima *Fuzzy* rugosidade.

CAMADA 2: a entrada está representada por:  $O_1$ , e a Saída ( $O_2$ ): a operação *Fuzzy* a ser realizada consiste na multiplicação dos graus de pertinência cujos rótulos lingüísticos correspondentes (conjuntos nebulosos) se deseja combinar. A saída dessa camada representa o grau de ativação da regra.

$$o_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2 \dots 4 \quad (4.1)$$

Onde:  $w_i$  são os pesos respectivos da função pertinência.

CAMADA 3: contem o conjunto de Entradas:  $O_2$ , e a Saída ( $O_3$ ): esta etapa compreende o cálculo do grau de ativação normalizado, através da aplicação do modelo apresentado em 4.1.3.

$$o_{3i} = \hat{w}_i = w_i / (\sum_{i=1}^4(w_i)) \quad (4.2)$$

Onde:  $\hat{w}_i$  é o peso médio“i”.

CAMADA 4: tem como conjunto de Entrada:  $O_3$ . E como Saída ( $O_4$ ): Nessa camada é feita a multiplicação da saída da camada 3 pela função  $f_i$ . A função  $f_i$  que é o resultado de uma combinação linear dos valores das entradas  $x$ , da camada 1, com os valores de  $y$ , da entrada da camada X, como segue:

$$O_4 = w f = v_I = w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_2 + w_3 \cdot X_3 + w_4 \cdot X_4 + b \quad (4.3)$$

Onde:  $\{w\}$  é conjunto dos respectivos pesos do modelo TSK 1ª. ordem;

$X_1$ = batimetria;

$X_2$ = marés;

$X_3$ = ventos;

$X_4$ = ventos; e

$b$  = escalar.

CAMADA 5: Entrada:  $O_4$  Saída ( $O_5$ ): Nessa camada é realizado o cômputo da saída geral do sistema, que consiste na somatório das saídas qualificadas dos nós da camada 4.

$$O_{5,i} = y = (\sum_{k=1}^n (V_k)) / \sum_{i=1}^4 (W_i) = (\sum_{k=1}^n (W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_3 \cdot X_3 + W_4 \cdot X_4 + b_k)) / \sum_{k=1}^n (W_k) \quad (4.4)$$

Os nós da segunda camada, representados como produtórios “ $\Pi$ ”, relacionam o antecedente conjuntivo e (onde 'e' representa um operador). Já o nó “ $N$ ” representa o processo de normalização do aprendizado e o nó de somatório “ $\Sigma$ ”, representa o operador “média”. A função inferência (FIS), para redes ANFIS tem uma função ativação ( $O_4$ ), representada pela equação 4.1, foi construída segundo descreve Jang, 1993, e está representada sinteticamente na figura a seguir (JANG, 1993).

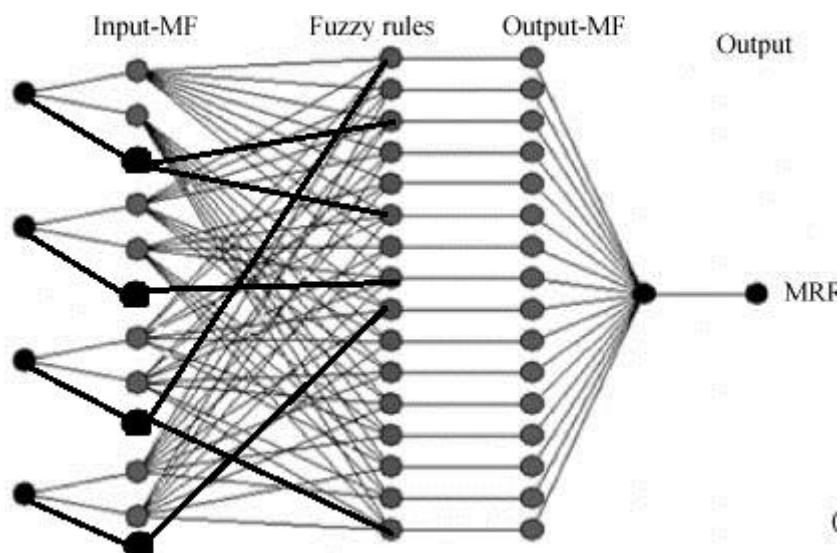


Figura 4.10 – Arquitetura rede ANFIS do modelo, conforme Jang 1993.

Pode-se observar, a partir do exposto que o primeiro passo do processo de solução envolve a seleção de variáveis de entrada. O segundo passo abrange o processo de cálculo dos pesos, obedecendo ao critério de parada e o número e tipo de funções de pertinência, bem como o número de regras, sendo, estes últimos, parâmetros estruturais, relacionados. Caso seja necessários aumentar o número de funções de pertinência o número de regras deve ser também aumentado. Esses aspectos fazem parte da chamada granularidade do modelo e são importantes na tarefa de modelar o problema e definir a quantidade de mínima de informações que deverá ser disponibilizada para o processo de solução.

A rede formula como critério de parada, para retropropagação do erro quadrático para os dados  $p$ , a seguinte forma:

$$E_p = (T_p - O_p)^2 / 2 \quad (4.5)$$

Onde:  $T_p$  – valor de referência

$O_p$  – valor de saída

Logo, sendo os resultados de um processo de teste considerados como satisfatórios são aceitáveis para o modelo esses resultados podem ser aceitos. Se o resultado for inadequado, deve ser feito um redesenho do modelo. O nível aceitável para o

resultado do modelo será avaliado com base no valor de RMS (4.2) e diferença absoluta (4.3) (ALGAHTANI, 2013).

## 4.2 – MODELO DE TRANSPORTE HÍBRIDO

Alem desses estudos pode-se encontrar na literatura modelos de Transporte de Poluentes utilizando as equações de Euler para dispersão num canal aberto. No caso desses modelos a trajetórias de partículas, são calculadas em momentos sucessivos à medida que se movem pelas correntes e como eles são distribuídos pela turbulência e não uniformidade no perfil de velocidade. Esse tipo de modelo trata os materiais inertes em água (HINWOOD, 1979).

O modelo para transporte de sedimentos, do presente estudo, foi construído levando-se em conta os campos de correntes relativos aos vários cenários descritos no modelo hidrodinâmico. Para determinação das frações de sedimentos existentes no leito o domínio da Faixa de Dobramentos Remobilizados inclui uma única região geomorfológica, as Escarpas e Reversos da Serra do Mar. Nesta encontram-se as unidades geomorfológicas Serra do Mar e Planalto de São Bento do Sul, que ocorrem nos trechos central e oeste da área da pesquisa, respectivamente.

Um aspecto importante a ser considerado para o problema, no Canal do Linguado/SC, diz respeito à turbidez e o seu relacionamento com a quantidade de sedimentos. Esse tipo de correlação foi apresentado por Oliveira F., em 2006. Um estudo da dinâmica sedimentar fluvial foi também realizado na bacia hidrográfica de Babitonga/SC, com medições realizadas e utilizadas nesse estudo. No trabalho de Oliveira F. foi estudado e levantado o aporte sedimentar em suspensão na Baía de Babitonga, sob a ótica da geomorfologia, este estudo foi de maneira importante para o entendimento do transporte de sedimentos e sua relação com as quantidades de sólidos em suspensão e com a turbidez.

As relações Fuzzy-Genéticas aqui consideradas foram estruturadas dentro de regras utilizando os forçantes relacionados, já descritos anteriormente, com a função objetivo, estes são codificados como cadeias de bits concatenadas uma após outra, formando um vetor binário de entrada. A representação binária tem sido amplamente utilizada, pois além de simples de ser analisada teoricamente, é fácil de ser operada sobre cadeias de bits.

O modelo proposto para transporte de sedimentos conjuga a força do AG com a lógica *Fuzzy*, o que lhe garante robustez e eficiência para estudar o fenômeno abordado, conforme se pode concluir a partir do exposto (ÖZGÜRKIS, 2009). Para isso, deve-se levar em conta o efeito de uma análise comparativa de seus resultados com os obtidos com a aplicação deste modelo.

No capítulo 5, o trabalho apresenta uma comparação do modelo Fuzzy-Genético com o modelo clássico baseado em elementos finitos, conhecido comercialmente como MIKE21<sup>®</sup>. Cabendo ressaltar, que o modelo Fuzzy-Genético, aqui proposto, foi desenvolvido a partir dos dados de campo obtidos no trabalho realizado pelo IME e pela Universidade do Vale do Paraíba em 2003.

#### 4.2.1 - REPRESENTAÇÃO FUZZY-GENÉTICA DO MODELO

Para a utilização de AG's geralmente é considerada uma codificação feita com base na lógica da codificação do indivíduo, o desempenho da função objetivo e os operadores genéticos. O emprego desse modelo para a solução do problema de transporte se apresenta como uma alternativa conveniente para a obtenção de um resultado adequado para os diferentes cenários de dragagem.

Cada cromossoma que integra a população, nessa abordagem, é associado a um valor em função da seqüência de atribuições consideradas para as variáveis preditivas. O valor está, assim, representado por uma cadeia baseada na base binária. Sendo o indivíduo, ou cromossoma, da população composto por concatenação das cadeias que representam as atribuições (*vazão e área do canal*).

A representação do cromossoma, de cada variável, como, por exemplo, a variável *vazão*, precisará ser, inicialmente, “*fuzzificada*”, criando uma cadeia binária com quatro componentes, onde cada componente representa uma variável (HERRERA F. *et al.*, 2001). Cada seqüência binária de 1001 é associado à variável *vazão* representa uma atribuição para cada forçante. Com isso, os cromossomas poderão ser escritos como:

Seqüência	Cromossoma	Número <i>Fuzzy</i>
A	0000	0
B	0001	0,1
C	0011	0,2
D	0101	0,3
E	0110	0,4
F	0111	0,5
G	1001	0,6
H	1010	0,7
I	1100	0,8
J	1110	0,9
L	1111	1

Quadro 4.1 - Codificação dos cromossomas em números Fuzzy.

Apartir da tabela 4.2, a função pode ser escrita com os números Fuzzy, que por sua vez, irão permitir a execução das operações aritméticas padrão dos conjuntos Fuzzy, com base no princípio da extensão. Onde a seqüência de **A** até **C**, receberá o valor “BAIXO”; a seqüência de **D** até **H** receberá o valor “MÉDIO”; a seqüência de **I** até **L** receberá o valor “ALTO”.

Desta forma, para os cenários definidos mais a frente, pode-se inferir valores associados a esses números *Fuzzy* triangulares. As variáveis linguísticas terão atribuídas as respectivas escalas de valores, feita a partir do conhecimento da geometria, vazão e sedimentos (NTU), conforme pode ser verificados abaixo.

A VAZÃO foi definida como:

- Vazão “Alta”, no intervalo de 1,05 m/s até 0,96 m/s, para 0,8 até 1,0;
- Vazão “Média”, no intervalo de 0,95 m/s até 0,81 m/s, para 0,4 até 0,7; e
- Vazão “Baixa”, no intervalo de 0,80 m/s até 0,60 m/s, para 0,0 até 0,3.

A “ÁREA” foi definida da seguinte forma:

- Área “Alta”, no intervalo de 300 m<sup>2</sup> até 201 m<sup>2</sup>, para 0,8 até 1,0;
- Área “Média”, no intervalo de 200 m<sup>2</sup> até 100 m<sup>2</sup>, para 0,4 até 0,7; e
- Área “Baixa”, no intervalo de 99 m<sup>2</sup> até 0 m<sup>2</sup>, para 0,0 até 0,3.

E “SEDIMENTOS”, foram definidos como:

- Sedimentos “Alto”, de 15 até 10 NTU, atribuiu-se os valores de 0,8 até 1,0;
- Sedimentos “Médio”, de 9 até 5 NTU, atribuiu-se os valores de 0,4 até 0,8; e
- Sedimentos “Baixo”, de 4 até 0 NTU, atribuindo os valores 0,0 até 0,3.

A avaliação de um indivíduo, ou cromossoma, será feita por um processo interativo, entre o computador e o especialista. Portanto, a representação do indivíduo é feita de acordo com o seu valor significativo e, em consequência, pode-se entender que o valor maior está relacionado com a interpretação do especialista sobre a variável.

#### 4.2.2 – SISTEMA DE INFERÊNCIA DO TRANSPORTE

Na cognição do ser humano, este, ao avaliar um objeto, considera um intervalo, ou seja, o indivíduo adota um critério de aptidão para expressá-lo. Essa avaliação da função aptidão está relacionada a um intervalo. A questão é: qual o intervalo adotar, para expressar a aptidão de um indivíduo. A solução dessa questão indica ser necessário fazer-se uma avaliação, embora aproximada, de seus limites superiores e limite inferior considerando-se a aptidão considerada. A fim de atribuir um valor menos impreciso à avaliação, muitas vezes são usados mapas de pensamento consciente. Relativamente ao pensamento racional é necessário que seja feito um procedimento análogo, o que pode conduzir ao aumento da fadiga humana.

Ao se adotar um intervalo deve ser considerada uma aptidão individual, com uma avaliação dos intervalos da função objetivo, de tal forma que dois indivíduos selecionados, formem um intervalo de acordo com a ordem de grandeza das observações. Isto pode ser justificado de vez que quanto mais baixo o limite inferior de uma aptidão individual, tanto maior será a chance de o indivíduo ser aceito (HERRERA F. *et al.*, 2001).

O conjunto de todas as regras e suas relações com os cromossomos, pode também definir a forma do seu espaço de busca. Se o cromossomo é constituído por “n” parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com n dimensões. A teoria sugere que a maioria das representações dos cromossomos são genotípicas, isto é, utilizam vetores de tamanho finito, em um alfabeto também finito, o que limita o número de parâmetros das variáveis representativas do cromossomo. Para o presente estudo, foi feita uma identificação de como as regras se relacionam com os respectivos forçantes. Essa tarefa permitiu estatuir a seguinte formulação (MENDELL *et al.*, 1992 e 1995):



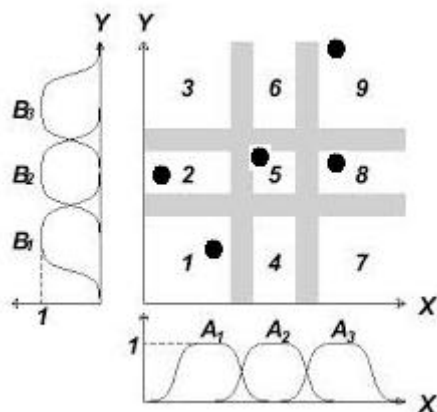


Figura 4.11– Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Vazão”.

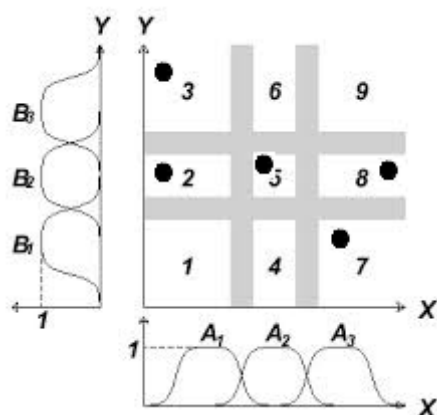


Figura 4.12– Matriz particionamento função pertinência,  $\mu_x(Y)$ , e nas linhas x, valores da variável “Área”.

Conforme já referido, as informações obtidas na literatura acadêmica sobre a produção de sedimentos provocados pelo escoamento superficial permitem representar a quantidade de sedimentos produzida através da equação:

$$Q_s = 11,8 (Q_v \cdot (A))^{0,56} \cdot K \quad (4.6)$$

Onde:  $Q_s$  = Vazão de sedimentos pelo canal em gramas por segundo;

$Q_v$  = Vazão de sedimentos pelo canal em centímetros por segundo;

$K$  = Constante característica do solo do canal; e

$A$  = Área do canal em metros quadrados.

Admitindo- se que essa função possa ser linearizada o modelo assume a forma:

$$\log ( Q_s ) = \frac{1}{2} \log ( Q_v ) + \frac{1}{2} \log ( A ) + b_i \quad (4.7)$$

Então, para as variáveis utilizadas definidas e o parâmetro "b", o coeficiente linear da função. Pode-se admitir a seguinte regra, TKG - 1ª ordem, de inferência:

$$\text{Se } \forall X_1 \text{ e } X_2 \text{ Então } Y_1 = w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_2 + b, \quad (4.8)$$

Onde:  $Y_1$  = Concentração de sedimentos pelo canal em gramas por segundo;

$X_1$  = Vazão pelo canal em centímetros por segundo;

$X_2$  = Área do canal em metros quadrados; e

$w_1$ ,  $w_2$  e  $b$  = parâmetros a serem ajustados.

