

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CURSOS NATURAIS**

DINÂMICA BIOGEOQUÍMICA DO ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-AÇU, SC

JURANDIR PEREIRA FILHO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências (Ciências Biológicas), área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais.

São Carlos – SP

2006

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P436db

Pereira Filho, Jurandir.

Dinâmica biogeoquímica do estuário do Rio Itajaí-Açú, SC
/ Jurandir Pereira Filho. -- São Carlos : UFSCar, 2006.
158 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2006.

1. Ecologia aquática. 2. Balanço de massa. 3.
Eutrofização. 4. Nutrientes. 5. Água – qualidade. 6.
Recursos hídricos. I. Título.

CDD: 574.5263 (20^a)

Agradecimentos

À minha esposa Renata pelo seu carinho, amor, apoio, incentivo e compreensão pela falta de tempo durante as fases finais de confecção desta tese, que coincidiram com o final da gestação de nosso filho, Felipe, cujo nascimento foi praticamente simultâneo ao nascimento desta tese.

Ao grande amigo Leonardo Rörig pela valiosíssima ajuda, debates e sugestões ao longo de todas as etapas do trabalho, literalmente desde seu início até sua conclusão.

Ao Guto, pelas sugestões, idéias e críticas efetuadas ao longo destes vários anos de parceria no estudo dos estuários catarinenses, além da ajuda constante na confecção de figuras.

Ao Professor Dr. José Eduardo dos Santos, meu orientador, pela confiança depositada e apoio a distância ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Também pela sua disposição e competência em rapidamente solucionar problemas de ordem burocrática junto ao PPG-ERN, além das sugestões e críticas ao trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Carlos Augusto Schettini, Prof^a. Dra Odete Rocha, Prof. Dr. Irineu Bianchinni Jr. e Prof. Dr. Antonio Camargo pelas críticas construtivas e sugestões apresentadas.

Ao Professor Fernando Diehl, ex-diretor do CTT Mar, pelo apoio à execução deste trabalho, enquanto foi diretor do CTT Mar, sem o qual teria sido inviável a execução deste trabalho.

À Mariana Soppa, Bruno Santana, Sandro Urban, Maycon Furtado pela participação direta no trabalho de amostragem, processamento e análises de laboratório que permitiram a realização deste trabalho.

À Hélia Spinoza pela confecção das primeiras cartas de uso do solo utilizadas neste trabalho.

Ao Marcos Birribilli e Marcus Adonai pelo auxílio nas saídas de campo.

À CIRAM/EPAGRI pelos dados meteorológicas disponibilizados.

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE TABELAS:	vi
LISTA DE FIGURAS:	vii
LISTA DE ANEXOS:	xv
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO:	3
2. OBJETIVOS:	8
2.1. Geral:	8
2.2. Específicos:.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS:	9
3.1 Área de Estudo:	9
3.2 Uso do Solo:	14
3.3. Variação Espaço-Temporal	14
3.3.1 <i>Amostragem e Processamento:</i>	14
3.3.2. <i>Determinações de Laboratório:</i>	18
3.3.2.1. Nutrientes:	18
3.3.2.2. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅):.....	19
3.3.2.3. Fósforo Total e Orgânico:	19
3.3.2.4. Carbono Orgânico Particulado (COP):.....	20
3.3.2.5. Clorofila-a:	20
3.3.2.6. Material Particulado em Suspensão (MPS):.....	20
3.3.3 <i>Tratamento dos Dados:</i>	21
3.3.3.1 Análises Multivariadas:	21
3.4. Balanço de Massa:	23
3.4.1. <i>Balanço de Água:</i>	24
3.4.2. <i>Balanço de Sal:</i>	27
3.4.3. <i>Balanço de Nutrientes:</i>	28
3.4.3.1 Estimativa dos Aportes Originados pelo Esgoto Doméstico:.....	28
3.4.3.2 Estimativa dos Aportes Originados pelo Escoamento Superficial (Runoff):	29
3.4.3.3 Aportes Originados pelas Indústrias de Processamento de Pescado: .	30
3.5. Variabilidade Intramareal:.....	31
3.5.1. <i>Amostragem e Processamento:</i>	31
4. RESULTADOS:	33
4.1. Uso do Solo:	33

4.2. Variação espaço-temporal:	35
4.2.1. Descarga Fluvial:	35
4.2.2. Variáveis Físico-químicas:	36
4.2.3. Nutrientes:	41
4.2.3.1. Nutrientes Nitrogenados (NID):	42
4.2.3.2. Fosfato:	47
4.2.3.3. Silício:	49
4.2.4. Material Particulado em Suspensão (MPS):	51
4.2.5. Material Orgânico:	51
4.2.5.1. Carbono Orgânico Particulado (COP):	51
4.2.5.2. Fósforo:	54
4.2.5.3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO):	54
4.2.5.4. Clorofila-a:	57
4.2.6. Tratamento dos Dados:	60
4.2.6.1. Variação Espacial:	60
4.2.6.1.1. Análise de Agrupamento:	60
4.2.6.1.1.1. Estação #0: Ponto Branco:	61
4.2.6.1.1.2. Grupo 2: Extremidade Fluvial e Alto Estuário:	62
4.2.6.1.1.3. Grupo 3: Médio e Baixo Estuário e Itajaí Mirim:	62
4.2.6.1.2. Análise de Ordenação:	63
4.2.6.2. Variação Temporal:	66
4.2.6.2.1. Análise de Agrupamento:	66
4.2.6.2.2. Análise de Ordenação:	70
4.3. Balanço de Massa:	71
4.3.1. Período 1: O início do ciclo da rizicultura	73
4.3.2. Período 2: Baixa descarga Fluvial	75
4.3.3. Período 4: Descarga elevada	81
4.4. Variação Intra-mareal:	86
4.4.1. Estação AE:	87
4.4.2. Estação ME:	90
4.4.3. Estação BE:	95
5. DISCUSSÃO:	102
5.1. Variação espacial: Tendências Gerais	102
5.2. Variação Temporal:	110
5.2.1. Período 1: Outubro/Novembro de 2003 e Agosto/Setembro de 2004	113
5.2.2. Período 2: Novembro de 2003 a Abril de 2004	117
5.2.3. Período 3: Maio a Agosto 2004	119
5.2.4. Período 4: Setembro a Dezembro de 2004	121
5.3. Balanço de Massa:	122
5.3.1. Período 1: Balanço de Si durante o ciclo da rizicultura	123
5.3.2. Período 2: Baixa Descarga	124
5.3.2.1. Fosfato:	125
5.3.2.2. Nitrogênio Inorgânico Dissolvido:	127
5.3.3. Período de Descarga Elevada:	131
5.3.3.1. Fosfato	131
5.3.3.2. Nitrogênio:	132
5.4. Variação Intra-mareal:	133
6.4.1 Estação AE	133
6.4.2 Estação ME	135
6.4.3 Estação BE	137

6. <i>CONCLUSÕES:</i>	141
7. <i>LITERATURA CITADA:</i>	143
8. <i>ANEXOS:</i>	150

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1: Características gerais das estações de amostragem no estuário do Rio Itajaí-Açú, SC, durante o monitoramento realizado entre outubro de 2003 e dezembro de 2004 .	17
Tabela 2: Abreviações das variáveis usadas nas análises multivariadas. Na análise espacial, foi usada a média geral de cada variável em cada estação. Na análise temporal, foi usada a média geral de cada variável por campanha de amostragem.	22
Tabela 3: Sumário das variáveis envolvidas no cálculo do balanço de água.	27
Tabela 4: Indicadores sócio-econômicos dos municípios da região de entorno do estuário do Itajaí. Fontes: IBGE (2004), ICEPA (2005), PNUD (2003).	33
Tabela 5: Áreas e classes de uso do solo em cada área de contribuição (AC) na região terminal da bacia do rio Itajaí.	34
Tabela 6: Principais características do compartimentos individualizados pela análise de agrupamento e as estações que foram incluídas em cada compartimento.	62
Tabela 7: Períodos com diferentes classes de descarga fluvial, separados pela análise de agrupamento.	68
Tabela 8: Dimensões dos compartimentos do estuário utilizadas para o cálculo do balanço de massa.	72
Tabela 9: Fluxos de água e nutrientes para a porção terminal do estuário do Itajaí (médio e baixo estuário) no período de baixa descarga fluvial (período 2, descarga fluvial = 97 m ³ /s). Valores positivos representam entrada para o estuário e negativos saída. A partir dos fluxos entrada e saída de água e nutrientes, foi determinado o balanço de massa para os nutrientes (Δ), mostrando que o sistema representou uma fonte (Δ positivo) ou sumidouro (Δ negativo)do nutriente.	80
Tabela 10: Fluxos de água e nutrientes para a porção terminal do estuário do Itajaí (médio e baixo estuário) no período de descarga fluvial elevada (período 4, descarga= 228m ³ /s). Valores positivos representam entrada para o estuário e negativos saída. A partir dos fluxos entrada e saída de água e nutrientes, foi determinado o balanço de massa para os nutrientes (Δ), mostrando que o sistema representou uma fonte (Δ positivo) ou sumidouro (Δ negativo)do nutriente.	85
Tabela 11: Sumário dos resultados obtidos em cada estação de amostragem durante a campanha de 25 horas nas estações do alto, médio e baixo estuário (AE, ME e BE), em dezembro de 1999, no estuário do Rio Itajaí-Açú.	86