O problema de otimização, no caso em estudo, consiste em maximizar o valor da função-objetivo, isto é, encontrar soluções que produzam o maior valor possível para a função-objetivo e, para isso, foram estabelecidas as seguintes regras (CHOU CHEN *et al.*, 2006):

R1 :**Se** Vazão é "alta" e Área é "baixa" **Então** Sedimento é "alto" ;

R2 :**Se** Vazão é "alta" e Área é "média" **Então** Sedimento é "médio" ;

R3 :**Se** Vazão é "média" e Área é "alta" **Então** Sedimento é "médio" ;

R4 :**Se** Vazão é "baixa" e Área é "baixa" **Então** Sedimento é "médio" ;

R5 :**Se** Vazão é "baixa" e Área é "média" **Então** Sedimento é "baixo" ;

R6 :**Se** Vazão é "baixa" e Área é "alta" **Então** Sedimento é "baixo" .

Para o caso da vazão, o domínio de entrada, dos conjuntos Fuzzy fica da seguinte maneira, no Matlab<sup>®</sup>:

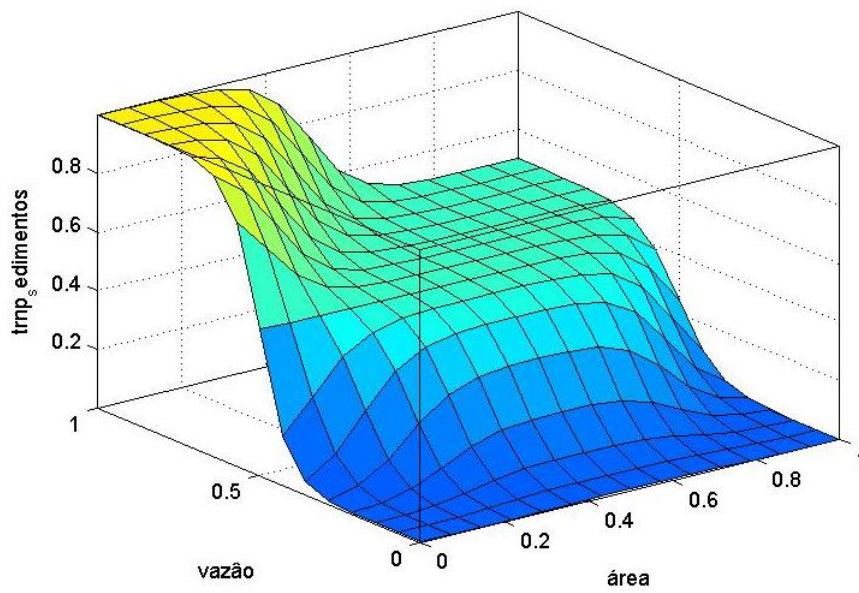


Figura 4.13 - Hyperbox da variável Fuzzy “Rugosidade” contra “Ventos” contra “Vazão”, do MATLAB®. Para o caso da vazão, o domínio vetorial da entrada, dos conjuntos Fuzzy fica da seguinte maneira, no Matlab®:

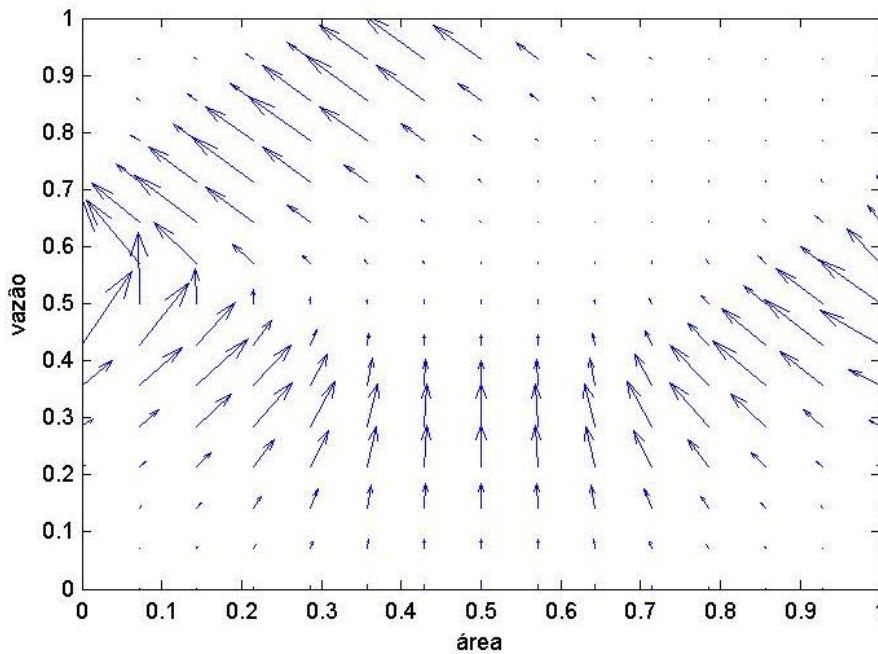


Figura 4.14 - Hyperbox da variável Fuzzy “Rugosidade” contra “Ventos” contra “Vazão”, doMATLAB®.

#### 4.2.3 – PROGRAMAÇÃO GENÉTICA DO MODELO

A programação genética do modelo ressalta os operadores genéticos envolvidos. Neste caso, é importante lembrar que a biologia sugere que a evolução das espécies acontece naturalmente através dos indivíduos mais capazes de se reproduzirem de serem selecionados. O método de programação genética mais executada atualmente é o proposto por Holland, conhecido como método da roleta. Esse método considera que a seleção é feita segundo a probabilidade de seleção de cada indivíduo se manter no processo.

O primeiro parâmetro genético importante é o tamanho da população “X”, este parâmetro foi considerado tendo em vista garantir uma consistência ao modelo, de tal forma que o número de observações permitisse a construção de um modelo robusto (HERRERA F. *et al.*, 2001).

Outro parâmetro importante é o operador de cruzamento, tendo em vista a sua importância e a natureza do modelo foi estabelecida para este operador uma probabilidade de cruzamento de 0,6. O parâmetro genético, para a mutação dos indivíduos, por ser considerado menos importante, ficou definido com uma probabilidade de 0,01.

Considerando-se uma população de “x” elementos,  $x(t)$ , num intervalo compreendido pelos cenários descritos, foi calculada também a função aptidão dos indivíduos. O algoritmo de programação Genética é simples e pode ser descrito resumidamente: como criar aleatoriamente uma população de programas; executar os passos apresentados a seguir até que um Critério de Término previamente estabelecido seja satisfeito; avaliar cada programa através de uma função heurística (*função objetivo*), que expressa quão próximo cada programa está da solução ideal; selecionar os

melhores programas de acordo com a função objetivo; aplicar a estes programas os operadores genéticos (seleção, cruzamento e mutação); e retornar com o melhor programa encontrado (Herrera F. et al., 2001).

A função aptidão do AG formulado no presente estudo, reflete a diferença entre os indivíduos “previstos” pelo modelo e os indivíduos do resultado dos “experimentos”. Na fase inicial de uma evolução da população, a distribuição da população é aleatória, e a diferença entre os indivíduos é grande, com as iterações o ajuste dos pesos vai aumentando a aptidão ( $Y_i$ ) dos indivíduos. Assim, a aptidão do indivíduo  $Y_{i+1}$  pode ser obtida com o auxílio da expressão:

$$Y_{i+1} = [ P_j * (Y_i - D_{\text{desejado}}) ] \quad (4.9)$$

Onde:  $Y_{i+1}$  = aptidão *i-ésima* mais um;

$Y_i$  = *i-ésima* aptidão;

$P_j$  = operador genético, sendo “j” igual a “m” - mutação e “c” - *crossover*;

$D_{\text{desejado}}$  = valor desejado (experimental).

Na evolução da população, a aptidão entre os indivíduos é avaliada primeiramente pelo resultado da operação de “*crossover*”. Para a computação evolutiva, faz-se necessário o conhecimento do especialista, para executar o raciocínio dedutivo. Isto é, quando queremos deduzir ou inferir uma conclusão, dado um conjunto de fatos e conhecimentos, é importante a informação do especialista. A literatura apresenta muitas formulações para aplicação no presente trabalho é a que diz respeito ao conhecimento formal (ROSS, 1980).

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão aqui destacados alguns trabalhos revisitados como o realizado por Shams M. *et al.* em 2002, onde a modelagem computacional da vazão e do transporte de sedimentos em rios e canais foi realizada visando estudar a deposição de sedimentos para rios bastante sinuosos o que guarda semelhança com o problema em estudo. Esse modelo considerou o escoamento turbulento para avaliar as características do fluxo do rio e incluiu um campo de velocidade média e os componentes de tensão. Os resultados da simulação feita com o auxílio desse modelo foram comparados com os disponíveis, através dos dados experimentais obtidos.

Em sua formulação, o modelo considerou a descrição Euleriana de partículas individuais, para o transporte e para a deposição de partículas de vários tamanhos ao longo da trajetória do rio, dando particular atenção aos padrões de sedimentação de diferentes partículas de tamanho no modelo rio-bend. Os padrões de fluxo de um rio físico foram também estudados (SHAMS, M. *et al.*, 2002).

Zhang *et al.* 2007 realizou a simulação numérica do transporte de sedimentos e a sua evolução hidrodinâmica, através de um modelo numérico de transporte de sedimentos para sedimentos em suspensão. Nesse modelo bidimensional, foram consideradas as condições de superfície livre e o fundo livre. Nessa pesquisa os fatores predominantes foram difusão turbulenta, a velocidade de sedimentação e a condição de acamação. Com a ajuda do modelo descrito em seu artigo, o autor conseguiu uma boa aproximação para o caso (ZHANG *et al.*, 2007).

CONDIE *et al.*, 2008, construiu sua malha tridimensional, para resolver modelos numéricos de transporte de sedimentos aplicados à região do Estreito de Torres, no norte da Austrália. O modelo continha aproximações para ondas e correntes, sendo

ainda calibrado para diferentes concentrações de sedimentos em suspensão. O autor usou, para isso, um algoritmo de assimilação de dados sequenciais. O algoritmo produziu uma boa relação entre o modelo e os dados, mas isso só foi conseguido graças as aproximações temporais dos parâmetros, o que pode ter sido resultado da complexidade do problema ou de incertezas não resolvidas no modelo (CONDIE et al., 2008).

A literatura apresenta um grande número de modelos numéricos sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em corpos hídricos, estes modelos possuem como a característica principal a determinação das soluções aproximadas das equações de mecânica dos fluidos. O modelo proposto aborda a questão sob a ótica da construção de modelos híbridos capazes de aprender a cada momento para indicar a melhor solução.

## 5.1 – APRENDIZAGEM E VALIDAÇÃO DO MODELO ANFIS

A aprendizagem no ANFIS consiste no ajuste dos seus parâmetros envolvendo duas etapas. A primeira abrange a estimação dos parâmetros, que neste modelo se admite ser linear. A segunda etapa envolve um processo de otimização dos parâmetros através da aplicação das regras definidas para o modelo segundo um método de retro propagação (*backpropagation*). A primeira etapa, no presente trabalho, foi feita com o auxílio do método dos Gradientes Conjugados (CG), que é um método criado para resolução de problemas lineares iterativamente. A solução obtida com o emprego desse método parte da hipótese de que as matrizes de coeficientes simétricos são definidas positivamente, assim, o método converge em um número finito de iterações.

A segunda etapa do ajustamento compreende o processo de estimação dos parâmetros. Neste estudo foi utilizado o método dos Gradientes Conjugados (CG) para ajustamento das funções matemáticas necessárias à explicação do comportamento das variáveis comportamentais, sendo esse ajustamento feito sobre as amostras coletadas em fontes oficiais de informações e em estudos realizados para a área.

A contribuição relativa a cada forçante considerado foi então “*Fuzzyficada*”, i.e., codificada, obedecendo as regras estabelecidas pela Lógica Fuzzy, como uma função Gaussiana. As entradas foram apresentadas anteriormente, depois de “*Fuzzificadas*”, variaram em um intervalo de 0 até 1. Relativamente ao tempo o intervalo adotado foi o considerado no estudo do IME já citado. (IME, 2003).

Desta forma, foi possível determinar o tamanho mínimo da amostra, considerada adequada para estimação da média populacional,  $\mu$ , como um parâmetro estatístico, a partir da seguinte expressão:

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (5.1)$$

Onde:  $n$  = número de indivíduos na amostra;

$Z_{\alpha/2}$  = valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado;

$\sigma$  = desvio-padrão populacional da variável estudada; e

$E$  = Margem de erro ou erro máximo de estimativa.

Na definição dessas condições iniciais foi considerada a série de dados de entrada levantados e tabulados, para o cálculo da vazão com um valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado de 0,8; um desvio-padrão populacional da variável vazão de 0,5; uma margem de erro de 0,1; chega-se se a uma amostra de 16 (dezesesseis) observações, apresentados na tabela 5.1, na forma “*Fuzzyficada*” (TRIOLA, F., 1999).



Pontos	Batimetria	Maré	Ventos	Rugosidade	Y, Vazão
1	0,1	0,9	0,9	0,2	1,0
2	0,9	0,9	0,2	0,7	0,9
3	0,8	0,2	0,6	0,4	0,4
4	0,5	0,7	0,6	0,1	0,6
5	0,8	0,3	0,8	0,4	0,4
6	0,9	0,6	0,6	0,2	0,5
7	0,4	0,7	0,7	0,1	0,6
8	0,4	0,7	0,8	0,1	0,6
9	0,2	0,8	0,7	0,0	0,8
10	0,2	0,8	0,9	0,0	0,9
11	0,2	0,6	0,6	0,0	0,7
12	0,7	0,7	0,2	0,2	0,8
13	0,9	0,6	0,4	0,2	0,6
14	0,9	0,6	0,5	0,3	0,7
15	0,6	0,7	0,9	0,0	0,7
16	0,8	0,7	0,9	0,1	0,8
17	0,4	0,7	0,6	0,0	0,7
18	0,7	0,9	0,2	0,2	0,8
19	1,0	0,6	0,4	0,3	0,6
20	0,4	0,8	0,5	0,2	0,7

Tabela 5.1 - Valores de entrada dos forçantes na forma de números Fuzzy triangulares da Baía da Babitonga/SC, IME, 2003.

O Treinamento da rede Neuro-Fuzzy, no presente estudo, consistiu em um exercício de otimização numérica de uma função não linear. A literatura técnica descreve vários métodos de otimização não linear, podendo-se citar, por exemplo, Bertsekas 1995, Gill, Murray, e Wright 1981. Neste caso, como foi feita a opção de solução com o auxílio do "Solver", o processo foi específico. A utilização do Solver foi considerada conveniente por estar ele disponível no MS Excel, onde se pode utilizar um arquivo adicional (add-in) de otimização numérica, que amplia os recursos do Excel, e

permite que o trabalho possa ser feito de forma rápida, fácil e precisa (CHOONG, 2009).

Para um modelo do tipo ANFIS, considerando-se um tamanho médio de dados, com número moderado de pesos, como é o caso do estudo, o algoritmo assume um padrão compatível com o permitido pelo ‘Solver®’.

O método utilizado pelo Excel Solver é o dos gradientes conjugados, indicado para resolver problemas comuns com grande número de variáveis a se otimizar. ([www.solver.com](http://www.solver.com)).