LISTA DE FIGURAS:

- Figura 1: Bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, SC, mostrando os principais rios e municípios da bacia. 10
- Figura 2: Porção final da bacia hidrográfica do Itajaí (SOPPA, 2004), mostrando as regiões aproximadas do alto, médio e baixo estuário. 13
- Figura 3: Mapa da área de estudo, mostrando as estações de coleta, ao longo do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. A divisão da porção final da bacia representa as áreas de contribuição para cada estação de amostragem usada para delimitação do uso do solo. O plano original de amostragem incluía também uma estação #4, situada em um tributário do Rio Itajaí-Açu, que deixou de ser amostrada ao longo do monitoramento, o que explica a ausência da mesma na seqüência das estações amostrais. 16
- Figura 4: Modelo esquemático de caixas que foi adaptado para o estuário do Rio Itajaí-Açu. O estuário foi dividido em 3 compartimentos (1, 2 e 3) e 2 camadas (superfície e fundo). As setas representam os fluxos entre os compartimentos. S = salinidade, V = fluxo de água (m^3/d), V_S = fluxo de água deixando o sistema pela superfície, V_F = fluxo de água que entra no sistema pelo fundo, a partir do sistema mais externo, trazendo sal do sistema mais externo, V_Z = fluxo de mistura entre superfície e fundo, $V_{F'}$ = fluxo de água do fundo para a superfície, carreando salinidade do fundo para a superfície, V_P = fluxo de água devido à precipitação, V_E = fluxo de água devido à evaporação, V_{AC} = fluxo de água (ou nutrientes) devido ao escoamento superficial da área de contribuição da bacia de drenagem, V_{IM} = fluxo de água devido à entrada do Rio Itajaí-Mirim, principal tributário do sistema (legendas na Tabela 3). 26
- Figura 5: (A) Descarga fluvial diária do Rio Itajaí-Açu medida na estação limnimétrica de Indaial (estação #1, situada a 94 km a montante da desembocadura do estuário) no período compreendido pelo monitoramento do estuário (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (B) Descarga nos dias de amostragem. A linha tracejada representa a média histórica da descarga fluvial ($228 m^3/s$). 36
- Figura 6: Variação da temperatura no sistema fluvial-estuarino do Rio Itajaí-Açu. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 37
- Figura 7: Variação da salinidade no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 39
- Figura 8: Variação do pH no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 40

Figura 9: Variação do oxigênio dissolvido no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	41
Figura 10: Variação do nitrato (NO_3^-) no estuário do Rio Itajaí-Açú: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	44
Figura 11: Variação do nitrito (NO_2^-) no estuário do Rio Itajaí-Açú: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	45
Figura 12: Variação do amônio (NH_4^+) no estuário do Rio Itajaí-Açú: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	46
Figura 13: Distribuição dos percentuais médios de amônio (NH_4), nitrito (NO_2) e nitrato (NO_3) sobre a concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) nas estações de amostragem no estuário do Rio Itajaí-Açú. Período amostrado: outubro de 2003 a dezembro de 2004.	47
Figura 14: Variação do fosfato (PO_4^{3-}) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	48
Figura 15: Variação do Silício (H_4SiO_4) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.	50
Figura 16: Variação do fosfato (PO_4^{3-}) no estuário do Rio Itajaí-Açú (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. No período compreendido entre a 2ª quinzena de novembro até o final de janeiro de 2004, não foi feita a determinação do MPS.	52
Figura 17: Variação do Carbono Orgânico Particulado (COP) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a	

dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 53

Figura 18: Variação do fósforo total (PT) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 55

Figura 19: Variação do fósforo orgânico dissolvido (POD) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 56

Figura 20: Variação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. Dentro do período amostrado, a DBO foi determinada entre abril e dezembro de 2004. 57

Figura 21: Variação da clorofila-a (Cla-a) no estuário do Rio Itajaí-Açú. ((A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. 59

Figura 22: Dendrograma mostrando os agrupamentos formados a partir da análise de agrupamento efetuada sobre as médias das variáveis em cada estação de coleta, no estuário do Rio Itajaí-Açú. As estações agrupadas corresponderam aos compartimentos do estuário, desde sua extremidade fluvial no município de Indaial (estação 1) até a desembocadura (estação 9). 61

Figura 23: Plano formado pelos eixos 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias espaciais, mostrando as variáveis (modo R). 65

Figura 24: Plano formado pelos eixos 1 e 2 do ACP efetuado sobre as médias espaciais, mostrando as estações amostrais (modo Q). As elipses ilustram as associações encontradas na análise de agrupamento. 65

Figura 25: Dendrograma resultado da análise de agrupamento feita sobre as médias temporais, resultando na formação dos 4 agrupamentos que correspondem a 4 períodos. Cada código corresponde a uma campanha de amostragem, as quais foram numeradas em ordem cronológica. A primeira campanha (17/10/03) corresponde ao código 1 e assim sucessivamente (anexo 8). 67

Figura 26: Variação da descarga fluvial (m^3/s) mostrando os períodos individualizados pela análise de agrupamento. As elipses mostram as datas previamente excluídas. 69

Figura 27: Plano formado pelos componentes 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias temporais, mostrando a ordenação das variáveis (modo R). 70

Figura 28: Plano formado pelos eixos 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias temporais. As elipses mostram os agrupamentos formados pela análise de agrupamento. Cada código corresponde a uma campanha de amostragem, as quais foram numeradas em ordem cronológica. A primeira campanha (17/10/03) corresponde ao código 1 e assim sucessivamente (anexo 8). 71

Figura 29: Balanço de água e sal no período 1 (setembro de 2003 e outubro de 2004), com descarga fluvial média de $170.4 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V, em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) e sal ($V * S$, em 10^6 kg/d) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{Res.Hidr}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores. 74

Figura 30: Balanço de silício no período 1 (setembro de 2003 e outubro de 2004), período marcado pelo início do ciclo da rizicultura irrigada na região, com descarga fluvial média de $170.4 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As concentrações médias de silício (Si em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de silício a partir da descarga fluvial ($V_Q * Si_Q$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{compartimento} * Si_{compartimento}$, em 10^6 mmol/d) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de silício devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (Si_{entra} - Si_{sai})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de silício (ΔSi). ΔSi positivo significa que houve aumento do Si, devido a processos internos no sistema; já ΔSi negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de silício no sistema. 75

Figura 31: Balanço de água e sal no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004) com descarga fluvial média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo ao período de menor descarga ao longo do período estudado. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V, em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) e sal ($V * S$, em 10^6 kg/d) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{Res.Hidr}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores. 76

Figura 32: Balanço de fosfato (PID) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de fosfato (PID em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de fosfato a partir da descarga fluvial ($V_Q * PID_Q$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{compartimento} * PID_{compartimento}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de fosfato (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana (V_{AC-Urb}) e rural (V_{AC-R}) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de fosfato devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (PID_{entra} - PID_{sai})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de fosfato (ΔPID). ΔPID positivo significa que houve aumento do fosfato, devido a processos internos no sistema; já ΔPID negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de fosfato no sistema. 77

Figura 33: Balanço de amônio (NH₄) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de amônio (NH₄ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de amônio a partir da descarga fluvial ($V_Q * NH_{4Q}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{compartimento} * NH_{4compartimento}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de amônio (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana (V_{AC-Urb}) e rural (V_{AC-R}) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de amônio devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (NH_{4entra} - NH_{4sai})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de amônio (ΔNH_4). ΔNH_4 positivo significa que houve aumento do amônio, devido a processos internos no sistema; já ΔNH_4 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NH₄ no sistema. 78

Figura 34: Balanço de nitrito (NO₂) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrito (NO₂ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial ($V_Q * NO_{2Q}$, em mmol/d), do Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}) e entre os compartimentos ($V_{compartimento} * NO_{2compartimento}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (NO_{2entra} - NO_{2sai})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO_2). ΔNO_2 positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO_2 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₂ no sistema. 79

Figura 35: Balanço de nitrato (NO₃) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrato (NO₃ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrato a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot NO_{3Q}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot NO_{3\text{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de nitrato (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de nitrato devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (NO_{3\text{entra}} - NO_{3\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrato (ΔNO_3). ΔNO_3 positivo significa que houve aumento do nitrato, devido a processos internos no sistema; já ΔNO_3 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₃ no sistema. 80

Figura 36: Balanço de água e sal no período 4 (setembro a dezembro de 2004) com descarga fluvial média de 228 m³/s, correspondendo ao período de alta descarga ao longo do período estudado. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V, em 10⁶m³/d) e sal ($V \cdot S$, em 10⁶ kg/d) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{\text{Res.Hidr}}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores. 81

Figura 37: Balanço de fosfato (PID) no período 4 (setembro a dezembro de novembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de fosfato (PID em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de fosfato a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot PID_Q$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot PID_{\text{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de fosfato (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de fosfato devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (PID_{\text{entra}} - PID_{\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de fosfato (ΔPID). ΔPID positivo significa que houve aumento do fosfato, devido a processos internos no sistema; já ΔPID negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de fosfato no sistema. 82

Figura 38: Balanço de amônio (NH₄) no período 4 (setembro a dezembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de amônio (NH₄ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de amônio a partir da descarga fluvial ($V_Q * NH_{4Q}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} * NH_{4\text{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de amônio (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de amônio devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (NH_{4\text{entra}} - NH_{4\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de amônio (ΔNH_4). ΔNH_4 positivo significa que houve aumento do amônio, devido a processos internos no sistema; já ΔNH_4 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NH₄ no sistema. 83

Figura 39: Balanço de nitrito (NO₂) no período 4 (setembro a dezembro 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrito (NO₂ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial ($V_Q * NO_{2Q}$, em mmol/d), do Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} * NO_{2\text{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (NO_{2\text{entra}} - NO_{2\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO_2). ΔNO_2 positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO_2 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₂ no sistema. 84

Figura 40: Balanço de nitrato (NO₃) no período 4 (setembro a dezembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrato (NO₃ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrato a partir da descarga fluvial ($V_Q * NO_{3Q}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} * NO_{3\text{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de nitrato (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de nitrato devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z * (NO_{3\text{entra}} - NO_{3\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrato (ΔNO_3). ΔNO_3 positivo significa que houve aumento do nitrato, devido a processos internos no sistema; já ΔNO_3 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₃ no sistema. 85

Figura 41: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) nível, (B) descarga, (C) MPS.....	88
Figura 42: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2^-) e (D) Nitrato (NO_3^-).....	89
Figura 43: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) fosfato (PO_4^{3-}), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).....	90
Figura 44: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) nível, (B) descarga, (C) Salinidade e (D) MPS.....	92
Figura 45: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2^-) e (D) Nitrato (NO_3^-).....	93
Figura 46: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) fosfato (PO_4^{3-}), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).....	95
Figura 47: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (BE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) nível, (B) correntes, (C) descarga, (D) salinidade e (E) MPS.....	97
Figura 48: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (BE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2^-) e (D) Nitrato (NO_3^-).....	99
Figura 49: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (B.E.) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) fosfato (PO_4^{3-}), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).....	101
Figura 50: Fluxograma ilustrando ciclo de cultivo do arroz irrigado na região do médio e baixo vale do Itajaí, SC.....	116
Figura 51: Diagrama de dispersão de amônio, incluindo dados de todas as estações da amostradas durante o ciclo de maré.....	139

LISTA DE ANEXOS:

<i>Anexo 1: Área de Contribuição da estação #1.</i>	151
<i>Anexo 2: Área de Contribuição da estação #2.</i>	152
<i>Anexo 3: Área de Contribuição da estação #3.</i>	153
<i>Anexo 4: Área de Contribuição da estação #5.</i>	154
<i>Anexo 5: Área de Contribuição da estação #6.</i>	155
<i>Anexo 6: Área de Contribuição da estação #7.</i>	156
<i>Anexo 7: Área de Contribuição da estações #8 e #9.</i>	157
<i>Anexo 8: Códigos das campanhas de amostragem usados nas análises multivariadas (variação temporal).</i>	158

RESUMO

O estuário do Rio Itajaí-Acú, SC, está localizado na porção final da bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açú, a qual possui uma área total de 15500 km². A porção terminal da bacia é marcada pela presença de importantes cidades e pela agricultura, com destaque para rizicultura irrigada. Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a variabilidade espaço-temporal da qualidade da água e os processos de transporte e transformação de nutrientes no estuário. Foram monitoradas, semanalmente, sete estações ao longo do estuário, uma no Rio Itajaí-Mirim, principal tributário, e uma estação de referência, entre outubro de 2003 e dezembro de 2004. Este monitoramento incluiu medições de salinidade, pH, oxigênio dissolvido, temperatura, nutrientes (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, H₄SiO₄), Demanda bioquímica de Oxigênio (DBO) fósforo total e orgânico dissolvido (PT e POD), carbono orgânico particulado (COP), material particulado em suspensão (MPS) e clorofila-a (Cla). Também foi realizado um experimento para avaliar a variação intramareal de nutrientes na região do médio e baixo estuário. Este experimento, realizado em dezembro de 1999, incluiu medição horária de correntes, nível d'água, MPS e nutrientes em 3 estações fixas, durante 25 horas (2 ciclos de maré). Análises multivariadas mostraram que as principais forçantes responsáveis pela variabilidade do sistema foram a descarga fluvial, a influência marinha e a urbanização e rizicultura. Elas mostraram um divisão do sistema em extremidade fluvial, alto, médio e baixo estuário. A urbanização foi a principal responsável pela variação espacial das variáveis monitoradas, resultando em aumentos nos indicadores de matéria orgânica (DBO, NH₄⁺, COP e POD) e diminuição progressiva do O₂. Na região próxima à desembocadura, apesar do efeito de diluição pela influência marinha, ocorreu aumento de amônio, atribuído à influência dos municípios de Itajaí e Navegantes e das indústrias pesqueiras da região. Períodos prolongados de baixa descarga fluvial resultaram em aumentos de NH₄⁺ e NO₂⁻ e diminuição de oxigênio dissolvido no médio estuário, a níveis preocupantes. Aumentos na descarga geralmente resultaram em aumentos de MPS, PT, NO₃⁻ e Si, mas que foram intensificados em função da exposição do solo devido ao ciclo da rizicultura. Ocorreu diminuição de Si durante o início do ciclo da rizicultura, sugerindo ser influenciada diretamente por esta atividade. O balanço de massa mostrou que a região do médio e baixo estuário foi responsável pela remoção de cerca de 50% de todo o PO₄³⁻ que ela recebe. Em função dos baixos valores de clorofila, o processo responsável por esta remoção é a remoção por adsorção ao MPS e posterior sedimentação. Mostrou também aumento não conservativo de amônio, o que sugere que o sistema apresentou metabolismo heterotrófico, em função da carga orgânica aportada e à alta turbidez. A variação intramareal de nutrientes mostrou ser menor que em outros estuários da região e também evidenciou a influência da região de entorno sobre a variabilidade dos dados. A tendência de aumento não conservativo para o amônio também ficou evidente e ocorreu entre salinidades de 5 e 15 durante a mistura dentro do estuário.

ABSTRACT

The Itajaí river estuary, SC, is located in the final portion of Itajaí river watershed, which has a total area of about 15,500 km². The terminal region of this watershed is characterized by the presence of important cities such as Blumenau and Itajaí. Agriculture is also important, specially irrigated rice culture. The aim of this study was to evaluate the spatial-temporal variability of water quality and the nutrient transport and transformation processes in the estuary. A weekly monitoring was carried out from october/2003 to december/2004, along seven estuarine sampling stations, one station in the Itajaí-Mirim river (the main tributary) and one reference station located in a undisturbed area. Activities included measurements of salinity, pH, dissolved oxygen, temperature and nutrients (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, H₄SiO₄), biochemical oxygen demand (BOD), total and organic phosphorus (TP and DOP), particulate organic carbon (POC), suspended particulate material (SPM) and chlorophyll-a (Cla). The intratidal nutrient variations was also evaluated in the middle and low estuary, in december/1999. This survey included hourly measurements of the stream velocity, water level, SPM and nutrients in three fixed stations, during 25 hours (2 tidal cycles). Multivariate analysis showed that the main forcing factors causing the system variability were the river discharge, the marine influence, the urbanization and the rice culture. It was proposed that the system can be divided in riverine limit, and high, middle and low estuary. The urbanization was responsible by the spatial variation of the water quality, showing increases in the organic matter (BOD, NH₄⁺, POC and DOP) and progressive decrease of dissolved oxygen. Despite the effect of dilution by the marine waters, increasing in NH₄⁺ was detected in the low estuary, which is probably related to the urban organic loads and the fisheries processing plants effluents. When the river discharge was low during a long time, increasing in NH₄⁺ and NO₂⁻ and severe decreasing in dissolved oxygen was observed. This situation could be an early indication of hypoxia in the estuary. River discharge increasing resulted in increased SPM, TP, NO₃⁻ and Si. This trend was intensified by high soil exposition in the beginning of the rice culture cycle. In this period there was a decreasing in Si, suggesting influence of rice culture Si uptake. The nutrient budget showed that 50% of PO₄³⁻ input was shifted in the middle and low estuary. This was probably related to adsorption to SPM, once chlorophyll-a in the estuary was relatively low. The non-conservative increase of NH₄⁺ in the low estuary suggest a heterotrophic behavior, once the organic load and turbidity were generally high. The intratidal variation of nutrients showed to be lower than other regional estuaries and also seemed to be influenced by the surrounding area. The tendency of non-conservative increase of NH₄⁺ was also evident and related to salinity values between 5 and 15, which occurred during the water mixing inside the estuary.