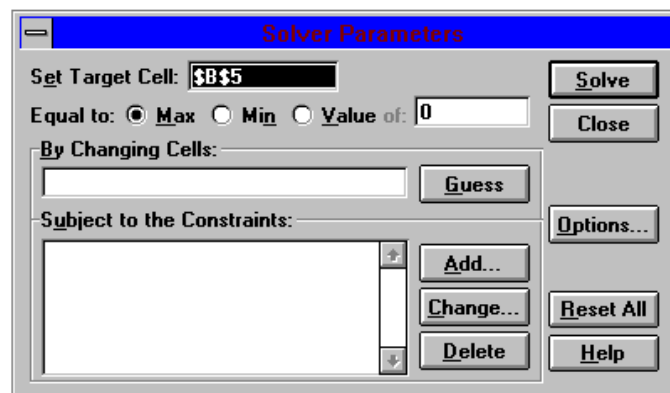
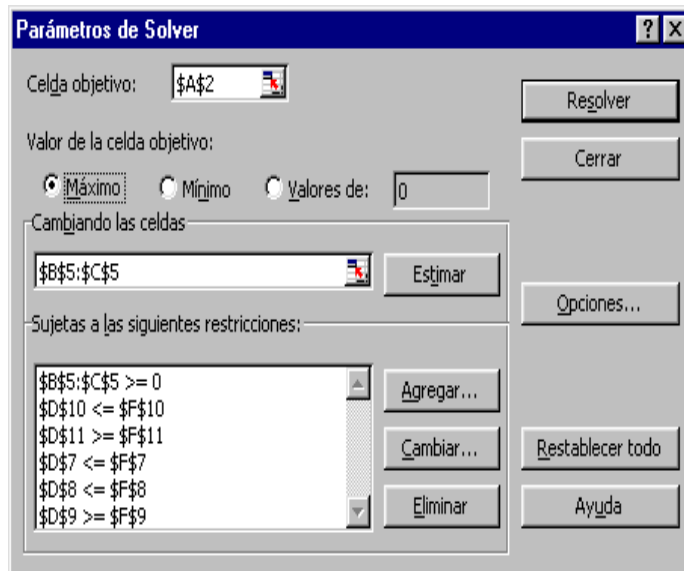


Figura5.1 – Telas de apresentação do programa solver® para o Excel.

A determinação dos parâmetros foi feita considerando- se o modelo ANFIS, TSK ordem um, (MAMDANI) e as regras descritas anteriormente. Desta forma, os parâmetros de saída da 5ª camada na ANFIS, estimados com a aplicação do Método dos Gradientes Conjugados (CG). Em alguns casos são utilizados parâmetros obtidos por um processo de otimização baseada no gradiente iterativa das funções de pertinência (Mathworks, 2001).

Deve- se observar que modelos ANFIS, especialmente o de primeira ordem, geralmente são parametrizados segundo um critério de aproximação e isso pode levar a dificuldades, como a estimativa de parâmetros tendenciosos, o que pode implicar uma rede pouco treinada.

O processo de treinamento do modelo aqui adotado, feito com o auxílio do programa “solver<sup>®</sup>”, foi do tipotreinamento supervisionado. Nesta abordagem o modelo possui regras e aprende quando os resultados estão de acordo com os critérios apresentados pelo especialista ou de acordo com os critérios técnicos corretos, *i.e.*, quando o especialista aceita, que as saídas do modelo e as saídas reais, estão convergindo para um nível aceitável. Portanto, o processo de treinamento, é interrompido quando uma raiz do erro mínimo quadrático previamente definida é atingida 5.2 (ALGAHTANI, 2013).

$$RMS = \text{SQR}(\text{SUM}((1/n)*(O_i - T_p)^2)), \quad 5.2$$

Onde: RMS = Erro Médio Quadrático;

SQR = Raiz quadrada

SUM = Somatório

n = número de observações utilizadas na amostra na etapa de formação;

O<sub>i</sub> = saída real;

T<sub>p</sub> = saída fornecida pelas regras do modelo ou Taxa de aprendizado; e

EXP = operador de potencialização.

A literatura técnica sugere o método dos Gradientes Conjugados (CG) para a

estimação dos parâmetros. Entretanto, se os parâmetros forem interpretados com os resultados locais, a estimação desses parâmetros é um aspecto considerado importante para o resultado do RMS, e pode ser conveniente utilizar outro método onde se possam minimizar os desvios em torno da reta ou, no presente caso, em torno do hiperplano estimado sem problemas de tendenciosidade (CHOONG, 2009).

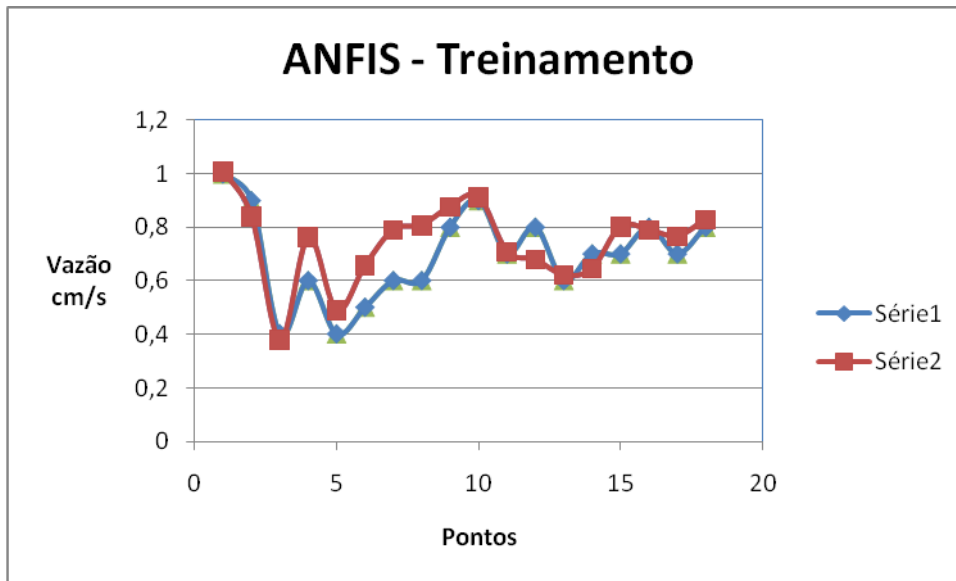


Figura 5.2 – Resultado do aprendizado da rede Neuro-Fuzzy pelo programa solver® para o Excel.

Após 18(dezoito) iterações a série 2, respostas fornecidas pela ANFIS treinada, tiveram uma boa superposição com a série 1, dados experimentais, indicando visualmente um bom aprendizado. Com isso, o modelo formulado para a função ativação da vazão, assumiu a seguinte expressão:

$$Y = b_k + W_1.X_1 + W_2.X_2 + W_3.X_3 + W_4.X_4 \quad (5.2)$$

Onde: V = vazão, em m<sup>3</sup>/s;

X<sub>1</sub> = batimetria;

X<sub>2</sub> = Maré;

X<sub>3</sub> = Ventos;

X<sub>4</sub> = Rugosidade; e

$\alpha_i = \text{parâmetros, } i = 0, \dots, 4.$

O modelo formulado passou pelo processo de aprendizagem, para os dados de entradas "*Fuzzyficados*", tendo sido excluídas, nesse processo, as observações relativas às linhas 19 e 20 desse quadro. Essa exclusão foi feita de vez que se pretendeu utilizar essas duas últimas observações em um processo de validação do modelo ajustado. O aprendizado da função está apresentado a seguir:

	$Y = 0,2 - 0,1 \cdot X_1 + 0,8 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4$				
Teste t =	(1,04)	(-1,02)	(5,4)	(0,4)	(1,2)
Probabilidade (p)	(0,4)	(0,4)	(0,0)	(0,7)	(0,2)

Tabela5.2 - Valores do Teste "t" e a probabilidade associada ao Teste "t".

O desempenho do programa "solver<sup>®</sup>", melhorou após 12 iterações, atingindo ao final um RMS de 77%, o que pode ser considerado aceitável. Além disso, o RMS ajustado foi de 70%. A associação das primeiras iterações com os seus pesos estão apresentados no quadro 5.1, abaixo:

Iteração	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$b_k$
1	1	1	4,999699	9,329798	0,345
2	9,745684	9,542959	1	-5,62499	5,631
3	-6,1683	-3,68801	1	7,720854	1
4	- 0,092	0,749	0,178	0,064	0,168

Quadro 5.1 - Resultados das 04(quatro) primeiras iterações.

Os números colocados na primeira linha abaixo dos estimadores, precedidos pela letra t, representam as estatísticas obtidas para o teste t de *Student* e os colocados na segunda linha, precedidos pela letra p, representam a probabilidade de rejeição da hipótese nula àquele nível de significância, adotando-se, para esse teste, o conceito de teste uni caudal. Embora o nível de significância adotado para aceitação dos parâmetros das variáveis qualitativas seja superior ao utilizado na maioria dos estudos pode-se admitir que a escolha desse nível fosse justificável em função do tipo de trabalho.

Apenas a variável ventos apresentou uma estatística com baixo nível de significância, *i.e.*, 30% RMS<sub>aj</sub>. No entanto, ressalto que o RMS ajustado é uma medida conveniente para comparação de resultados de funções ajustadas (HERKENHOFF L. *et al.*, 2013). Todavia, os resultados do trabalho indicam a necessidade em melhorar o tratamento para a forçante "Ventos".

O Método usado para o cálculo dos pesos apresentou também um RMS igual a 77%. A diferença destes dois valores, o erro padrão, então utilizado para ajustar os pesos nas camadas de saída, em seguida, na camada antes, a fim de diminuir o erro (otimizado por CG). Ao final do treinamento, a ANFIS nos permitiu ajustar a seguinte TGK, ordem zero:

$$Y = -0,1 * X_1 + 0,8 * X_2 + 0,1 * X_3 + 0,2 * X_4 + 0,2. \quad (5.3)$$

Onde: Y = Vazão;

X<sub>1</sub>= batimetria;

X<sub>2</sub>= Maré;

X<sub>3</sub> = Vento; e

X<sub>4</sub> = Rugosidade.

Note-se que a saída "y"(vazão) da rede é não-linear para os pesos w (por conveniência de notação, todos os pesos são aglomerados em um único vetor "x"). No processo utilizado a adaptação dos pesos na ANFIS, foi feita de tal modo, que o erro entre a saída obtida e a desejada (medições), foi treinada, utilizando-se, para o cálculo dos pesos, o conceito "*feedforward*".

O Excel<sup>®</sup> permitiu ainda a validação do modelo, através da realização do Teste F, Teste Fisher, para as observações. O resultado para o modelo foi de 11,1, com uma probabilidade associada de (0,0). Segundo Gujarati (2006), um aspecto muito importante no processo de aceitação de modelos é a coerência dos estimadores com o modelo formulado, traduzida em termos de sinal e do campo de variação, e, no caso, os

estimadores obtidos, todos podem ser considerados coerentes e consistentes o que permitiu a aceitação dessa função como representativa do comportamento da vazão para o canal.

E ainda, o resultado para o modelo do teste de Durbin-Watson foi de 1,12. O resultado obtido para a estatística F permite rejeitar a hipótese nula e o resultado obtido para a estatística de Durbin-Watson permite rejeitar a hipótese de auto correlação dos resíduos a um nível de significância de 5% ou 1%.

Os resultados do modelo foram avaliados como em um com nível aceitável, tendo em vista o valor de RMS (5.2) alcançado, tendo sido ainda analisada a diferença absoluta, adotando-se, para isso a expressão apresentada em 5.4. (ALGAHTANI,2013).

$$E_p = ((O_p - T_p) / O_i) * 100 \quad (5.4)$$

Onde: n = número de observações utilizadas na amostra na etapa de formação;

$O_i$  = saída real;

$O_p$  = saída experimental;

$T_p$  = saída fornecida pelas regras do modelo ou Taxa de aprendizado; e

$E_p$  = erro aceitável ou erro médio.

Após o aprendizado da rede ANFIS, o modelo foi validado com as duas observações não utilizadas no processo de ajustamento de 5.4, as quais forneceram um “Erro Médio” do modelo foi igual a 0,09. Além disso, os parametros se mostraram coerentes com os resultados experimentais, na parte condicional das regras (lineares da parte condicional da regra) e o modelo obedeceu ao sistema de inferência considerado, demonstrando atender a determinação pelo método do gradiente descendente, onde o vetor gradiente foi determinado a partir do algoritmo da retropropagação do erro (“*backpropagation*”).

Os resultados apresentados indicaram que os pesos estão de acordo com as

regras estabelecidas pelo sistema de inferência. As 02(duas) observações finais (19 e 20) permitiram a checagem do modelo, confirmando um “Erro Médio” igual a 0,09.

A estrutura do modelo pode ser facilmente relacionada com a física estrutural do sistema real, e, conseqüentemente, o modelo e seus parâmetros são fisicamente relevantes. Este conceito é importante de vez que, com ele, se pode verificar se o resultado indica o grau de aprendizado do modelo pelo seu RMS. Além disso, pode-se verificar a resposta do modelo, conseguindo representar o fenômeno hidrodinâmico e peculiaridades, como o fato de ajustá-lo para uma baía, ou seja, uma porção de mar ou oceano rodeada por terra, e, portanto, pouca influência dos ventos.

## 5.2 – EVOLUÇÃO GENÉTICA DO MODELO DE TRANSPORTE

Semelhante a forma do modelo híbrido hidrodinâmico, o modelo de transporte, tiveram seus dados “*Fuzzyficados*”, e após tiveram gerado os seus cromossomas correspondentes, conforme citado no item 5.1.

Os valores históricos de área, vazão e sedimentos levantados no trabalho, de Oliveira Fl. 2006, permitiram observar, com o auxílio das informações quadro 5.3, que relaciona a vazão, a área com a quantidade de sedimentos, turbidez (NTU), para o volume total a ser dragado no um Canal Sul, com 75 m de largura e 5 m de profundidade, foram estimado em total de, aproximadamente, 2,9 milhões de m<sup>3</sup> e para os dois canais (Norte e Sul), considerando- se as larguras e profundidades o volume total a ser dragado é de 3,4 milhões de m<sup>3</sup>.

Utilizando- se as informações levantadas para este caso, que constam da série histórica de resultados ( $D_{desejado}$ ), para os cenários pelo IME, 2003 e por Oliveira F.,



2006. Os vetores de entrada para o modelo utilizado naquele estudo foram “Fuzzificados”.

No presente trabalho a determinação do tamanho da amostra foi semelhante à considerada para ajustamento de modelo para a vazão. Para isso, foi considerada a série histórica dos dados de entrada levantados e tabulados, para o cálculo dos sedimentos O nível considerado admitiu- se aqui a adoção de um valor crítico pudesse corresponder ao grau de confiança desejado de 0,7; a um desvio-padrão populacional da variável vazão de 0,4; a uma margem de erro de 0,1 (TRIOLA, F., 1999); essas condições de contorno conduzem à determinação de um tamanho de amostra em torno de 7,84, ou seja, no mínimo 8(oito) observações. O quadro 5.3 repete as informações apresentadas no capítulo 3. Considerando- se que essa amostra contém 8 observações, pode- se admitir que satisfaz o tamanho mínimo desejado para o trabalho de ajustamento da função, como número *Fuzzy*.

Vazão (cm/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Sedimentos (NTU)
0,4	0,2	0,1
0,4	0,2	0,2
0,5	0,2	0,3
0,6	0,5	0,4
0,7	0,6	0,5
0,8	0,7	0,5
0,9	0,8	0,6
0,9	0,9	0,6

Quadro 5.3 - Valores de entrada do modelo GAF. Fonte: IME, 2003 e Oliveira F., 2006.

Considerando- se então, um conjunto com 08 (oito) indivíduos da população, a geração *n-ésima* pode ser representada como:  $x_i(t)$ , para  $i = 1, 2, \dots, 8$ , garantindo- se, com isso, a evolução natural da população e a capacidade de assegurar a convergência do algoritmo.

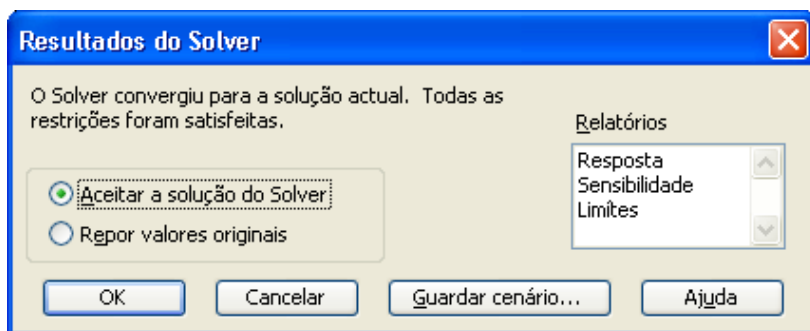


Figura 5.5 – Simulação dos Algoritmos Genéticos do modelo no software Solver®.