1. INTRODUÇÃO:

Os estuários são classicamente definidos como corpos d'água restritos, onde ocorre a diluição mensurável da água marinha pela água doce (PRITCHARD, 1967). Estes ambientes estão geralmente localizados em locais de elevada densidade populacional, o que faz com que eles venham sendo intensamente explorados e destruídos, embora permaneçam como um dos ambientes mais resilientes da Terra (ELLIOT & MCLUSKY, 2002). Partículas e material dissolvido, além da própria biota, são transportados da água doce para águas salgadas através de distâncias relativamente curtas. Com este acúmulo de substâncias e organismos, as áreas estuarinas e costeiras, embora representem apenas uma pequena fração da biosfera, são responsáveis por uma liberação de CO₂ para a atmosfera equivalente 40% do que é liberado pelo oceano aberto (SMITH & HOLLIBAUGH, 1993). Para avaliar o papel dos estuários e zonas costeiras como fontes ou sumidouros de CO₂ e nutrientes é necessário compreender os processos que determinam o balanço entre matéria orgânica produzida e seu consumo subsequente, principalmente pela respiração.

O metabolismo de um sistema estuarino é grandemente influenciado pelas entradas de nutrientes e matéria orgânica às quais o mesmo está submetido. O suprimento de nutrientes e matéria orgânica para os estuários tem aumentado nas últimas décadas em função de mudanças no uso e ocupação da terra (REVILLA *et al.*, 2002), particularmente por atuarem como receptores de efluentes domésticos e industriais, muitas vezes sem qualquer tipo de tratamento. Além disso, os aportes antropogênicos têm aumentado a ocorrência de casos de hipoxia e anoxia em estuários e ambientes costeiros ao longo do mundo (DIAZ, 2001; ROWE, 2001), como resultado do elevado consumo de O₂.

Os sistemas costeiros geralmente são áreas densamente povoadas e recebem diretamente o aporte das atividades humanas originadas nas bacias de drenagem (RIBEIRO, 1996). O impacto ambiental deste aporte depende do tipo e quantidade das substâncias presentes, as quais estão relacionadas ao tipo de atividade da bacia de drenagem. Regiões com alta densidade populacional estão continuamente lançando matéria orgânica e nutrientes para seus corpos d'água. Regiões industriais lançam metais pesados, hidrocarbonetos e matéria orgânica. A atividade agrícola também contribui com a entrada de diversos compostos para os corpos aquáticos, como fertilizantes (ricos em nutrientes), pesticidas e herbicidas (RIBEIRO, 1996).

O esgoto doméstico é um dos grandes problemas relacionados à presença de centros urbanos nas proximidades de regiões costeiras e estuários. Além de grande quantidade de água, o esgoto doméstico carrega uma série de substâncias poluentes, onde se destacam a matéria orgânica, os nutrientes, organismos patogênicos e material em suspensão (BISHOP, 1983). Os estuários são zonas de transição entre os sistemas continentais e os costeiros, recebendo grande parte do material de origem continental produzido na bacia de drenagem. Parte deste material é transportada para a zona costeira e vai sustentar a produtividade primária desta zona. Isto faz com que as proximidades de grandes estuários frequentemente apresentem elevado rendimento pesqueiro (CEDERWALL & ELMGREN, 1980; NIXON, 1982, 1992; NIXON *et al*, 1986). Entretanto, as entradas de origem antropogênica frequentemente provocam a eutrofização no meio, particularmente em ambientes de circulação restrita como baías, enseadas e lagoas costeiras.

Várias alterações nas características químicas e na qualidade da água dos ambientes aquáticos costeiros têm sido registradas, como resultado da alteração dos fluxos de matéria orgânica e nutrientes em estuários. Algumas conseqüências ecológicas

citadas são a alteração da composição de espécies (BEUKEMA, 1991), o aumento de florações fitoplanctônicas e a diminuição dos níveis de oxigênio (PARKER & O'REILLY, 1991; PENNOCK *et al.*, 1994). Muitos estudos têm relacionado as alterações do meio ao aporte de nutrientes e matéria orgânica (INNAMORATI & GIOVANARDI, 1990; KIMOR, 1990; CARMOUZE & VASCONCELOS, 1992; CARNEIRO *et al.*, 1994).

A dinâmica da matéria orgânica em estuários é complexa, sendo influenciada por vários fatores como descarga fluvial, processos de mistura devido à entrada da maré, uso e ocupação do solo da bacia de drenagem, concentração populacional e industrial, entre outros. De fato, os processos de eutrofização em estuários são controlados por uma complexa interação de fatores biológicos (taxas de crescimento e pastagem de fito e zooplâncton), químicos (concentração de nutrientes) e físicos (mistura e advecção) e as combinações destes fatores são peculiares a cada sistema (O'HIGGINS & WILSON, 2005). Estes fatores podem alterar o balanço entre os processos de produção e mineralização da matéria orgânica, os quais são modificados ao longo do gradiente estuarino, em função da mudança de um ambiente fluvial para um ambiente marinho. Estas variações repercutirão na modificação das quantidades de matéria orgânica particulada e dissolvida nos estuários bem como nas de nutrientes inorgânicos dissolvidos (N, P e Si), e portanto, nos fluxos destes constituintes para a zona costeira.

Vários estudos têm relacionado os fluxos de nutrientes dentro dos estuários e a partir dos continentes para a zona costeira, via estuários, e os efeitos associados a estes fluxos (O'HIGGINS & WILSON, 2005; SANDERS *et al.*, 1997; SIMPSON *et al.*, 1997; STAVER *et al.*, 1996; MEYBECK, 1982). Vários têm sido os métodos utilizados para as determinações dos fluxos, incluindo a análise de curvas de salinidade/nutrientes

(BILLEN *et al.*, 1985), o cálculo de fluxos médios (LEBO & SHARP, 1993; SANDERS *et al.*, 1997) e a elaboração de balanços químicos de massa (LEBO & SHARP, 1993; NIENCHESKI & WINDOM, 1994).

A avaliação dos fluxos de nutrientes em estuários e ambientes costeiros também tem sido utilizada em estudos de balanço de massa, com o intuito de estimar o metabolismo líquido do ambiente, isto é, se o ambiente apresenta um balanço hetero ou autotrófico. Esta estimativa, feita a partir da determinação dos fluxos não conservativos de nutrientes, vem sendo desenvolvida pelo programa LOICZ (*Land Ocean Interactions in the Coastal Zone*) e é descrita em GORDON *et al.* (1996). O LOICZ está inserido em um programa maior, intitulado Programa Internacional da Geosfera-Biosfera: Um Estudo da Mudança Global (IGBP) do Conselho Internacional das Uniões Científicas (ICSU). Dentro dos objetivos do programa LOICZ, está a compreensão do papel da zona costeira nos ciclos do C, N e P. Desta forma, as zonas de transição entre o ambiente continental e o marinho são importantes locais de produção ou consumo de matéria orgânica e portanto de C, N e P. A compreensão destas transformações e fluxos e de como eles são afetados pela atividade antrópica em escala regional e global são alguns dos propósitos do programa LOICZ.

A abordagem do LOICZ está baseada na aplicação de modelos de balanço de massa de C, N e P em ambientes aquáticos costeiros, como estuários e lagoas costeiras. Estes estudos têm o intuito de identificar o papel destes ambientes na transformação da matéria orgânica e quantificar os fluxos de material resultante destas transformações. A partir dos resultados obtidos em ambientes individuais, obtém-se balanços regionais, a partir dos quais serão estimados os fluxos globais. Associando-se estes fluxos com o tipo de ocupação das zonas costeiras, poder-se-á então avaliar como

estes fluxos são influenciados pela atividade antrópica e como isto pode implicar no balanço global de C, N e P no planeta.

Neste contexto, este estudo pretende avaliar a variabilidade espaço-temporal dos nutrientes e da qualidade da água ao longo estuário do rio Itajaí-Açú e determinar os principais fluxos de nutrientes no sistema estuarino. A partir da determinação dos fluxos, pretende-se avaliar a importância das principais fontes de nutrientes no estuário. A partir dos fluxos pretende-se estabelecer um balanço de massa para estas substâncias relacionando-os aos processos de transformação da matéria orgânica no estuário.

2. OBJETIVOS:

2.1. Geral:

- Avaliar os processos de transformação e transporte de nutrientes ao longo do estuário do Rio Itajaí-Açú e como eles são influenciados pela descarga fluvial e atividades antropogênicas.

2.2. Específicos:

- Determinar como ocorre a variação espacial e temporal das variáveis indicadoras de qualidade de água ao longo do gradiente estuarino e os principais processos determinantes desta variação.
- Avaliar a importância dos fluxos de nutrientes ao longo do estuário e sua relação com as atividades desenvolvidas no seu entorno.
- Estimar as quantidades de nutrientes exportadas para a região costeira.
- Determinar um balanço de massa para os nutrientes durante o período amostrado.
- Determinar o papel do estuário como fonte ou sumidouro de nutrientes durante o período estudado

3. MATERIAL E MÉTODOS:

Este trabalho é resultado de um programa de amostragem multidisciplinar que vem sendo desenvolvido desde 1999 no estuário do Rio Itajaí e que envolveu, além do laboratório de Oceanografia Química da UNIVALI, também os Laboratórios de Microbiologia Aplicada (LAMA) e o Laboratório de Oceanografia Física (LOF). A partir dos dados gerados através de diferentes estratégias de amostragem, foi feita a caracterização espaço-temporal do estuário, bem como calculados os fluxos de nutrientes ao longo do sistema.

3.1 Área de Estudo:

O estuário do Rio Itajaí-Açú está localizado no sul do Brasil, a 26,9°S e 48,66° W (IBGE, 2001) a 70 km ao norte da capital, Florianópolis, no estado de Santa Catarina. Sua bacia hidrográfica compreende uma área de aproximadamente 15.500 km², que equivale a aproximadamente 16% da área do estado. A área da bacia abrange 47 municípios, possuindo uma população superior a um milhão de habitantes, localizados principalmente nos centros urbanos. O principal rio da bacia é o rio Itajaí-Açú, que é formado pelos rios Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste, os quais se juntam na cidade de Rio do Sul (Figura 1). Em seguida, na cidade de Ibirama, ele recebe o aporte do rio Hercílio ou Itajaí do Norte e vários outros rios menores, com destaque para o rio Itajaí Mirim, já próximo à foz (FRANCO, 2001).

O clima da região, segundo o sistema de classificação de Köpen, é subtropical úmido sem déficit hídrico, com chuvas bem distribuídas o ano todo (Cfa). A temperatura média na região é superior a 18°C, com médias anuais de precipitação e

evapo-transpiração de aproximadamente 1400 mm e 1080 mm, respectivamente (GAPLAN, 1986 *apud* SCHETTINI, 2002).

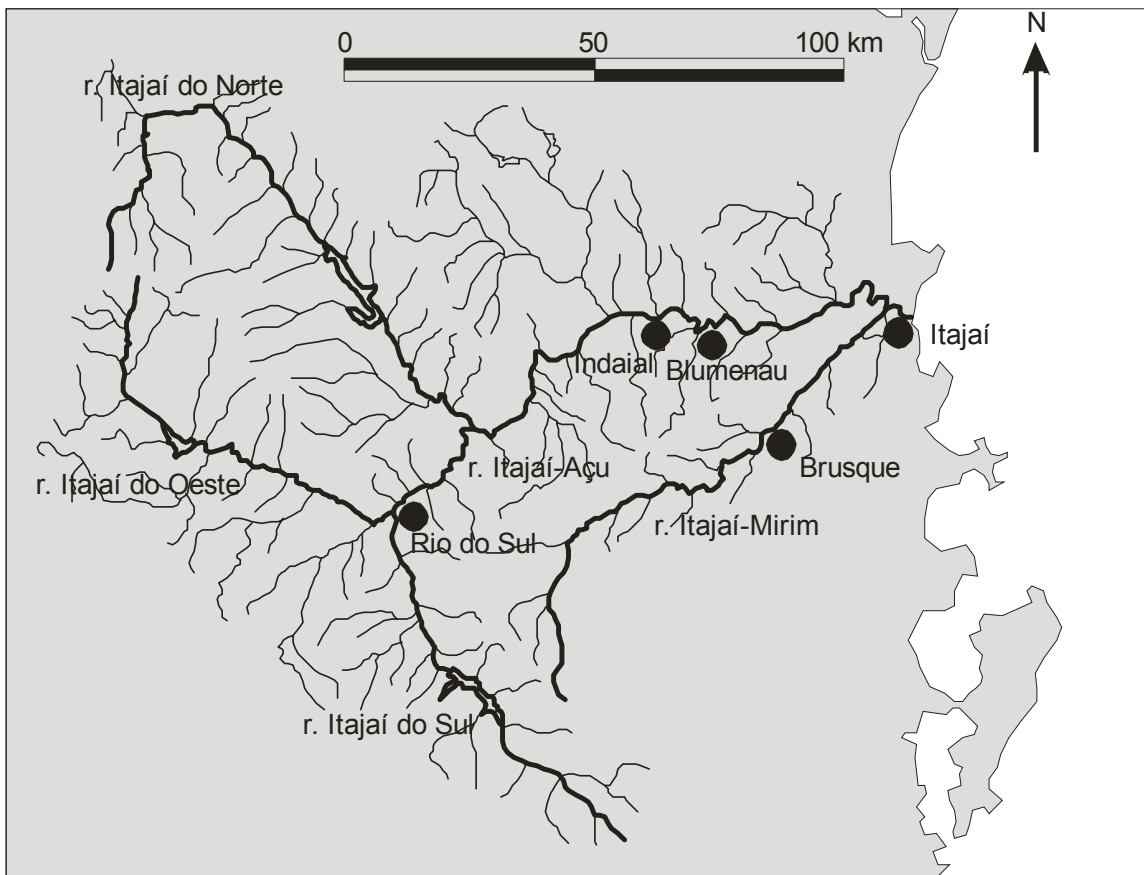


Figura 1: Bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, SC, mostrando os principais rios e municípios da bacia.

A bacia hidrográfica é dividida em 3 regiões correspondentes ao alto vale, médio vale e baixo vale do rio Itajaí. A região do alto vale do Itajaí é caracterizada por ser uma região agrícola. O médio e baixo vale são caracterizados por possuírem uma atividade industrial mais marcante, além da agricultura. Dentre os principais centros urbanos situados no médio e baixo vale, destacam-se Blumenau, Brusque e Itajaí (SANTA CATARINA, 1997). A maior parte da população da bacia se encontra no médio e baixo vale onde também merece destaque a atividade agrícola, principalmente a rizicultura. No baixo vale está localizado o estuário, correspondendo à porção final do Rio Itajaí-Açu. Ele está localizado em uma planície costeira, já na região centro-norte do litoral de Santa Catarina. O limite superior do estuário, marcado pela máxima altura

de alcance da maré, sem, no entanto haver influência da salinidade, corresponde ao município de Blumenau.

O estuário corresponde ao final do curso principal do Rio Itajaí-Açu. Ele apresenta uma extensão total de aproximadamente 70 km com área de espelho d'água de aproximadamente 14 km² (SCHETTINI, 2002). Segundo a definição de Fairbridge (1980), o limite superior de um estuário é delimitado pela influência da maré. Dione (1963) *apud* Fairbridge (1980) sugeriu que os estuários geralmente podem ser subdivididos em alto estuário (região onde pode ser observado o efeito da maré, mas não há influência da salinidade), médio estuário (região que onde há presença de águas continental e marinha) e baixo estuário, porção final do sistema, próximo a sua desembocadura, com grande influência da água salgada. No caso do estuário do Rio Itajaí, Schettini (2002) propôs como limites do alto estuário a região compreendida entre os municípios de Blumenau e Ilhota; o médio entre Ilhota e o município de Itajaí, próximo a confluência com o Rio Itajaí-Mirim; e o baixo estuário a partir deste ponto até a foz (Figura 2).

O Rio Itajaí-Açú representa em torno de 70% do aporte fluvial para o estuário, de modo que o restante é atribuído a afluentes menores, como os rios Luiz Alves e Itajaí Mirim. A descarga média de longo período do Rio Itajaí-Açú, medida a cerca de 90km a montante da desembocadura, é de aproximadamente 228 m³.s⁻¹, com valores mínimos de 17 m³.s⁻¹ e valores máximos de 5390 m³.s⁻¹ (SCHETTINI, 2002).

Com relação à hidrodinâmica, o estuário do Rio Itajaí-Açú é um sistema estratificado, classificado como do tipo cunha salina (SCHETTINI *et al.*, 1996). A entrada de água do mar ocorre pelo fundo, em função de sua maior densidade. Sobre ela flui a água estuarina, de menor densidade, resultando na formação da cunha salina. O principal agente determinante dos processos estuarinos é a descarga fluvial; as

variações de nível devido às marés têm um papel secundário. Em condições de descarga menor do que $300 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ a penetração da água marinha pode atingir até 25 km a montante da desembocadura. Em condições de descarga maior do que $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a água salgada é expulsa do estuário.

Nas proximidades da desembocadura do estuário estão localizados o Porto de Itajaí e várias indústrias de processamento de pescado. A porção final do baixo estuário é constantemente dragada, para a manutenção do canal de navegação que dá acesso ao porto. A região portuária possui grande importância econômica, representando a principal via de comércio marítimo do estado, sendo também o maior porto de desembarque pesqueiro do país (SCHETTINI, 2002). Em função da ocupação de sua bacia de drenagem, os principais agentes poluidores do rio são o esgoto sanitário, o lixo sólido e o lançamento de efluentes industriais, principalmente de indústrias têxteis, metalúrgicas e de galvanoplastia.