O software computacional, para a simulação do transporte de sedimentos, é o mesmo utilizado para a modelagem hidrodinâmica que será apresentada adiante para efeito de uma análise comparativa dos resultados. Na programação do modelo do transporte de sedimentos, foram utilizados os resultados obtidos no modelo hidrodinâmico (ANFIS). A evolução do modelo foi feita a partir de níveis d'água coletados previamente e outros dados hidrodinâmicos. Os principais parâmetros usados na modelagem matemática foram: área de modelagem: 32,5 km x 45,0 km; forçante “Vazão” d'água no canal e forçante “Área” do canal.

O trabalho considerou e fixou a probabilidade de cruzamento,  $P_C (Y_i (x))$ , igual á 0,6, e adotou um valor para a Taxa de mutação do modelo: probabilidade  $P_M (Y_j (x))$  igual a 1% de mutação conforme sugerido por Rodrigues (RODRIGUES F. L. *et al.*, 2004).

A função aptidão do transporte de sedimentos ajustada, a partir da expressão apresentada em 4.8, para a função aptidão de sedimentos assumiu a seguinte expressão:

$$\log (\text{Sed}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \log (V) + \alpha_2 \cdot \log (A) \quad (5.5)$$

Onde: Sed = sedimentos ;

V = vazão ( $X_1$ );

A = Área ( $X_2$ );

log = logaritmo; e

$\alpha_i$ , parâmetros da função, para  $i = 0, \dots, 2$ .

O modelo formulado foi ajustado aos dados apresentados no quadro 3.4. Os dados disponíveis para essas variáveis constituem uma amostra muito limitada de apenas 8 observações o que não representa um tamanho de amostra muito comum em estudos econométricos, entretanto pode ser considerado um tamanho aceitável para a abordagem proposta.

A probabilidade de mutação de um indivíduo pode ser admitida como ótima quando o ponto médio da sua aptidão no intervalo estiver próximo do limite inferior. Isto pode ser considerado ainda quando se não houve um primeiro lugar não se deve esperar que exista um segundo a probabilidade de mutação de um indivíduo for pequena, isto é, quando a diferença de se avaliar indivíduos superiores e (ou) a diferença de se avaliar os indivíduos de uma população for pequena. Isso implica em que o grau de dispersão entre os indivíduos deve ser grande, como pode ser visto abaixo:

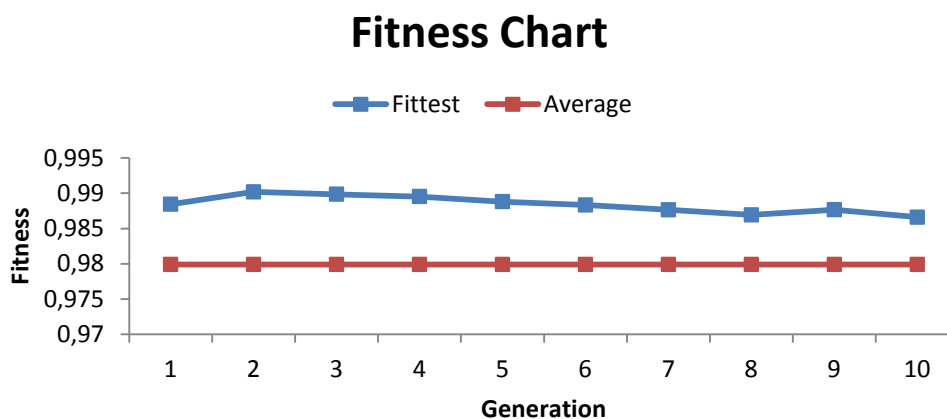


Gráfico 5.6 – Simulação da função Aptidão do modelo, no software Solver<sup>®</sup>.

A partir do processo de atuação dos operadores genéticos, a geração final de indivíduos obtida se estabilizou. Os novos cromossomos passavam pelo mesmo processo que a geração anterior de cromossomos, como: avaliação, seleção, cruzamento e mutação e, ao final, produção de uma nova geração de cromossomos para a iteração, até o processo não sofrer alteração significativa. Este processo foi repetido até que um número pré-determinado de gerações fosse atingido, com erro médio menor que 5%. Após a execução da 4ª geração, com a solução considerada, contendo os melhores cromossomas.

Para modelar o fenômeno, o transporte dos sedimentos levou em conta que as partículas comportavam-se de acordo com os valores de entrada de cada variável. Desta forma, as vazões e as áreas foram ajustadas a fim de permitir ajustar a função aptidão capaz de estudar os efeitos ligados a dragagem no canal do Linguado. Desta forma, apartir dos pesos equivalentes da função pertinência, o modelo permitirá considerar os diferentes cenários para o estudo da estabilidade do canal. Os resultados permitiram escrever a função aptidão a seguir, pelas regras estabelecidas:

$$Y_1 = 0,9 \cdot X_1 + 0,1 \cdot X_2 - 1,8 \quad (5.6)$$

Onde:  $Y_1 =$  Sedimento;

$X_1 =$  vazão;

$X_2 =$  área.

Portanto, o treinamento do GAF permitiu gerar uma população cada vez mais apta. Nesse processo cada saída obtida ao fim de cada iteração foi avaliada utilizando-se nessa avaliação o erro padrão (“*error standard*”). A chamada função de aptidão neste contexto, agrega ao indivíduo parte dos cromossomos de cada pai, com isso, o GAF foi capaz de fornecer um resultado confiável para os pesos da função objetivo, conforme disposto por Mitsuo G., em 2000, na obra “*Genetic Algorithms & Engineering Optimization*”. A função aptidão ficou ajustada pelo solver® com o resultado apresentado em 4.14, a seguir:

	$Y = -0,2 + 2,1 \cdot X_1 - 0,2 \cdot X_2$		
Teste t =	(-1,2)	(1,6)	(0,3)
Probabilidade (p)	(0,3)	(0,2)	(0,8)

Tabela 5.2 - Valores do Teste “t” e a probabilidade associada ao Teste “t”.

Onde:  $Y =$  sedimentos;

$X_1 =$  vazão; e

$X_2 =$  área.

Como já foi dito, os números colocados na primeira linha abaixo dos estimadores, precedidos pela letra t, representam as estatísticas obtidas para o teste t de *Student* e os colocados na segunda linha, precedidos pela letra p, representam a probabilidade de rejeição da hipótese nula àquele nível de significância, adotando para o teste o conceito de teste uni caudal (HERKENHOFF L. et al., 2013).

O treinamento do modelo GAF apresentou um RMS de 85%. Bem como, uma qualidade boa para o ajuste do modelo com os dados relacionados ao número de preditores no modelo, *i.e.*, um valor para o  $RMS_{aj}$  de 79%. Quanto a variável “Área”, a estatística indicou um baixo nível de significância. No entanto, pelas mesmas razões já apresentadas anteriormente pode-se admitir que a escolha desse nível seja justificável em função do tipo de trabalho.

O resultado obtido para a estatística F foi de um “F” igual a 14,2, para uma probabilidade (p) de “0”, permitiu rejeitar a hipótese nula, e ainda, o resultado obtido para a estatística de Durbin-Watson, foi de DW igual 1,35, para uma probabilidade (p) de “0”, permitiu rejeitar a hipótese de auto correlação dos resíduos a um nível de significância de 5% ou 1% (HERKENHOFF L. et al., 2013).

O software citado permite resolver problemas com até 2.000 variáveis. Existe outro software disponível, o Solver<sup>®</sup>, cuja capacidade é mais limitada e permite resolver problemas com até 200 variáveis. O presente estudo utilizou uma terceira versão desse software, o programa Solver<sup>®</sup>, baseado em algoritmos genéticos. Apenas como referência pode-se citar que este programa é um poderoso recurso que permitiu simplificar a formulação de um problema clássico do método da roleta (JIANG C., 2010).

O uso do Programa Solver<sup>®</sup> diz respeito às possibilidades de tratamento do problema, utiliza os recursos de programação linear, programação inteira, e programação quadrática, embora esta última mais aplicada em problemas de otimização de uma carteira de investimentos o que não é o caso do problema em estudo.

As condições de contorno, para as simulações, relativas aos níveis d’água nos contornos abertos (limites do modelo) foram especificadas para todos os intervalos de

tempo. As variações no tempo dos níveis d'água foram calculadas a partir das componentes das marés no Canal do Linguado (Norte), Ponto (M6), e no Canal do Linguado (Sul), Ponto (M8). Foram utilizados, ainda, os dados de ventos medidos nas estações meteorológicas.

As principais forças promotoras do movimento das águas para o trabalho estão relacionadas com correntes geradas pela oscilação da maré. A classificação das marés considerada foi a semidiurnas com desigualdade diurna, ocorrendo à predominância das componentes harmônicas *M2*, seguida pela *S2* (IME, 2003).

Os efeitos não lineares mostram-se determinantes, no modelo hidrodinâmico, na caracterização da maré astronômica o que ocasiona uma amplificação de todas as componentes do modelo, para o interior da Baía da Babitonga.

A figura abaixo nos mostra a evolução do fenômeno, de acordo com o modelo. Destacando o melhor experimento realizado pela otimização, considerando as variáveis vazão e área dragada do canal. O GAF, a partir da 4ª. Geração foi capaz de ajustar o valor dos pesos da função objetivo, gerando aptidão do melhor indivíduo e permanecendo até a sétima geração. O melhor indivíduo constante obtido ao longo dos processos não violou nenhuma restrição do fenômeno, conforme ilustrado pela série 1 (HERRERA F., 2001).

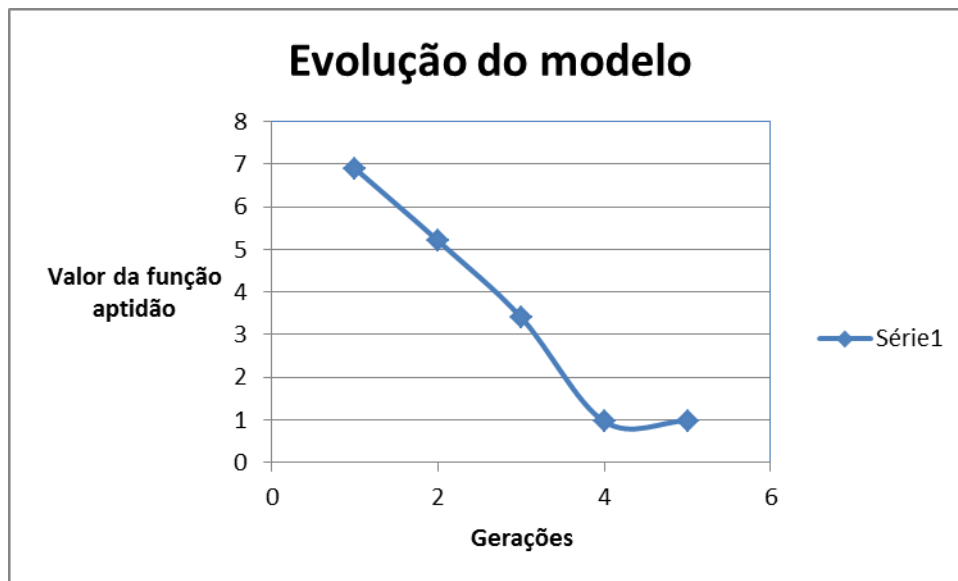


Gráfico 5.6 – gráfico da evolução dos experimentos nos processos.

Os resultados obtidos para o RMS do modelo de transporte já apresentados tiveram um “*error standard*” = 0,54. Esses resultados permitiram se chegar aos melhores indivíduos após 4 iterações. Na busca da solução, a partir da 4ª iteração, a função aptidão não teve uma evolução considerável, ressaltando que foram aplicados os operadores de cruzamento e mutação com as probabilidades pré-definidas.

Foram utilizados, ainda, os operadores: crossover aritmético e mutação uniforme. O critério de convergência adotado foi o número máximo de 7 gerações. Após a sétima geração, uma geração final de indivíduos foi obtida. Esse procedimento pode ser justificado conforme citado por Herrera. (HERRERA F.*et al.*, 2001).

O princípio básico do funcionamento do GAF é o critério de seleção vai fazer com que, depois de 4ª geração, a população inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. O método de seleção utilizado foi o Método da Roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta. Na tab. 5.2, pode ser visto a evolução genética da vazão (série 1, azul), da área (série 2, vermelho) e do transporte de sedimentos (série 3, verde), após 3 iterações.

## Aptidão dos Cromossomas

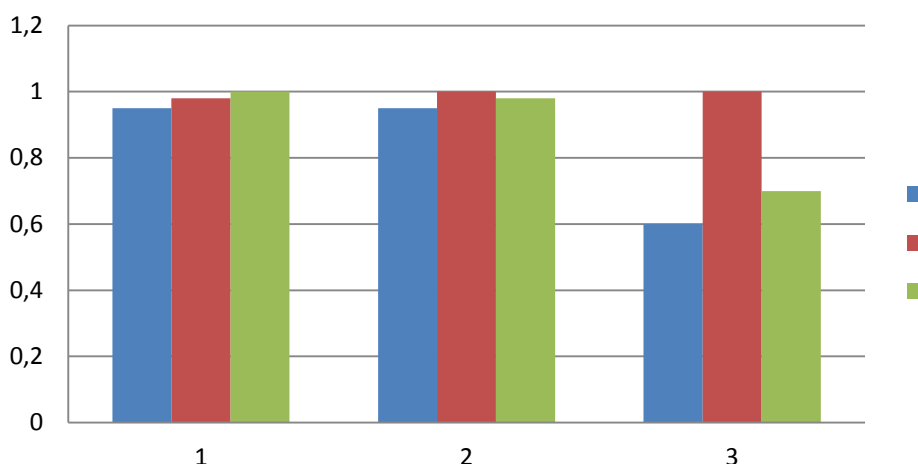


Tabela 5.2 – Melhores indivíduos no processo de ajuste da função aptidão.

Durante cada iteração, a seleção e a reprodução da população variou, no quadro 5.1 podem ser verificados os indivíduos que conseguirão se reproduzir, gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pela sua aptidão. Em outras palavras, os indivíduos com maior adaptação relativa têm maiores chances de se reproduzir.

Cromossoma	Evolução Genética		
	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)	Área (m <sup>2</sup> )	Sed(NTU)
[1]	1110	1110	1111
[2]	1110	1111	1110
[3]	1001	1111	1010

Quadro 5.4 – Os três primeiros indivíduos da população para os dados estudados.

A população de 08(oito) candidatos, para as 04(quatro) primeiras iterações, foi escolhida considerando os limites definidos para as variáveis de trabalho. Após a avaliação de cada indivíduo da população, foram analisadas as primeiras colunas, os indivíduos selecionados da 1ª iteração foram utilizados para prosseguimento do processo com a 2ª iteração e assim sucessivamente até o final do processamento que envolveu quatro iterações, quando foram selecionados os indivíduos mais aptos, capazes de garantir sua reprodução.



### 5.3 – COMPARAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO COM O MODELO ELEMENTOS FINITOS (MIKE21®)

Nos estudos de hidrodinâmica e de transporte de sedimentos podem ser feitos através da simulação envolvendo programas que utilizam a técnica de elementos finitos, como é o caso do MIKE21®. Este item envolve a comparação dos dois modelos de transporte de sedimentos analisados. O primeiro, MIKE21®, fornecido pela DHI – *Danish Hydraulic Institute* (MIKE21®) e o segundo, o modelo construído no presente trabalho.

Visando estudar a resposta do canal proposto, inicialmente, diante da simulação hidrodinâmica desenvolvida usando o modelo hidrodinâmico (ANFIS), foram propostos 03(três) cenários, simulando a largura e a profundidade do canal, conforme descrito a seguir. Dessa forma, as três diferentes configurações do canal consideradas.

A estimação do comportamento do modelo ajustado considerou 3 cenários distintos, além de diferentes possibilidades de comportamento condições gerais prevalentes na Baía de Babitonga, resultantes de variações das variáveis explanatórias, conforme apresentado a abaixo:

- Cenário A - Abertura do Canal Norte, mantendo o Canal Sul fechado;
- Cenário B - Abertura do Canal Sul, mantendo o Canal Norte fechado; e
- Cenário C - Abertura de ambos os canais, Norte e Sul.

Cenários	Remoção do aterro (m <sup>2</sup> )		Remoção do aterro (m <sup>2</sup> )		Remoção do aterro (m <sup>2</sup> )	
	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul
A	(100,150,200,250)	-	-	-	-	-
B	-	-	-	(100,150,200,250)	-	-
C	-	-	-	-	(100,150,200,250)	(100,150,200,250)

Quadro 5.5 -Cenários estudados para dragagem do canal do Linguado/SC.

A construção desses cenários envolveu a hipótese de ocorrência de situações onde estariam presentes diferentes condições das variáveis consideradas. Desta forma, foram consideradas condições de contorno que conduziram a definição do campo de variação das variáveis consideradas como sendo as mesmas, com o objetivo de tornar essas estimativas consistentes para efeito de avaliação dos resultados para o conjunto.

Em consequência dessas condições foi admitido que, na estimação dos resultados, em cada um dos cenários definidos, seria adotado o valor apresentado como “média”, resultando assim os seguintes valores utilizados como condições de contorno:

- Maré “Média”, o intervalo de 0,85 cm/s até 0,95 cm/s, para 0,4 até 0,7;
- Batimetria “Média”, o intervalo de 9 m até 5 m, para 0,4 até 0,6;
- Rugosidade “Média”, o intervalo de 0,02 até 0,01, para 0,4 até 0,6;
- Vento “Médio”, o intervalo de 8 cm/s até 5 cm/s, para 0,4 até 0,6.

O transporte de sedimentos realizado pelo MIKE21<sup>®</sup> avaliou a estabilidade do canal para os diferentes cenários. As simulações desenvolvidas no MIKE21<sup>®</sup> constam no apêndice do trabalho. Além disso, os dados utilizados pelo programa MIKE21<sup>®</sup> estão na escala local com uma resolução espacial (tamanho de malha) de 25 m. A resolução foi mais fina que para as simulações estabelecidas para o modelo na análise hidrodinâmica regional e dos tempos de residência. Esta resolução mais fina foi escolhida com o objetivo de obter uma melhor resolução da geometria do canal (IME,2003).

Os resultados probabilísticos, computados a partir de simulações determinísticas do programa MIKE21<sup>®</sup>, feitas ao longo de ciclos típicos de 30 dias de estudo. De modo à bem representar o que pode ocorrer nas diversas fases do fenômeno foi estimados os resultados para um período de 12 meses para a duração da atividade e, ao longo desse período, foram tomados períodos típicos de 30 dias para a modelagem de transporte de

sedimentos, considerando a fase inicial da dragagem, fase intermediária e fase final. Ao longo de períodos de 30 dias é possível verificar a atuação de todas as condições meteoceanográficas que normalmente agem na região, cobrindo, assim, todas as fases do ciclo de marés e diferentes ocorrências de ventos. Esse procedimento teve como objetivo garantir que a simulação realizada possa representar adequadamente todas as possíveis áreas atingidas pelas plumas de sedimentos.

De forma a representar adequadamente a dinâmica do transporte de sedimentos em suspensão oriunda do processo de dragagem, foi feito ao longo destes 30 dias o lançamento de sedimentos originados a partir da atividade realizada com a draga auto transportadora Hopper ao longo de todo canal de acesso e bacia de evolução foi feito ou foi considerado na simulação que isso tivesse sido feito.

Para representar o movimento da draga autotransportadora, considerou-se três fases de 30 dias. Na fase inicial, a de maior impacto, supôs-se que a draga autotransportadora atuava no trecho da entrada do canal de acesso. Na fase intermediária supôs-se a draga funcionando em trecho mais interno, no meio do canal de acesso em frente aos berços de atracação adotando-se aqui a hipótese sugerida em Ismail Celiket *al.*, 1988. Na última fase do trabalho, destacam-se cinco pontos da dragagem do canal, definidos considerando-se as informações constantes da série histórica da bacia.

A presença de uma extensa vegetação de manguezal indica uma vasta área de inundação periódica pelas marés, e provavelmente isto gera a assimetria da onda de maré, bem como do regime de correntes com predominância das correntes de vazante. Isto implica que o balanço de sedimentos ao longo do tempo é negativo, ou seja, o estuário exporta sedimentos para a região externa, e estes provavelmente se depositam formando a soleira do sistema, no Rio Palmital (SCHETTINI, 1999).

O processo de solução do modelo proposto, envolvendo a consideração dos 3 cenários distintos, com vistas a permitir a discussão sobre o efeito da dragagem de cada cenário, permitiu a tomada da melhor decisão. Em cada uma das figuras abaixo, foi possível verificar que os resultados obtidos pelo modelo híbrido conseguiram uma boa superposição com os resultados de modelo do programa MIKE21<sup>®</sup>. Cada uma das figuras representam um dos três cenários já apresentados, e ainda, esclareço que a série "2", em vermelho, são os resultados obtido através da simulação por elementos finitos (IME, 2003) e a série "1", em azul, são os resultados obtidos pelo modelo Fuzzy-Genético.

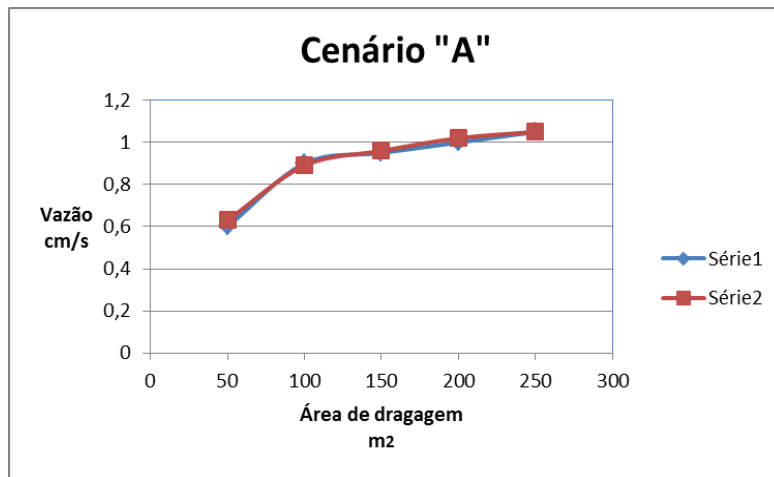


Figura 5.6 – gráfico da evolução dos experimentos para o cenário “A”.

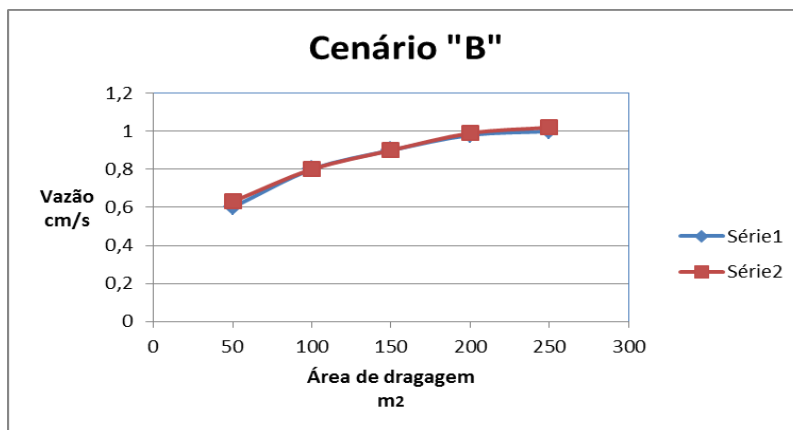


Figura 5.7 – gráfico da evolução dos experimentos para o cenário “B”.

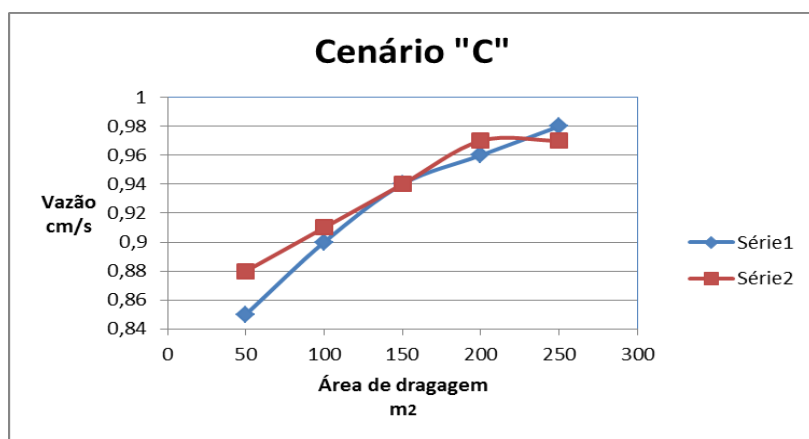


Figura 5.8 – gráfico da evolução dos experimentos para o cenário “C”.

Os resultados indicaram, em intervalos de aptidão diferentes, a série 1(azul) onde temos os resultados do modelo Híbrido de transporte e na série 2(vermelho) temos os resultados do modelo MIKE21<sup>®</sup>. Com isso, torna-se fácil de ver a boa superposição dos modelos, para os dois primeiros cenários, isto fica comprovado devido à correlação de 0,98 entre os gráficos. No entanto, o terceiro cenário, onde temos ambos os lados do canal do Linguado dragados, os modelos têm uma sobreposição de 0,75, no entanto, deve-se destacar que o comportamento dos modelos foi semelhante, não distorcendo a evolução da população, e, por conseguinte, permitindo uma boa representação do fenômeno.

Os resultados do transporte de sedimentos durante uma maré enchente indicaram que as taxas máximas foram encontradas no cenário “A”, tanto para a simulação no MIKE21<sup>®</sup>, quanto para a simulação usando Algoritmo Fuzzy-Genético. Onde, o valor máximo, neste cenário, para a vazão foi de 1,01 cm/s. No cenário “C”, foi onde houve uma pequena diferença de valores. A razão provável para está diferença é que as séries históricas para o canal “Sul” são pouco confiáveis, tendo em vista que este está fechado por muito tempo e todos os valores são teóricos.

Simultaneamente, os gradientes de transporte de sedimentos diminuem para um aumento da profundidade do canal, isso indica que o sistema com canais mais

profundos está mais próximo de uma situação de equilíbrio que o sistema com canais mais rasos. O modelo GAF permite ainda, concluir sobre o material transportado. Neste caso, pelo modelo Híbrido, para uma vazão de 1,01 cm/s, no cenário "A", corresponde a um NTU de 10, ou seja, um elevado transporte de sedimento e matéria orgânica.

Portanto, o diagnóstico de circulação de águas no canal do Linguado e na Baía de Babitonga – SC, através do modelo proposto permite inferir que o cálculo do tempo de residência, testado para os vários cenários e os tempos se mostraram mais interessantes, sob o ponto de vista de circulação de água e de impactos ambientais foram estudados.

## 6 - CONCLUSÕES

Esta Tese teve como principal objetivo executar uma pesquisa combinada em distintas áreas do saber, envolvendo processos hidrodinâmicos, processos sedimentológicos e inteligência artificial. A intenção foi explorar aspectos tecnológicos e científicos que, ao serem estudados conjuntamente, poderiam indicar o desenvolvimento de um modelo computacional Fuzzy-Genético capaz de realizar projeções sobre o transporte de sedimentos no Canal do Linguado/SC.

O trabalho de pesquisa teve início com a revisão das teorias de modelagem de processos hidrodinâmicos e sedimentológicos e prosseguiu com uma revisão de lógica Fuzzy e outros sistemas híbridos. A partir da análise das múltiplas perspectivas teóricas da modelagem foi possível identificar etapas de trabalho mais comuns para a modelagem de processos.

Na busca por um melhor entendimento dos aspectos abstratos e concretos e suas influências no trabalho de modelagem, foi feita uma revisão nos referenciais teóricos sobre o cenário apresentado e como eles poderiam influenciar as decisões presentes nos trabalhos de modelagem de processos, incluindo, desde o fechamento do Canal do Linguado em 1935 e as implicações possíveis desse fechamento que podem ter

implicado em uma grande quantidade de sedimentos depositada na área em torno do aterro, especialmente no lado norte do aterro onde um assoreamento considerável tem ocorrido e pode ter sido a causa de um decréscimo geral das profundidades do canal com relação à que havia antes do seu fechamento.

Durante o estudo foi possível estabelecer os objetivos, que permitiram um diálogo entre áreas de conhecimento distintas e proporcionar um modelo de análise que considerasse tanto aspectos cognitivos e racionais quanto aspectos teóricos e experimentais. A identificação das etapas e de seus fatores predominantes foi a base para a construção de um modelo hidrodinâmico híbrido (Neuro-Fuzzy) e de um modelo de transporte híbrido (Fuzzy-Genético), visando auxiliar a tomada de decisão para o dimensionamento dos canais a serem dragados após uma possível remoção do aterro.

Os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa proporcionaram um material rico em informações para o escopo da pesquisa. Foram usadas técnicas para a realização do trabalho, onde se assumiu uma seção transversal retangular para o canal, e também para o critério de estabilidade, desta seção transversal do canal. Tal forma, que seja garantida a capacidade para restabelecer uma pequena variação na sua área. Isto significa que se sedimentos são depositados no canal, então o canal deve ter uma capacidade de autolimpeza para restaurar a sua seção transversal.

Neste sentido, pode-se observar a vazão pelo Canal e os efeitos da dragagem para canais uniformes de mesma largura e diferentes. Isso significa que a análise apresentada aqui é limitada para estabilidade local do canal. Mudanças na geometria do canal podem ocorrer devido aos fortes gradientes longitudinais no transporte de sedimentos. Entretanto, a condição de uniformidade ao longo do canal é localmente satisfeita na maior parte da área crítica do canal, isto é na área onde se localiza o aterro.

Na pesquisa foi possível analisar o caso, contendo elementos que combinavam os forçantes hidrodinâmicos. O módulo hidrodinâmico foi calibrado para os valores das

séries de vazão do Canal do Linguado/SC, do estudo supracitado, com as medições realizadas em campo, posteriormente foram observados e validados os resultados da vazão, e para posterior utilização no módulo de transporte de sedimentos. Portanto, os resultados obtidos permitiram estudar o comportamento hidrodinâmico e o transporte de sedimentos para uma escala de tempo conforme a influência do aterro do Canal do Linguado, concluir sobre a sua estabilidade.

Após a calibração inicial do modelo, foi realizada a primeira modelagem apenas no módulo hidrodinâmico. Os resultados obtidos foram comparados com resultados validados de outros trabalhos, o que permitiu concluir pela validade do modelo.

A baixa descarga fluvial do Rio Cubatão durante o período de coleta, juntamente com a situação de sizígia e a amplificação da altura da onda de maré no interior da Baía da Babitonga, tornam este sistema verticalmente homogêneo. Isto implica que a maré é o principal mecanismo regulador da qualidade da água no interior do sistema. Durante períodos de maior descarga, uma maior importância pode ser atribuída à advecção fluvial, porém em situações episódicas.

## 6.1 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Dentre as contribuições inovadoras do trabalho, duas perspectivas se destacam: a modelagem de processos hidrodinâmicos e a modelagem de processos de transporte de sedimentos. O trabalho obteve uma série de resultados, estes foram comparados com diversos levantamentos históricos e o modelo gerado pelo software MIKE21, na região do Canal do Linguado/SC. Os modelos permitiram chegar às seguintes conclusões:

V.1.1 – Os modelos híbridos (Neuro-Fuzzy e Fuzzy-Genético) foram capazes de aprender e reproduzir o fenômeno estudado;

V.1.2 - A vazão do Canal do Linguado é altamente influenciada pela maré na Baía de Babitonga;



V.1.3 - Existe uma correlação forte entre a vazão do Canal do Linguado e a quantidade total de sedimentos transportados pelo mesmo.

V.1.4 - O aporte de sedimentos oriundos da Baía de Babitonga possui magnitude considerável, sendo este o grande contribuinte para o volume de sedimentos da região do Canal do Linguado em Santa Catarina;

V.1.5 - Apesar do aporte considerável de sedimentos oriundos da Baía de Babitonga, verificou-se que uma variação de profundidade no Canal do Linguado influencia o transporte de sedimentos de forma diferente na região.

## 6.2 - SUGESTÕES

Como se observa a seguir, a abordagem interdisciplinar da pesquisa pode servir de inspiração para outras investigações envolvendo teorias, métodos e procedimentos usados na Engenharia de Produção. A partir disto, com os resultados e conclusões desta dissertação, as seguintes sugestões para trabalhos e ações futuras são apresentadas:

V.2.1 – Aprimorar o modelo Neuro-Fuzzy, visando refinar a análise dos forçantes envolvidos no modelo, como por exemplo, os ventos para os diversos pontos da Baía de Babitonga/SC, de forma a possibilitar uma calibração mais precisa do modelo hidrodinâmico;

V.2.2 – Buscar melhorar as condições de contorno ficando recomendados levantamentos hidrográficos com menor espaçamento de tempo, com intuito de melhorar a qualidade dos dados;

V.2.3 - Melhorar o modelo, levando-se em conta a diferença de densidade provocada pela salinidade do fluido;

V.2.4 – Ampliar os estudos dos modelos hidrodinâmicos e transporte de sedimentos, para diferentes cenários relacionados com os recursos hídricos, tais

como – barragens, relação do meio ambiente com a flora e a fauna, qualidade da água, morfologia fluvial e também portos. Deve ficar recomendada a necessidade do aprofundamento dos estudos visando permitir a execução do programa.