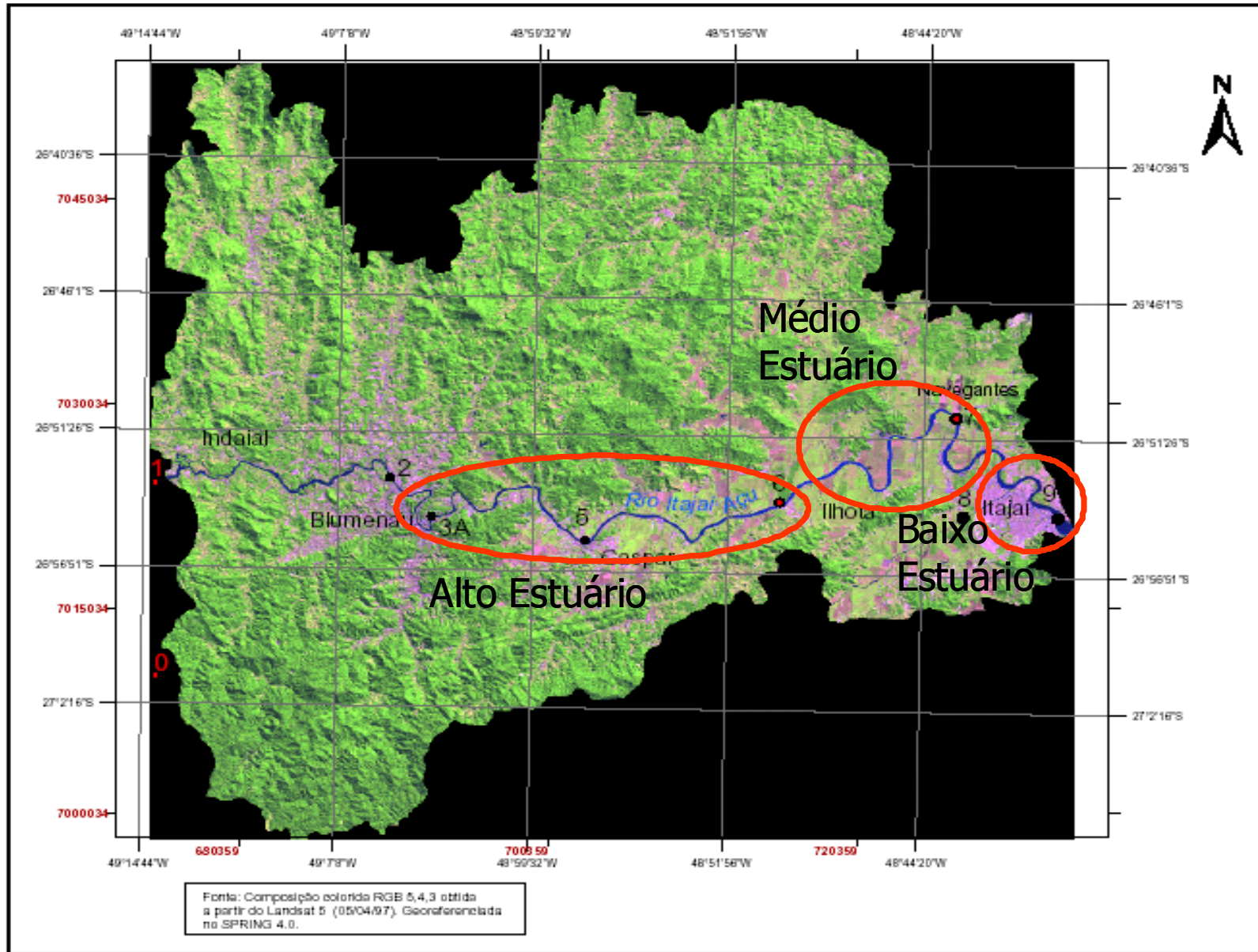


Figura 2: Porção final da bacia hidrográfica do Itajaí (SOPPA, 2004), mostrando as regiões aproximadas do alto, médio e baixo estuário.

3.2 Uso do Solo:

Para auxiliar a caracterização e interpretação dos resultados, foram utilizados mapas de uso do solo da porção final da bacia, a partir do município de Indaial, considerado neste estudo a entrada do sistema. A caracterização do uso do solo utilizada foi feita a partir de cartas topográficas do IBGE de 2001 (escala 1:50.000). A área de estudo foi dividida em sub-unidades (Figura 3), as quais representam áreas de contribuição ou de influência direta sobre as diferentes estações de coleta (#1, #2, #3, #5, #6, #7, #8 e #9), sendo denominadas de área de contribuição (AC) (RÖRIG, 2005). As cartas utilizadas para a caracterização do uso do solo em cada área de contribuição estão incluídas nos anexos 1 a 7.

3.3. Variação Espaço-Temporal

3.3.1 Amostragem e Processamento:

Para a avaliação da variação espaço-temporal da qualidade da água ao longo do estuário, foi realizado um monitoramento das variáveis físicas e químicas da água no período compreendido entre outubro de 2003 e dezembro de 2004. As campanhas de amostragem foram realizadas semanalmente no período. Foram monitoradas 9 estações de coleta desde o município de Indaial até a desembocadura em Itajaí, distantes cerca de 90 km uma da outra (Tabela 1). O município de Indaial corresponde à estação mais próxima da desembocadura que não sofre influência da maré e onde é feita a medição diária da descarga fluvial do Rio Itajaí-Açú. Das 9 estações, 7 estão situadas no curso principal do estuário do rio Itajaí (#1, #2, #3, #5, #6, #7, #9). Além destas, mais duas estações foram monitoradas, uma situada em um local pouco impactado da bacia de drenagem (#0) e outra situada no rio Itajaí-Mirim, principal tributário do estuário do Rio Itajaí, próximo à confluência com o estuário do

rio Itajaí (#8) (Figura 3). As estações na região do baixo estuário foram amostradas em superfície e fundo (#7 e #9). O plano original de amostragem incluía também uma estação 4, situada em um tributário do Rio Itajaí-Açu, que deixou de ser amostrada ao longo do monitoramento, o que explica a ausência da mesma na seqüência das estações amostrais.

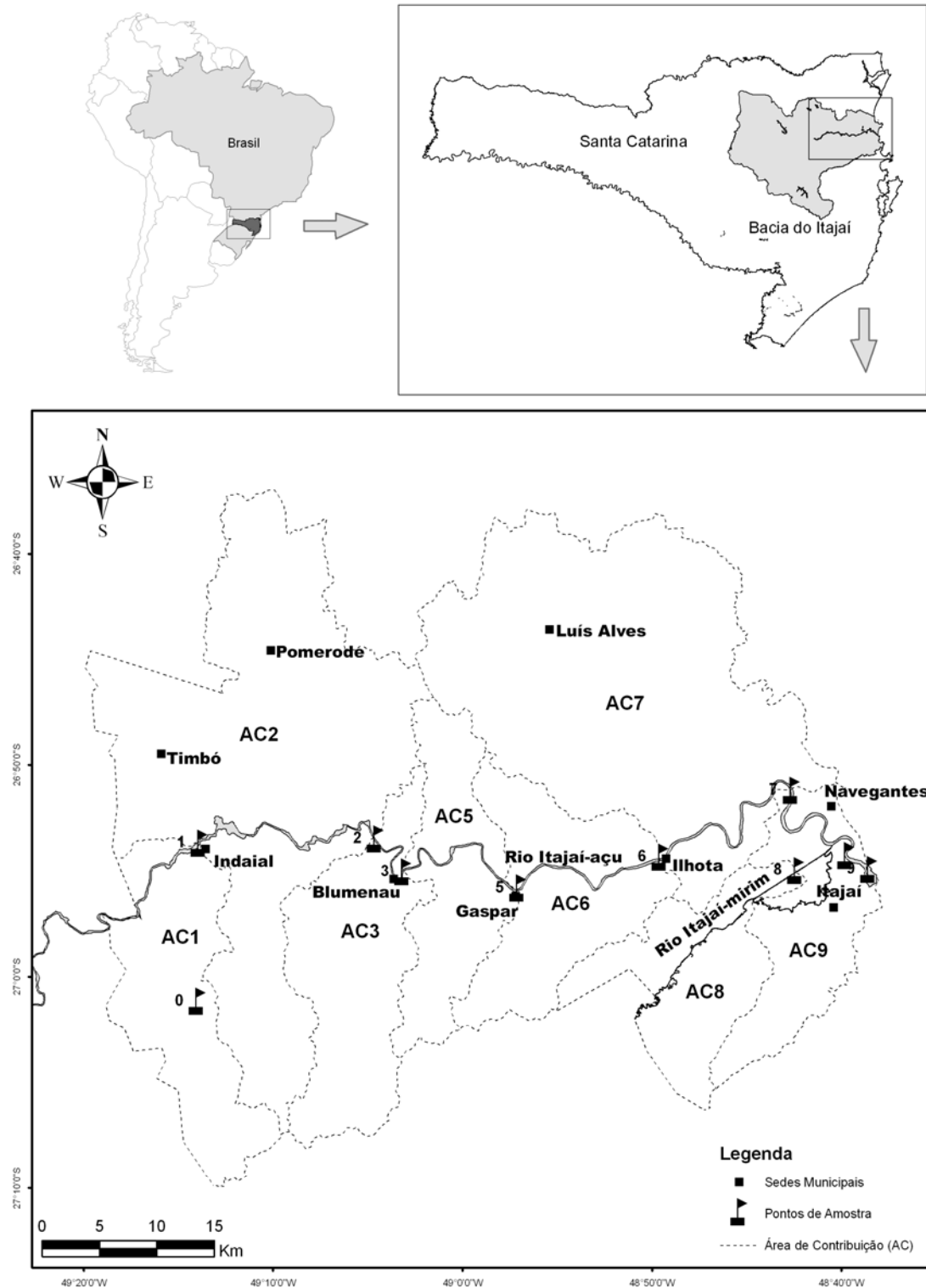


Figura 3: Mapa da área de estudo, mostrando as estações de coleta, ao longo do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. A divisão da porção final da bacia representa as áreas de contribuição para cada estação de amostragem usada para delimitação do uso do solo. O plano original de amostragem incluía também uma estação #4, situada em um tributário do Rio Itajaí-Açu, que deixou de ser amostrada ao longo do monitoramento, o que explica a ausência da mesma na sequência das estações amostrais.

Tabela 1: Características gerais das estações de amostragem no estuário do Rio Itajaí-Açú, SC, durante o monitoramento realizado entre outubro de 2003 e dezembro de 2004.

Estação	Latitude/Longitude	Localização	Características
# 0	27°01'10,52"S/ 49°14'06,5"W	Rio Warnow (Indaial): estação de referência	Rio de corredeira de pequeno porte, com águas claras e bem oxigenadas.
# 1	26°53'32,6"S/ 49°14'14,2"W	Ponte dos Arcos: centro do município de Indaial	Estação sem influência da maré. Recebe o aporte do alto Vale do Itajaí e de Indaial.
# 2	26°53'15,3"S/ 49°05'05,4"W	Ponte Itoupava Norte (município de Blumenau)	Situado antes das principais descargas industriais e domésticas de Blumenau.
# 3	26°54'45,3"S/ 49°03'27,7"W	Ponte dos Arcos (município de Blumenau)	Sofre influência da maior parte dos dejetos urbanos de Blumenau. Limite fluvial do estuário.
# 5	26°55'37,5"S/ 48°57'28"W	Ponte (Centro do município de Gaspar)	Parte da poluição gerada em Blumenau já foi diluída e depurada.
# 6	26°54'01,1"S/ 48°49'55"W	Centro do município de Ilhota.	Situado após as principais contribuições de Ilhota. Região com cultivo de arroz irrigado e dragagem de areia. Corresponde ao início do médio estuário.
# 7	26°54'31,1"S/ 48°39'04,7"W	Ponte BR 101: município de Itajaí. Amostragem em superfície e fundo.	Situado antes da zona urbana de Itajaí e Navegantes. Corresponde ao início do baixo estuário, com grande influência da salinidade.
# 8	26°54'30,2"S/ 48°42'46,3"W	Canal do Rio Itajaí-Mirim (Itajaí), próximo à confluência com o estuário.	Local comprometido com a poluição de Brusque e de toda a bacia do Mirim. Localiza-se a cerca de 300m à jusante do ponto de captação de água da SEMASA.
# 9	26°54'31,1"S/ 48°39'04,7"W	Centro de Itajaí. Amostragem em superfície e fundo.	Sofre influência de descargas das indústrias pesqueiras de Itajaí e Navegantes. Região marcada pela influência marinha que tem ação diluidora e oxigenadora das águas do rio. Atividade constante de dragagem para a manutenção do canal de navegação do Porto de Itajaí.

As amostragens de água foram realizadas com a utilização de uma garrafa de amostragem do tipo *Niskin*. No momento da amostragem, foram determinados a salinidade, temperatura, pH e oxigênio dissolvido, com a utilização de uma sonda mutiparâmetros Horiba U-10. A amostra foi então transferida para frascos de polietileno (20 litros) e mantidas resfriadas em caixas térmicas com gelo até o processamento. No laboratório as amostras foram filtradas em filtros de fibra de vidro Whatmann GF/F (porosidade aproximada de 0,7 µm) pré-calcinados. O material filtrado foi separado em alíquotas e foi congelado para posterior determinação dos nutrientes. Os filtros, após secos em estufa foram congelados para posterior determinação do carbono orgânico

particulado (COP). Frações das amostras brutas e filtradas foram digeridas com persulfato de potássio em autoclave para a determinação do fósforo orgânico total (POT) e dissolvido (POD). Alíquotas das amostras brutas foram incubadas a 20°C para a determinação da DBO₅.

3.3.2. Determinações de Laboratório:

3.3.2.1. Nutrientes:

Os nutrientes dissolvidos (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} e H_4SiO_4) foram determinados através de métodos colorimétricos clássicos, com leitura feita em espectrofotômetro duplo-feixe Shimadzu UV 160 A, conforme metodologia descrita abaixo.

- NH_4^+ : método do azul de indofenol, corrigido pelo efeito da salinidade, adaptado de Strickland & Parsons (1972). O complexo colorido foi lido em espectrofotômetro em cubeta de 1 cm de trajeto óptico.
- NO_2^- : O nitrito foi determinado após reação com sulfanilamida, formando o íon diazótico e posteriormente formando o complexo colorido, com o N-naftil etilenodiamida, conforme metodologia descrita em Strickland & Parsons (1972). O complexo colorido foi lido em cubeta de 5 cm de trajeto óptico.
- NO_3^- : O nitrato foi determinado como nitrito, após passagem da amostra por uma coluna redutora preenchida por grãos de Cd, conforme metodologia descrita em Strickland & Parsons (1972). O complexo colorido foi lido em espectrofotômetro em cubeta de 1 cm de trajeto óptico.

- PO_4^{3-} : Os íons fosfato foram determinados pela formação do complexo colorido após reação com molibdato de amônio segundo método adaptado de Strickland & Parsons (1972). O complexo colorido foi lido em cubeta de 5cm de trajeto óptico.
- Si: O Si foi determinado como ácido ortossilícico (H_4SiO_4) após formação de complexo colorido Sílico-molibdato, adaptado de Strickland & Parsons (1972). O complexo colorido foi lido em cubeta de 1 cm de trajeto óptico.

3.3.2.2. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5):

A DBO_5 foi determinada sobre a água bruta, segundo método adaptado de APHA-AWWA-WPCF (1998). As amostras foram incubadas em laboratório, a 20°C , no escuro, durante 5 dias. A concentração do oxigênio dissolvido foi determinada no início e no final da incubação através de método polarográfico, com utilização de um oxímetro (YSI, modelo 58), com eletrodo adaptado para utilização em frascos de DBO .

3.3.2.3. Fósforo Total e Orgânico:

As determinações de fósforo orgânico foram feitas sobre alíquotas das amostras brutas e das filtradas, para obtenção do fósforo total (PT) e fósforo dissolvido (PD). As amostras foram digeridas com persulfato de potássio em autoclave, a 120°C por 45 minutos. Após a digestão o fósforo foi determinado colorimetricamente como ortofosfato, após reação com molibdato de amônio, conforme Carmouze (1994). O fósforo orgânico dissolvido (POD) foi determinado pela diferença entre o fósforo dissolvido (determinado nas amostras filtradas após digestão) e os íons fosfato.

3.3.2.4. Carbono Orgânico Particulado (COP):

O carbono orgânico particulado foi determinado sobre o material retido nos filtros (Whatman GF/F, porosidade de 0,7 µm). Após a filtração das amostras os filtros foram lavados com Na₂SO₄ para remoção dos cloretos e foram congelados. No momento da determinação os filtros foram digeridos com ácido sulfúrico e dicromato de potássio em excesso, a quente. Após a digestão, o excesso de dicromato foi titulado contra uma solução de sulfato ferroso amoniacal, segundo Carmouze (1994).

3.3.2.5. Clorofila-a:

Para a determinação de clorofila-a, alíquotas de volume conhecido das amostras foram filtradas em filtro de fibra de vidro GF/F com 25 mm de diâmetro, sendo os filtros extraídos com 10 mL de acetona 90% (v/v) por 24 horas no escuro dentro de congelador (-15°C) (PARSONS *et al.*, 1989). As amostras assim extraídas foram lidas em fluorímetro Turner Designs® TD-700. Para a calibração do fluorímetro utilizou-se um cultivo da microalga *Skeletonema costatum* em crescimento exponencial. Um volume conhecido desse cultivo foi filtrado, passando pelo mesmo processo de extração e leitura das amostras, porém também foi realizada a determinação espectrofotométrica de clorofila-a do mesmo para a posterior conversão dos valores de fluorescência (PARSONS *et al.*, 1989). Os resultados foram expressos em µg.l⁻¹.

3.3.2.6. Material Particulado em Suspensão (MPS):

Para a determinação do MPS, alíquotas de volumes conhecidos das amostras de água foram filtradas em filtros pré-pesados (P1, em gramas) de membrana de éster de celulose de porosidade 0.45 µm. Após a filtração, os filtros foram secos em estufa a 60°C por 24 horas, sendo novamente pesados (P2, em gramas). O MPS foi

obtido a partir da diferença de peso antes e após a filtração em relação ao volume filtrado (V, em litros), segundo método descrito por Strickland & Parsons (1972), a partir da expressão: $MPS (mg/l) = (P2 - P1) \times 1000 / V$.