Com o desenvolvimento do País e a sua conformação física, ou seja, enorme quantidade de rios, bacias e região costeira é importante destacar as perspectivas para a continuidade dos estudos no sentido de construir ferramentas capazes de auxiliar aos gestores e a sociedade na tomada de decisão correta, visando um viés de sustentabilidade. Isto posto, não poderia deixar de ser colocado a contribuição do conhecimento trazido pelo trabalho para a comunidade científica e acadêmica. Em oportuno, apesar de algumas dificuldades com relação à complexidade dos dados disponíveis, ressaltando o atendimento de todos os objetivos propostos para a Tese.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. GEYER-SHULZ (1995). **Fuzzy rule-based expert systems and genetic machine learning**, studies in fuziness, Physica Verlag, Heidelberg, 1995.

ADRIOLO M. V.; dos SANTOS I.; GIBERTONI R. C.; de CAMARGO A. S. G. (2008). **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS BELO HORIZONTE - MG, 21 a 25 abr 2008.

ALGAHTANI A. & WHYTE A. (2013). **Artificial neural networks incorporating cost significant items towards enhancing estimation for (life-cycle) costing of construction projects**, Australian Journal of Construction Economics and Building, **13** (3), p.51-64.

ANGELOV P. P.(2003). **An evolutionary approach to Fuzzy rule-based model synthesis using indices for rules**, Fuzzy Sets and Systems , Information Sciences, 137, p.325–338.

ANGELOV P. P.& BUSWELL R. A.(2003). **Automatic generation of Fuzzy rule-based models from data by genetic algorithms**, Information Sciences, 150, p.17–31.

ANGELOV P. & GUTHKE R. (1997). A GA-based approach to optimization of bioprocesses described by fuzzy rules. Bioprocess Engineering, Vol.16(5), p.299-303.

ASSAD L. P. F. et al. (2009). **Curso de noções básicas de modelagem hidrodinâmica computacional e de dispersão de poluentes**, maio 2009, Laboratório de métodos computacionais - UFRJ/COPPE.

BRAGA A. P., (2000), **Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações**, LTC.

**BRANT P. G.C. (2012). Modelagem hidrodinâmica ambiental de dragagem no canal de acesso ao porto de tubarão e na região de Bota Fora – ES. Tese, Junho de 2012 – UFRJ/COPPE/PEOc.**

**BROWN, A.C.; McLACHLAN, A. (1990). Ecology of Sandy Shores. Elsevier, Amsterdam, Holland, 328 pp.**

**C.A.F. SCHETTINI, CARVALHO J.L.B. (1999). Caracterização Hidrodinâmica do estuário do rio Cubatão, Joinville, NOTAS TÉCN. FACIMAR, 3, p.87-97.**

**CASTRO Fo., B. M.; LEE, T. N.(1995). Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. Journal of Geophysical Research, v. C8, n. 100, p. 16.045-16.056.**

**CASTRO, J. L.; ZURITA, J. M. (1997). An inductive learning algorithm in Fuzzy systems. Fuzzy Sets and Systems, 89, 2, p.193-203.**

**CAUSEY R. L.(1994). Logic, Sets and Recursions, Boston.**

**CHANG, C. H.; CHEN, S. M. (2000). A new method to generate Fuzzy rules from numerical data based on the exclusion of attribute terms. Proceedings of the 2000 International Computer Symposium: Workshop on Artificial Intelligence, Chiayi, Taiwan, Republic of China, p.57-64.**

**CHEN Y. C.; WANG L. H.; CHEN S. M.(2006). Generating Weighted Fuzzy Rules from Training Data for Dealing with the Iris Data Classification Problem, International Journal of Applied Science and Engineering 2006. 4, 1, p.41-52.**

**CHOONG J.(2009). Build Neural Network With MS Excel®, Published by XLPert Enterprise Copyright © 2009 by XLPert Enterprise.**

**de ARAÚJO R. N. e ALFREDINE P. (2001). O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudo de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo), RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol 6 n.2 Abr/Jun 2001, p.15-28.**

de OLIVEIRA J. V. (2007). **Semantic Constraints for membership function optimisation**, in: Proc. *DHI Water&Environment*, 2003. Manuais do Software MIKE 21. Copenhagen, Dinamarca.

DHI, MIKE 21, Hydrodynamic Module, User Guide.

ELLIOT, A. J. (1982). **Wind-driven flow in a shallow estuary**. *Oceanologica Acta*, v. 5, p. 7-10.

ENGELUND, F. e HANSEN, E., (1967). **A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams**. TekniskForlag, Danish Technological University, Copenhagen, Dinamarca.

FEMAR, (2000). **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras**. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro, RJ. 281 pp.

FRANCO, A.S., (1988). **Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction**. FCTH, São Paulo.

GEYER, W. R. (1997). **Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 44, p.713-722.

Gill, A E.. (1982). **Atmosphere-Ocean Dynamics**. *International Geophysics Series*, Vol. 30. London Academic Press, pp.662.

GINSBERG M.. (1993). **Essentials of Artificial Intelligence**. San Francisco: Academic Press/Morgan Kaufmann.

GOLDBERG D. E. (1989). **Genetic Algorithms in search optimization, and machine learning**, Addison.

GRACEA V. B., MAS-PLAC J., NOVAISB T. O., SACCHID E., ZUPPIA G. M. (2008) **Hydrological mixing and geochemical processes characterization in an estuarine/mangrove system using environmental tracers in Babitonga Bay (Santa**

**Catarina, Brazil), 684 V. B. Grace et al./Continental Shelf Research, Vol. 28 , p.682–695.**

**GUIMARÃES S.C.(2013).A Gestão ambiental em sistemas e redes: uma perspectiva para educação ambiental nos municípios brasileiros, Rev.BEA, Rio Grande, Vol. 8, (2), p.77-92.**

**GUJARATI, D.(2006). Econometria Básica , Ed. Campus Elsevier, 4ª tiragem, trad. 4ª edição.**

**HANDANHAL V.& RAVINDER. (2013). Determining The Optimal Values Of Exponential Smoothing Constants – Does Solver Really Work. American Journal of Business Education – May/June 2013 Vol.6 (3).**

**HERKENHOFF L., FOGLI J. (2013). Applied Statistics for Business and Management using Microsoft Excel, © Springer Science + Business Media New York 2013 , ISBN 978-1-4614-8422-6.**

**HERRERA F., CORDON O., HOFFMANN F., MAGDALENA L. (2001).Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory, Genetic Fuzzy Systems Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases, Vol. 19.**

**IME & UNIVALE. (2003). Diagnóstico dos estudos de circulação de água no canal do Linguado e na Baía de Babitonga/SC.**

**JAIN L. C.; MARTIN N. M.. (1998) .Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications. CRC Press, CRC Press LLC, ISBN: 0849398045.**

**JANG J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive – Network - Based Fuzzy Inference System. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, Vol. 23 (3), MAY-JUNE 1993.**

**JANG J. S. R.; SUN C. T.; MIZUTANI E. (1997).Neuro-Fuzzy and Soft computing – A computational approaching learnig and machine intelligence, Prentice Hall.**

*JIANG C.,A .* (2010). **Reliable Solver of Euclidean Traveling Salesman Problems with Microsoft Excel Add-in Tools for Small-size Systems**, JOURNAL OF SOFTWARE, Vol. 5 (7), Jul 2010.

*KALDERSTAM J.* (2015). **Neural Network approaches to survival analysis**, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Astronomy and Theoretical Physics, Faculty of Science, Lund University.

*KASABOV N. K.* (1998). **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering**. A Bradford Book. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

*KLEMENS A. L, A.* (2012). **Legislação ambiental como foco de conflitos: uma análise a partir das representações sociais da natureza dos pequenos agricultores em Minas Gerais, Brasil**, Rev. Soc. & Nat., Uberlândia, Ano 24 (3), p.405-418, set/dez. 2012.

*KOUSKY, V. E.* (1979). **Frontal influences on Northeast Brazil**. Monthly Weather Review, Vol. 107, p. 1140-1153.

*M. S. BRAIT, D. DALZOTTO.* (2010). **Simulações numéricas das equações de águas rasas adimensionais**, Anais CNMAC, vol.3.

*M. SAKAWA.* (2002). **Genetic Algorithms and Fuzzy multiobjective optimization**, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

*MAMDAMI E. H..*(1974). **Application of Fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant**, Proceedings of IEEE Control and Science, Vol. 121(12), p.1585-1588.

*MITSUO G., CHENG R.*(2000). **Genetic Algorithms & Engineering Optimization**. John Wiley & Sons, Inc, Japan.

*MORRIS, A.W.* (1985). **Estuarine chemistry and general survey strategy**. In: HEAD, P.C..Practical estuarine chemistry. London: Cambridge University Press, p.60.

*NANTES M. A. F., SOUZA C. C., NETO J. F. R.* (2010). **Otimização de funções utilizando algoritmos genéticos no aplicativo MS Excel**, XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional.

*OSCAR C., HERRERA F., HOFFMANN F., MAGDALENA L.* (2001). **Genetic Fuzzy system evolutionary tuning and learning of Fuzzy knowledge bases**, Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory Vol. 19, World Scientific.

*PAGLIOSA P. R.* (2006). **Distribuição da macrofauna bêntica do entremarés ao sublitoral em uma praia estuarina da Baía da Babitonga, Sul do Brasil**, Biotemas, Vol.19 (1), p. 25-33, mar 2006, ISSN 0103 – 1643.

*PANANAYOTOVA G. & SL. SLAVOVA S. L.* (2010). **Modeling Network flow by Excel solver**, Trakia Journal of Sciences, Vol. 8 (3), p.12-15.

*PEDRYCZ W.; ROCHA A.* (1993). **Fuzzy-set based models of neuron and knowledge-based networks**. IEEE Fuzzy Systems, Vol.1(4), p.254-266.

*PINHEIRO L.; CREMER M.* (2003). **Sistema pesqueiro da Baía da Babitonga, litoral norte de Santa Catarina: uma abordagem etnoecológica**, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Vol. 8, p. 59-68, jul/dez. Editora UFPR.

*PRICE WATER HOUSE e GEOTÉCNICA (Consórcio).* (1992). **Fortalecimento institucional do IBAMA: Cenários de gestão ambiental brasileira**. Relatório Final (xerog.). Brasília, p.8.

*PUGH, D.T.*(1987). **Tides, surges and mean sea level, a handbook for engineers and scientists**. New York, John Wiley and Sons, p.472.

*R. YAGER & D. FILEV* .(1994). **Essentials of Fuzzy Modeling and Control**, John Wiley and Sons, New York.



REZENDE, S. et al. (2005). **Sistemas inteligentes – Fundamentos e aplicações**, Ed. Manole.

RODRIGUES A. M. T. . (2000). **Diagnóstico Sócio-Econômico e a percepção ambiental das comunidades de pescadores artesanais do entorno da Baía da Babitonga/SC: um subsídio ao gerenciamento costeiro** .Tese UFSC/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

RODRIGUES, A. M. T.et al. .(1998). **Proteção e controle de ecossistemas costeiros: manguezal da Baía da Babitonga**. Brasília: Ibama.

RODRIGUES, A.M .T.; BRANCO, E.J; PEREIRA, M.T.; ZIMMERMANN, C E.; RIBEIRO, G .C.; BRANCO, J.O.; KUROSHIMA, K.N.; CLEZAR, L.; BRUTTO, L.F.; CREMER, M. J.; SOUZA FILHO, M.A.C.; HOSTIM SILVA, M. TOGNELLA, M.M.P; ALVES, S; BELLOTTO, V. (1998). **Manguezal da Baía da Babitonga**. IBAMA, Coleção Meio Ambiente, Série Estudos Pesca, Vol.25,p.145.

ROSENBLATT F., (1958). **The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain**. Psychol. Rev. Vol.65, p.386-408.

ROSMAN, P. C. C.. (2008). **Referencia Técnica do SisBaHiA**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Departamento de Recursos Hídricos & Meio Ambiente/ Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, PENO-COPPE. Rio de Janeiro.

ROSS, T. J.(2004). **Fuzzy logic with Engeneering application**, 2<sup>nd</sup> Edition, John & Willey Sons Ltd.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. (1998). Tropics – South America. In: KAULY, D. J. e VINCENT, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. American Meteorological Society, Boston, p.119-139.

SCHETTINI C. A. F. & J.L.B. CARVALHO.(1999). **Caracterização hidrodinâmica do estuário do rio cubatão/SC**. NOTAS TÉC. FACIMAR, Vol.3, p.87-97.

*SCULLY, M. E.; FRIEDRICH, C. T.; BRUBAKER, J. M.* (2005). **Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field.** Estuaries, Vol. 28, p. 321-326.

*SNELGROVE, P. V. R.; BUTMAN, C.A.* (1994). **Animal-sediment relationships revisited: cause versus effect.** Oceanography and Marine Biology Annual Review, 32:111-177.

*SPYRIDON G.*(2009). **Data Mining and Predictive Modeling with Excel 2007,** Casualty Actuarial Society Forum, Winter 2009.

*STELLING, G.S., J. A.Th M. VAN KESTER.* (1994). **On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes,** Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 18, p.915-955.

*SUBHASISH D.* (2014).**Fluvial Hydrodynamics - Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena,** Springer Heidelberg New York Dordrecht London, ISSN 2190-5193.

*TAKAGI T; M. SUGENO.*(1985). **Fuzzy identification of system and its application to modelling and control.**IEEE Transaction on system, man, and cybernetics, Vol.15(1), p.116 – 132.

*TRIOLA, M. F.* (1999).**Introdução à Estatística.** 7ª. Ed. Rio de Janeiro: LTC.

*TRUCCOLO E. C. ; SCHETTINI C. A. F.* (1999). **Marés astronômicas na Baía de Babitonga/SC.** NOTAS TÉCN. FACIMAR, Vol.3, p.57-66.

*TRUCCOLO E. C.* (2011). **Estudo do comportamento do vento no litoral centro-norte de SANTA CATARINA.** Rev. Brasileira de Meteorologia, Vol.26 (3), p.451 - 460.

*UNITERMOS.* (2000). **Programa de recuperação ambiental da Baía da Babitonga.**FUNDEMA. Joinville, Santa Catarina.

*VALENÇA M. J. L.* (2010). **Fundamentos das Redes Neurais: exemplos em Java,** 2ª. Edição Revisada e Ampliada. Ed. LivroRápido, ISBN 978-85-7716-342-7.

VENNARD J. K.; STREET R. L. (1978). **Elementos de mecânica dos fluidos**, 5ª Edição, Ed. Guanabara.

VIEIRA C.V. et al. (2008). **Caracterização morfosedimentar e setorização do complexo estaurino da Baía da Babitonga/SC**, Boletim Paranaense de Geociências, Vol. 62-63, p. 85-105, Editora UFPR.

WANG B., XIAOKANG F., CHEN T., ZHOU G.(2014). **Modeling Supply Chain Facility Location Problem and Its Solution Using a Genetic Algorithm**, JOURNAL OF SOFTWARE, VOL. 9, NO. 9, SEPTEMBER 2014.

WANG L. X.; MENDELL J. M. (1992). **Generating Fuzzy rules by learning from examples**, IEEE Transaction on system, man, and cybernetics, Vol. 22 (6), nov-dec.

WEI, W. W. S. (1994). **Time Series Analysis - Univariate and Multivariate Methods**. New York: Addison-Wesley Publishing Company, p.478.

WIDROW B. & M. HOFF.(1960). **Adaptative switching circuits**. Institute of Radio Engineers, Western Eletronic Show and Convention, Vol.4, p.96-104.

WINSTON P., (1992). **Artificial Intelligence**. Adison-Wesley.

WUNDERLICH A. C.; PINHEIRO M. A. A. & RODRIGUES A. N.(2008) .**Biologia do caranguejo-uçá, Ucidescordatus(Crustacea: Decapoda: Brachyura), na Baía da Babitonga, Santa Catarina, Brasil**, Rev. Brasileira de Zoologia Vol.25 (2), p.188–198, June 2008

ZADEH L. A.; FU K. S.; TANAKA K.; SHIMURA M.(1975). **Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision process**, Academic Press, Inc.New York San Francisco London.

## 8 – APENDICE

### 8.1.Consolidação dos resultados da Estação Abaeté de totais de precipitação.

<b>código</b>	<b>ano</b>	<b>dia/mês</b>	<b>hora</b>	<b>mm</b>
347	2006	01/out	00:00	0,2
347	2006	01/out	02:00	0,0
347	2006	01/out	04:00	0,2
347	2006	01/out	06:00	0,0
347	2006	01/out	08:00	0,0
347	2006	01/out	10:00	0,0
347	2006	01/out	12:00	0,0
347	2006	01/out	14:00	3,6
347	2006	01/out	16:00	5,0
347	2006	01/out	18:00	2,2
347	2006	01/out	20:00	1,2
347	2006	01/out	22:00	0,4
347	2006	02/out	00:00	0,6
347	2006	02/out	02:00	0,6
347	2006	02/out	04:00	2,0
347	2006	02/out	06:00	0,2
347	2006	02/out	08:00	0,4
347	2006	02/out	10:00	0,2
347	2006	02/out	12:00	0,2
347	2006	02/out	14:00	0,0
347	2006	02/out	16:00	0,0
347	2006	02/out	18:00	0,2
347	2006	02/out	20:00	0,0
347	2006	02/out	22:00	0,2

Tabela 8.1 - Totais de precipitação coletados na Estação Abaeté. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

## 8.2.Consolidação dos resultados da Estação Univille de totais de precipitação

<b>código</b>	<b>ano</b>	<b>dia/mês</b>	<b>hora</b>	<b>mm</b>
- x -	2006	01/set	09:00	6,3
- x -	2006	01/set	15:00	1,5
- x -	2006	01/set	21:00	0,8
- x -	2006	02/set	09:00	5,1
- x -	2006	15/set	21:00	8,5
- x -	2006	16/set	09:00	12,6
- x -	2006	16/set	15:00	5,0
- x -	2006	16/set	21:00	13,0
- x -	2006	17/set	09:00	5,9
- x -	2006	18/set	09:00	0,7
- x -	2006	20/set	09:00	8,3
- x -	2006	20/set	15:00	35,2
- x -	2006	23/set	15:00	14,0
- x -	2006	24/set	09:00	1,8
- x -	2006	24/set	15:00	2,1
- x -	2006	25/set	09:00	1,2
- x -	2006	28/set	09:00	1,2
- x -	2006	29/set	09:00	12,0
- x -	2006	29/set	15:00	13,5
- x -	2006	29/set	21:00	1,4
- x -	2006	30/set	21:00	0,0

Tabela 8.2 - Totais de precipitação coletados na Estação Univille. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

### 8.3. Consolidação dos resultados dos dados pluviométricos entre 2005-2006

<b>estação</b>	<b>mês/ano</b>	<b>mm</b>
Abaeté	jan/2005	300,4
Abaeté	mar/2005	89,6
Abaeté	mai/2005	147
Abaeté	jul/2005	190,8
Abaeté	set/2005	277,6
Abaeté	nov/2005	151,4
Abaeté	fev/2006	164,4
Abaeté	abr/2006	46
Abaeté	jun/2006	36,4
Abaeté	out/2006	109,4
Univille	jan/2005	437,9
Univille	mar/2005	147,7
Univille	mai/2005	121,9
Univille	jul/2005	159,1
Univille	set/2005	248,8
Univille	nov/2005	209,1
Univille	fev/2006	300,2
Univille	abr/2006	113,2
Univille	jun/2006	29,3
Estrada Saí	jan/2005	-
Estrada Saí	mar/2005	-
Estrada Saí	mai/2005	104,8
Estrada Saí	jul/2005	152,8
Estrada Saí	set/2005	216
Estrada Saí	nov/2005	250
Estrada Saí	fev/2006	201,9
Estrada Saí	abr/2006	84,4
Estrada Saí	jun/2006	19,4
Estrada Saí	out/2006	148

Tabela 8.3–Dados pluviométricos 2005-2006. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

#### 8.4. Resultados da Coleta mensal dados de turbidez em 2006.

<b>rio</b>	<b>mês/ano</b>	<b>MédiaNTU</b>
Braço	mai/2006	19,13
Cubatão	mai/2006	2,68
Canela	mai/2006	5,15
Pirabeiraba	mai/2006	5,34
Bonito	mai/2006	4,83
Turvo	mai/2006	5,07
Três barras	mai/2006	0,93
Cupim	mai/2006	7,25
Sete voltas	mai/2006	3,45
Onça	mai/2006	5,32

Tabela 8.4–Dados de turbidez de 2006. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

#### 8.5. Resultados da Evolução de turbidez em 2006.

<b>rio</b>	<b>mês/ano</b>	<b>Média%</b>
Braço	mai/2006	-8,2
Cubatão	mai/2006	-76,2
Canela	mai/2006	-60,3
Pirabeiraba	mai/2006	26,5
Bonito	mai/2006	-9,0
Turvo	mai/2006	-13,2
Três barras	mai/2006	-69,1
Cupim	mai/2006	2,1
Sete voltas	mai/2006	6,7
Onça	mai/2006	11,5

Tabela 8.5–Evolução dos dados de turbidez de 2006. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

8.6. Extrato da planilha para o cálculo de sedimentos em suspensão de todos os rios em 2005.

Resultados experimentais	Rios									
	Braço	Cubatão	Canela	Pirabeiraba	Bonito	Turvo	Três barras	Cupim	Sete voltas	Onça
Data da coleta	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005	abr/2005
Início procedimento	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005	mai/2005
NTU médio	57,23	6,66	34,06	9,19	22,32	11,40	4,60	15,73	11,19	29,77
Membrana No.	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Peso seco	0,0763	0,0759	0,0754	0,0766	0,0773	0,0705	0,0709	0,0715	0,0753	0,0704
24 h	0,0810	0,0769	0,0785	0,0775	0,0797	0,0717	0,0714	0,0731	0,0759	0,0732
Vol (ml) filtrado	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Vol total(g/ml) seco 72 h	0,0047	0,0010	0,0031	0,0009	0,024	0,0012	0,0005	0,0016	0,0006	0,0022
Capsula seca 600°C	38,2971	44,3977	44,1800	38,2971	44,3977	44,1800	38,2971	44,3977	44,1800	38,2971
Vol(g/100ml)s/MO m <sup>3</sup> /s	0,0049	0,0028	0,0032	0,0023	0,0011	0,0005	0,0007	0,0027	0,0025	0,0021
Vol(g/100ml)MO	-0,0002	-0,0018	-0,0001	-0,0014	-0,0013	-0,0007	-0,0012	-0,0011	-0,0019	-0,0001
g/1000ml	0,0470	0,0100	0,0310	0,0090	0,0240	0,0120	0,0050	0,0160	0,0060	0,0220
mg/l	47,0	10,0	31,0	9,0	24,0	12,0	5,0	16,0	6,0	22,0
Vol(g) / m <sup>3</sup> /s	47,0	10,0	31,0	9,0	24,0	12,0	5,0	16,0	6,0	22,0
kg/min	2,82	0,60	1,86	0,54	1,44	0,72	0,30	0,96	0,36	1,32
kg/mês	121824	25920	80352	23328	62208	31104	12960	41472	1552	57024
Vazão média (m <sup>3</sup> /s)	2,52	9,57	0,61	2,04	0,36	0,28	3,63	0,33	0,55	0,46
kg/min	7,11	5,74	1,14	1,10	0,50	0,20	1,09	0,32	0,20	0,61

Tabela 8.6–Sedimentos em suspensão nos rio da Baía de 2006. Fonte: OLIVEIRA F., 2006.

8.7. Resultados da batimetria da Baía da Babitonga e do Canal do Linguado para a Situação Atual (Cenário A), fig.36, IME 2003.

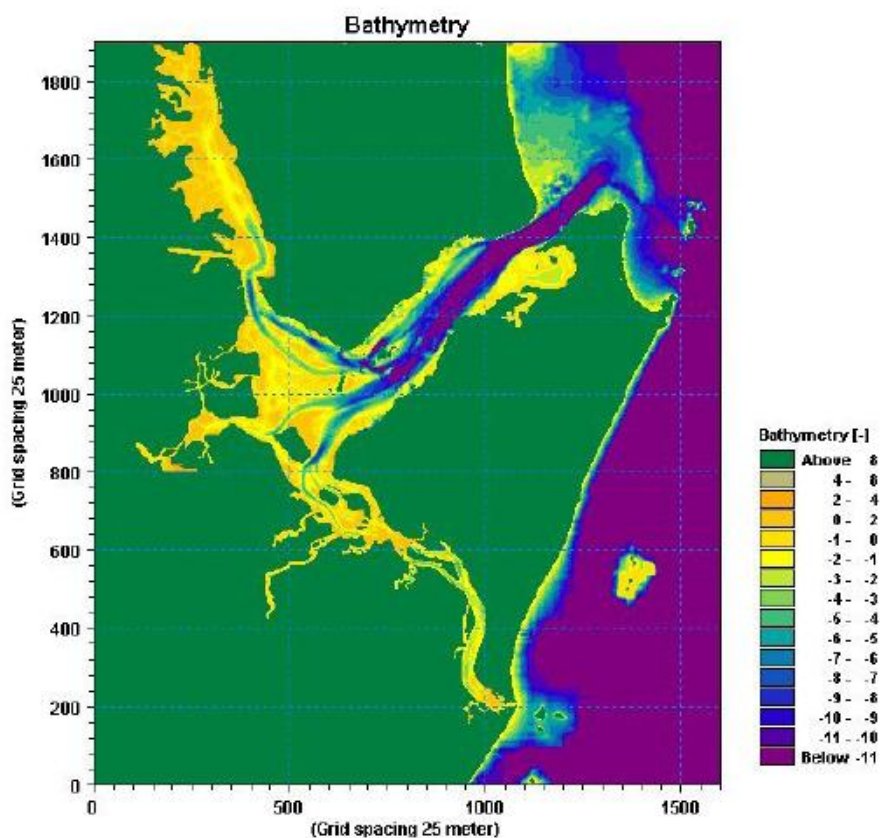


Figura 8.1–Batimetria do Cenário “A” da Baía de Babitonga. Fonte: IME, 2003.



8.8. Resultados da batimetria na região do aterro para a Situação Atual (Cenário A).

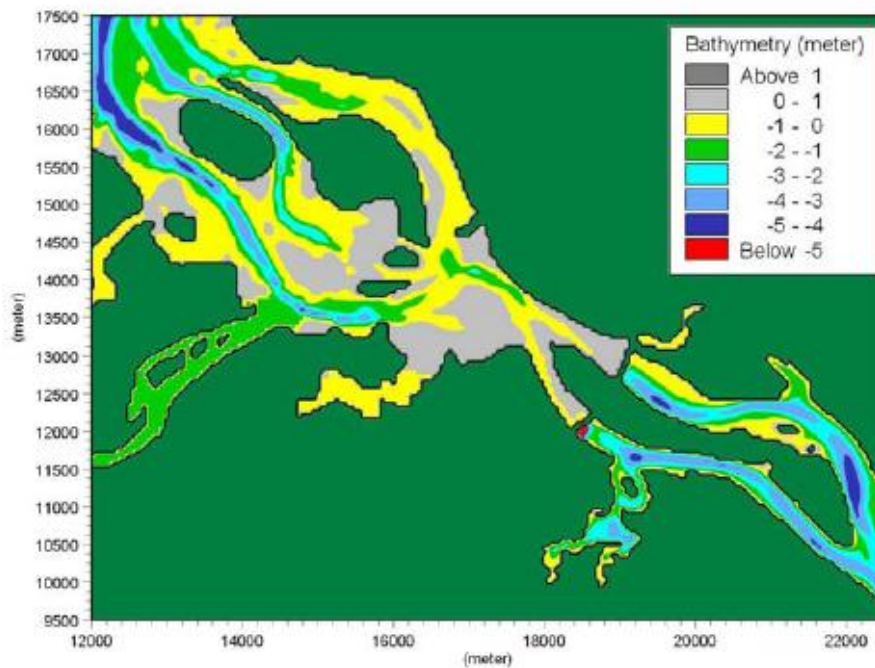


Figura 8.2–Batimetria considerando o aterro do Cenário “A” da Baía de Babitonga.Fonte: IME, 2003.

8.9. Resultados da batimetria na região da Barra do Sul para a Situação Atual (Cenário A), fig.38, IME 2003.

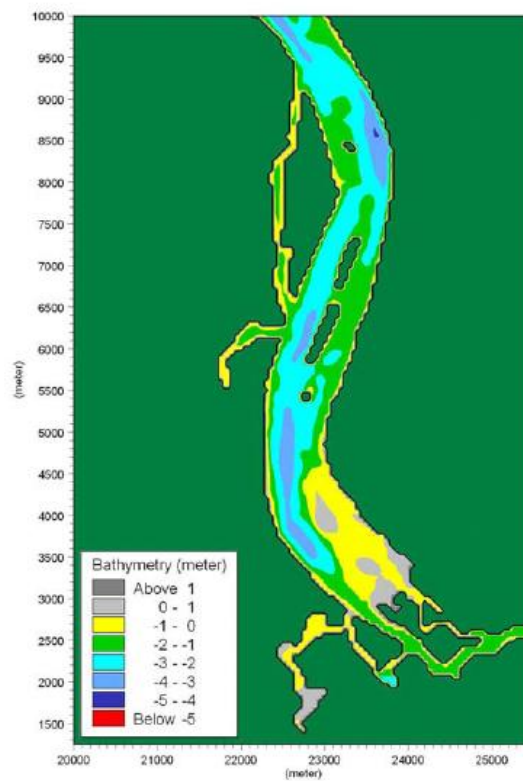


Figura 8.3–Batimetria na região da Barra do Sul do Cenário “A” da Baía de Babitonga.Fonte: IME, 2003.

8.10. Resultados da batimetria na região do aterro para os Cenários B e C.

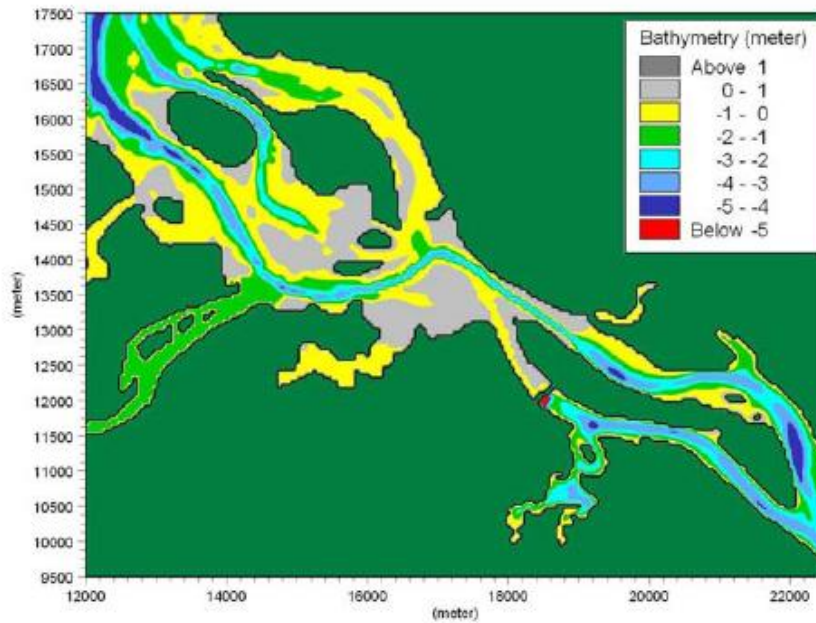


Figura 8.4–Batimetria do Cenário “B” e “C” da Baía de Babitonga. Fonte: IME, 2003.

8.11. Resultados da batimetria do modelo de escala local para análise de estabilidade do canal, fig.50, IME 2003.

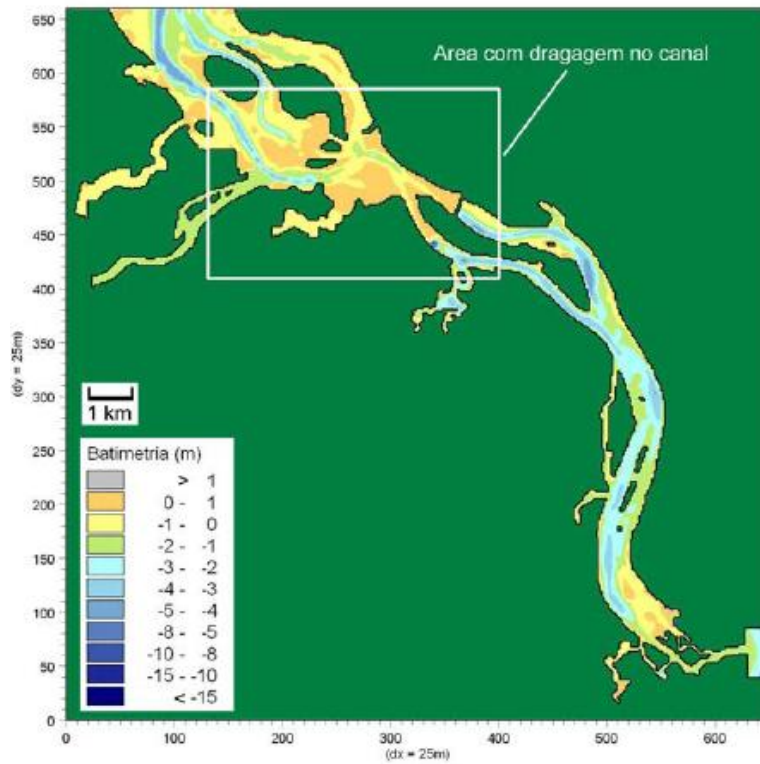


Figura 8.5–Estabilidade do Canal do Linguado. Fonte: IME, 2003.

8.12. Variação temporal dos níveis d'água ao longo dos contornos norte e sul do modelo hidrodinâmico, na escala local, no dia 18 de maio de 2004.

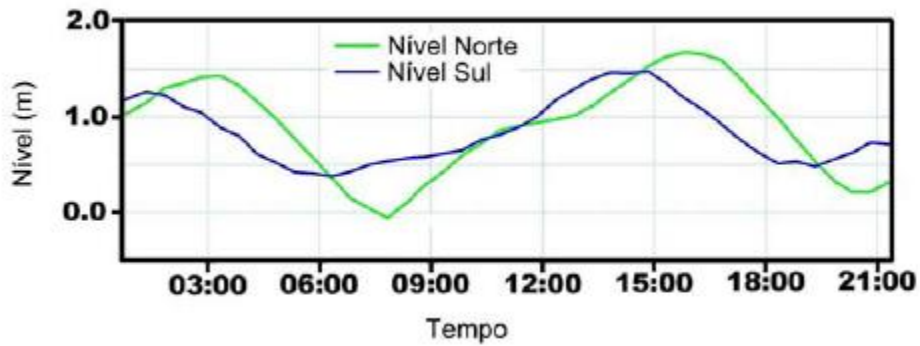


Figura 8.6–Evolução dos níveis d'água em Mai 2004.Fonte: IME, 2003.

8.13. Evolução das velocidades máximas do escoamento em função da seção transversal no Canal Sul, fig.52, IME 2003.

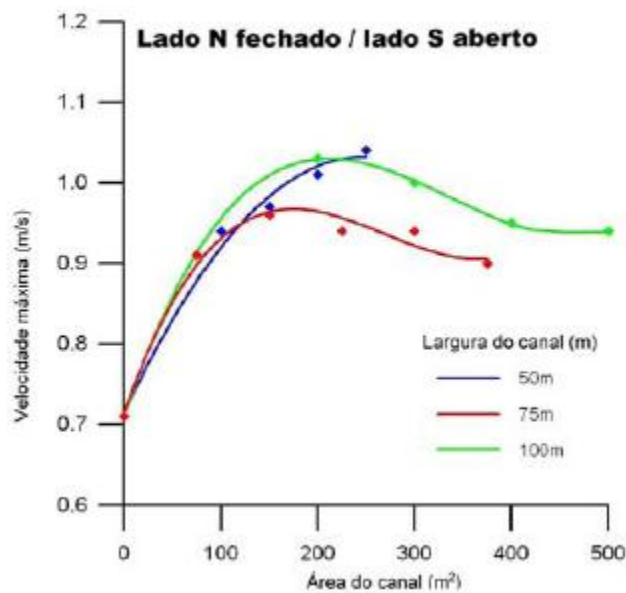


Figura 8.7–Velocidades máximas contra Área do Cenário “A” do Canal do Linguado.Fonte: IME, 2003.

8.14. Evolução das velocidades máximas do escoamento em função da seção transversal no Canal Norte, fig.53, IME 2003.

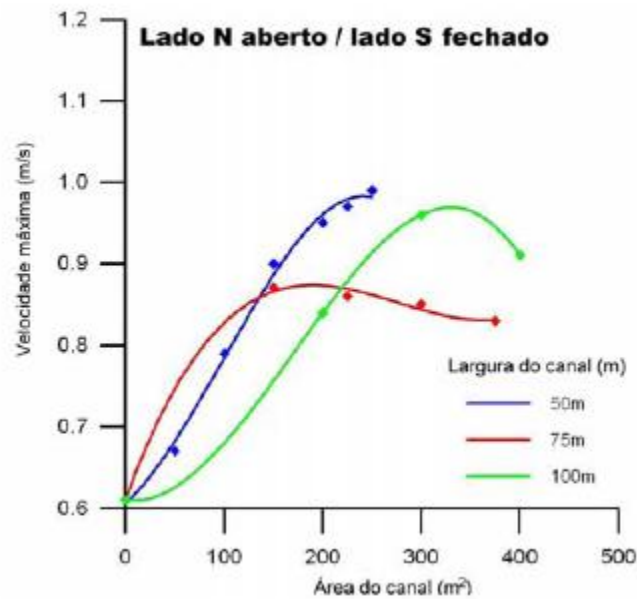


Figura 8.8–Velocidades máximas contra Área do Cenário “B” do Canal do Linguado.Fonte: IME, 2003.

8.15. Velocidades máximas do escoamento em função da seção transversal nos Canais Norte e Sul, fig.54, IME 2003.

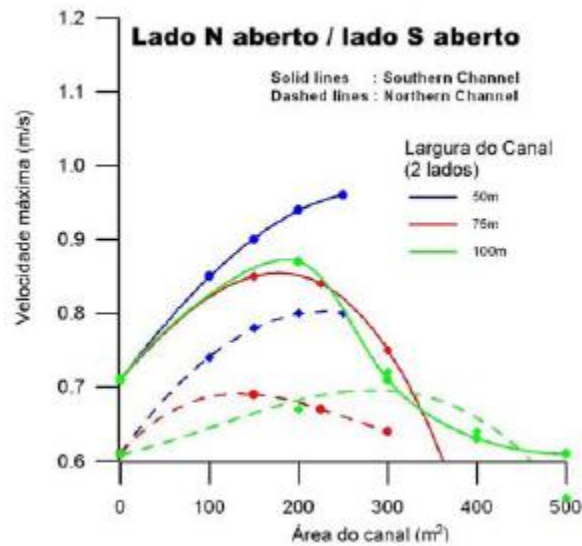


Figura 8.9–Velocidades máximas contra Área do Cenário “C” do Canal do Linguado.Fonte: IME, 2003.



8.16. Resultados do escoamento durante uma maré enchente na área do aterro (Canal Sul aberto e Canal Norte fechado) para quatro profundidades do canal fig.60, IME 2003.

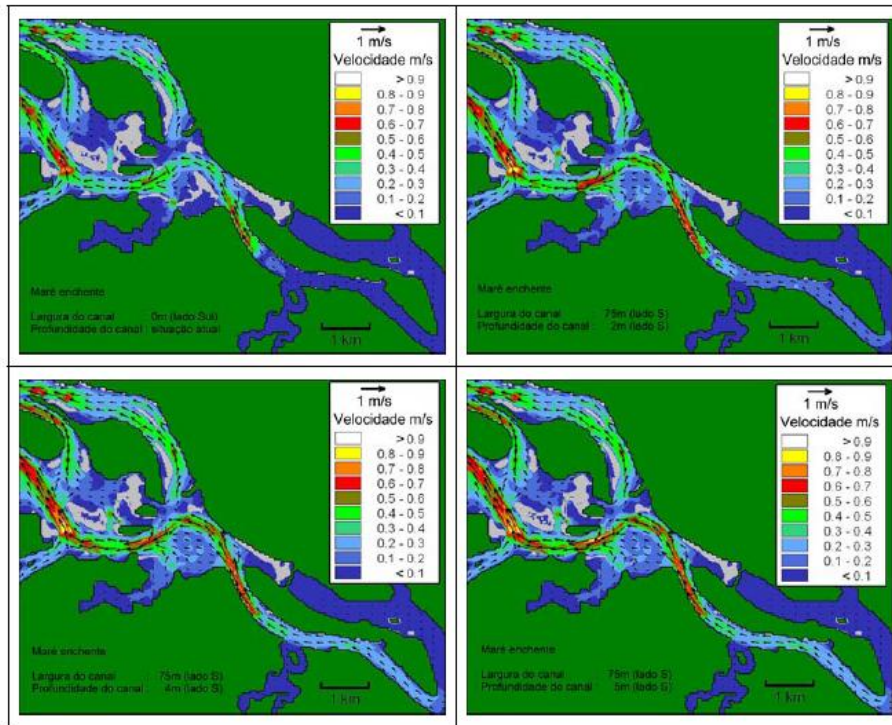


Figura 8.7–Velocidades máximas contra Área do Cenário “A” do Canal do Linguado.Fonte: IME, 2003.

8.17. Resultados do escoamento durante uma maré vazante na área do aterro (Canal Sul aberto e Canal Norte fechado) para quatro profundidades do canal, fig.61, IME 2003.

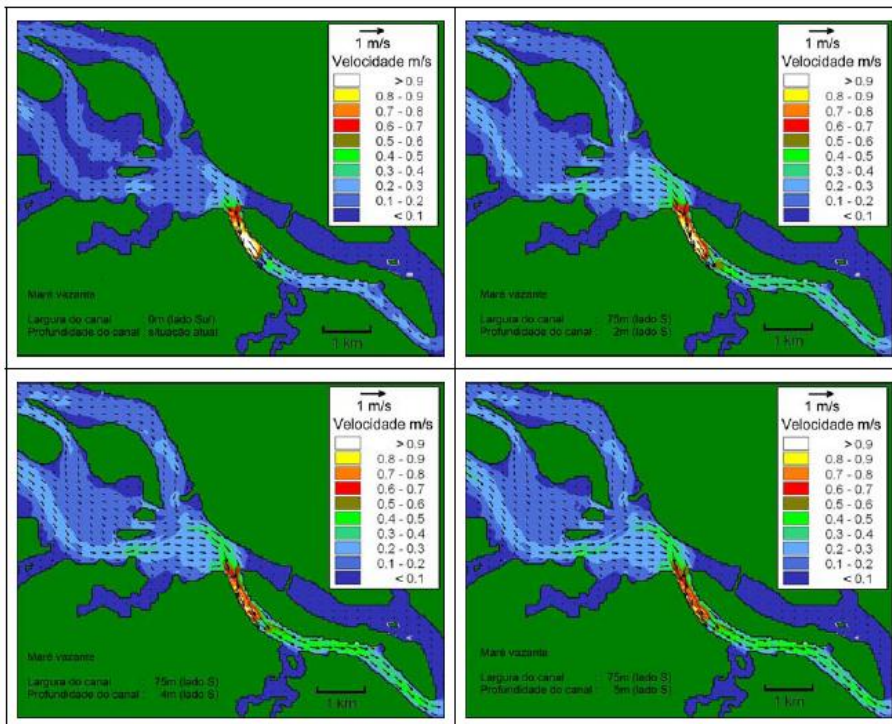


Figura 8.8–Marés vazantes na Área do aterro do Canal do Linguado em “A”.Fonte: IME, 2003.

8.18. Campos instantâneos de transporte de sedimentos durante uma maré enchente na área do aterro (Canal Sul aberto e Canal Norte fechado) para quatro profundidades de canal, fig.62, IME 2003.

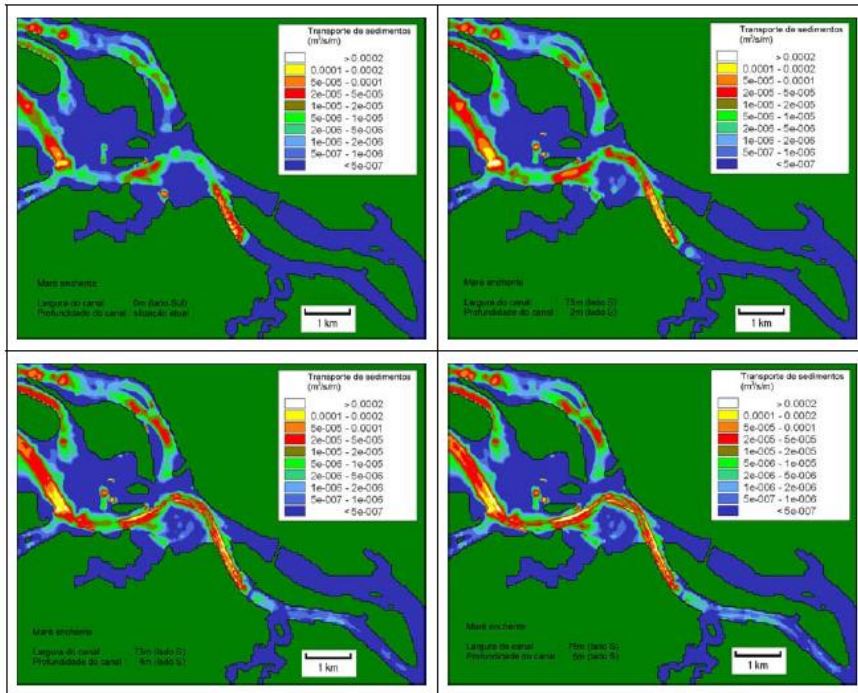


Figura 8.9—Marés vazantes na Área do aterro do Canal do Linguado em “B”. Fonte: IME, 2003.

8.19. Campos instantâneos de transporte de sedimentos durante uma maré vazante na área do aterro (Canal Sul aberto e Canal Norte fechado) para quatro profundidades de canal, fig.63, IME 2003.

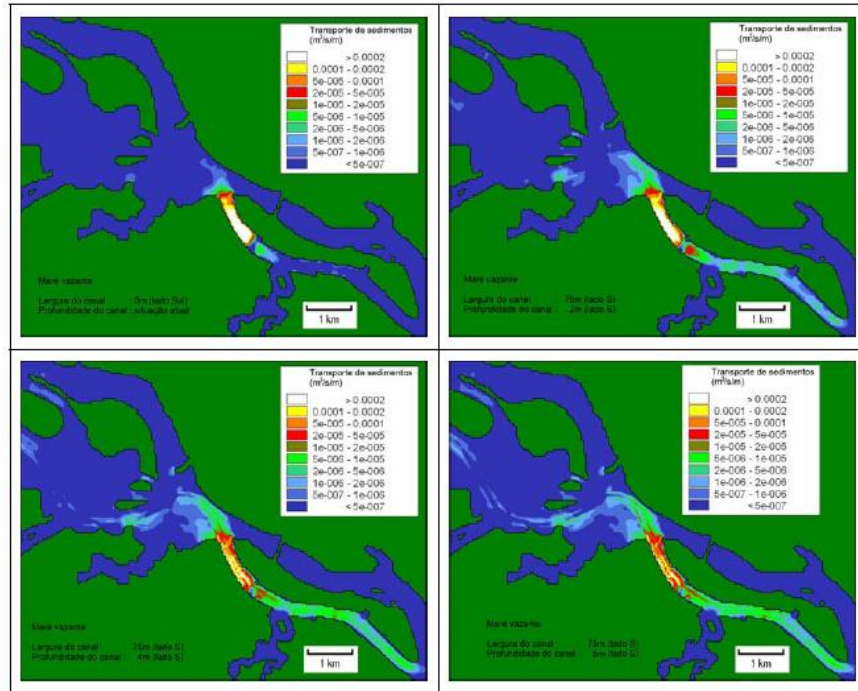


Figura 8.10—Marés vazantes na Área do aterro do Canal do Linguado em “C”. Fonte: IME, 2003.