3.3.3 Tratamento dos Dados:

Para avaliar a variação espaço-temporal dos dados, eles foram tratados de forma a facilitar a sua visualização. Com este intuito, os dados de cada variável foram apresentados na forma de gráficos de isolinhas, confeccionadas através de software SurferTM, com o uso do método *Kriging* de interpolação. Para a confecção de cada figura foram incluídas as estações de superfície do curso principal do Rio Itajaí (#1, #2, #3, #5, #6, #7 e #9). Em cada figura o *grid* amostral incluiu 7 estações, distribuídas ao longo de aproximadamente 90 km do Rio Itajaí, as quais foram amostradas entre outubro de 2003 e dezembro de 2004 em intervalos aproximadamente semanais, totalizando 56 campanhas.

3.3.3.1 Análises Multivariadas:

Em função do grande número de dados obtidos e para auxiliar na sua interpretação, eles foram tratados através de 2 técnicas multivariadas: a análise de agrupamento (*cluster*) e a técnica de ordenação, através da análise em componentes principais (ACP). As análises foram feitas sobre a matriz padronizada de dados, pela média e desvio padrão, conforme Clarke & Warwick (2001). As análises foram feitas, inicialmente, considerando todas as estações amostradas durante as 56 campanhas, incluindo todas as variáveis monitoradas (Tabela 2). Posteriormente, em função do

resultado, algumas datas e ou variáveis que mostraram discrepância elevada foram excluídas e a análise refeita.

Tabela 2: Abreviações das variáveis usadas nas análises multivariadas. Na análise espacial, foi usada a média geral de cada variável em cada estação. Na análise temporal, foi usada a média geral de cada variável por campanha de amostragem.

Abreviação	Variável
Cla md	Clorofila-a
COP md	Carbono Orgânico Particulado
DBO md	Demanda Bioquímica de Oxigênio
Desc md	Média da Descarga fluvial, incluindo a data da amostragem e os dois dias anteriores
MPS md	Material Particulado em Suspensão
N:P md	Razão NID:PO4
NH4 md	Amônio (média espacial)
NO2 md	Nitrito
NO3 md	Nitrato
OD md	Oxigênio Dissolvido
pH md	pH
PO4 md	Fosfato
POD md	Fósforo Orgânico Dissolvido
POT md	Fósforo Orgânico Total
PT md	Fósforo Total
Sal md	Salinidade
Sat md	Saturação do Oxigênio (%)
Si md	Silício
Temp md	Temperatura

Na análise de agrupamento, foi utilizada a distância Euclidiana como índice de dissimilaridade. A distância Euclidiana é um índice adequado, quando são incluídas variáveis biológicas e ambientais (KLARKE & WARWICK, 2001) para interpretação de dados ecológicos. O método de agrupamento usado foi o método de *Ward* ou método de agrupamento pela variância mínima. Este método é baseado no princípio de que em cada passo do agrupamento a variância intra-grupo é minimizada em relação à variância entre os grupos (LUDWIG & REYNOLDS, 1988; PIELOU, 1984).

A análise em componentes principais estabelece, a partir da matriz de correlações entre as variáveis, um conjunto de eixos perpendiculares que explicam uma parte da variância total dos dados. O comprimento desses eixos representa sua

contribuição à variância total dos dados. Um plano fatorial é formado pelos eixos, no qual são plotadas as amostras ou variáveis.

3.4. Balanço de Massa:

Para a determinação do balanço de massa, o estuário foi dividido em compartimentos, considerando as análises estatísticas desenvolvidas previamente. O balanço foi calculado para o setor terminal do estuário, correspondendo ao médio e baixo estuário e a região costeira. O balanço foi feito de acordo com a metodologia proposta pelo LOICZ, descrito por Gordon *et al.*(1996) e adaptado por Kalnejais *et al.* (1999).

A metodologia proposta é baseada no princípio da conservação de massa e pode ser aplicada a qualquer sistema:

$dY/dt = \sum \text{entradas} + \sum \text{saída} + \sum(\text{produção} - \text{consumo})$, onde Y é a massa de um material particular. A equação representa as taxas e quantidades do material se movendo no sistema e inclui os efeitos dos processos que representam fontes e consumo do material no sistema. A metodologia aplica esta equação para água, sal e nutrientes para estimar a taxa na qual a água se move através do sistema, a taxa na qual C, N e P se movem junto com a água e a importância dos processos biogeoquímicos dentro do sistema.

O estuário do Itajaí-Açú é um sistema estratificado, do tipo cunha salina. Para modelar o sistema, foi adaptado um modelo de 2 camadas (superfície e fundo), usado para sistemas estratificados. O estuário foi dividido em 3 sub-sistemas e o balanço foi estabelecido para o baixo e médio estuário, que sofrem influência direta da salinidade, parâmetro traçador dos processos de mistura entre o ambiente marinho e o fluvial. Para o cálculo foi definido como baixo estuário o trecho compreendido entre a

desembocadura até 8,5 km a montante, caracterizado pela estação #9. O médio estuário foi definido como a região compreendida entre o baixo estuário até cerca de 27,5 km a montante da desembocadura, já no município de Ilhota, caracterizado pela estação #7, totalizando 19 km. O alto estuário foi delimitado como o trecho compreendido entre os municípios de Ilhota e Blumenau, caracterizado pelas estações #3, #5 e #6.

3.4.1. Balanço de Água:

A descarga fluvial é uma das principais variáveis na determinação do balanço de água do sistema. Os dados de descarga fluvial para o sistema foram obtidos na estação limnimétrica de Indaial, mantida pela Aneel. Ela está situada à cerca de 94 km a montante da desembocadura do estuário e não sofre influência da maré. Como não há dados de descarga fluvial para as estações a jusante de Indaial, elas foram estimadas considerando a área da bacia. A descarga estimada que corresponde à entrada de água para o médio estuário foi calculada como a descarga medida em Indaial mais a descarga referente à área de contribuição da bacia entre a estação de Indaial (#1) e a estação de Ilhota (#6), compreendendo ao Alto Estuário. A área de contribuição do Alto Estuário corresponde, portanto, à soma das AC2, AC3, AC5 e AC6, totalizando 1368 km², ou o equivalente a 9% da Bacia do Itajaí. Sendo assim, a descarga fluvial foi corrigida por um fator de 1,13 considerando uma aproximação linear. Para o médio e baixo estuário, o mesmo princípio foi aplicado, e a entrada de água foi estimada a partir da área de contribuição do médio estuário, que corresponde a 4,5% da bacia, e baixo estuário, que corresponde a 1,2% da bacia.

Inicialmente foi estabelecido um balanço de água para o sistema, considerando que, em média, o volume do sistema (V) permanece constante para cada classe de descarga fluvial (*Steady State*): $dV/dt = 0$ ou $\sum \text{entradas} - \sum \text{saídas} = 0$.

Para cada compartimento do estuário foram determinadas as principais entradas e saídas de água. A água doce originada da descarga fluvial (V_Q) entra a partir da bacia de drenagem pela camada superficial do sistema. Somadas a esta entrada, normalmente a principal para a maior parte dos sistemas estuarinos, também ocorrem entradas através de chuva (V_P), através de água subterrânea (V_G), outras entradas (V_O) e saída por evaporação (V_E). Assumindo que a entrada por água subterrânea seja desprezível e que o volume de água no sistema é constante, o fluxo residual (V_R) é dado por $V_R = -(V_Q + V_P + V_O - V_E)$ e corresponde ao fluxo de água que flui para sistema mais externo.

Em um sistema estratificado, o fluxo de saída de água doce (ou salobra) ocorre através da camada superficial (V_S), conduzindo água de salinidade da porção superficial do sistema para o sistema seguinte (o oceano, por exemplo). A água do mar, mais densa, entra pela camada de fundo (V_F), trazendo sal para o estuário. O balanço de sal é mantido pelo fluxo de mistura vertical entre superfície e fundo (V_Z). Este padrão de circulação cria uma circulação vertical de retorno. A água que entra pelo fundo, a partir do meio externo (V_F), traz água com salinidade do sistema externo e flui para a camada superior (V'_F) dentro do sistema, carregando água com salinidade da camada de fundo do sistema para a superfície. Então, na camada superior, esta água flui de volta para o sistema externo (Figura 4).

O fluxo total de água para o sistema externo pela superfície (V_S) inclui os fluxos devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), água subterrânea (V_G), outras entradas (V_O), saída por evaporação (V_E) e o fluxo de entrada de água a partir do fundo (V'_F). Assim, o balanço de água na camada superior do sistema fica: $V_S = V_Q + V_P + V'_F + V_O - V_E$. Para efeito do balanço de água o fluxo de água subterrânea foi considerado como desprezível em relação aos demais. Na camada inferior, o fluxo de

água salgada (V_F) que entra a partir do oceano é balanceado pelo fluxo que flui para a camada superior (V'_F). No caso de um sistema dividido em sub-sistemas, parte desta água fluirá em direção ao sistema mais interno (V_{F1}), retornando pela superfície, da mesma forma que no sistema externo, e o balanço de água fica: $V_F - V_{F1} = V'_F$. A Tabela 3 mostra um sumário das abreviações utilizadas no cálculo do balanço de massa.

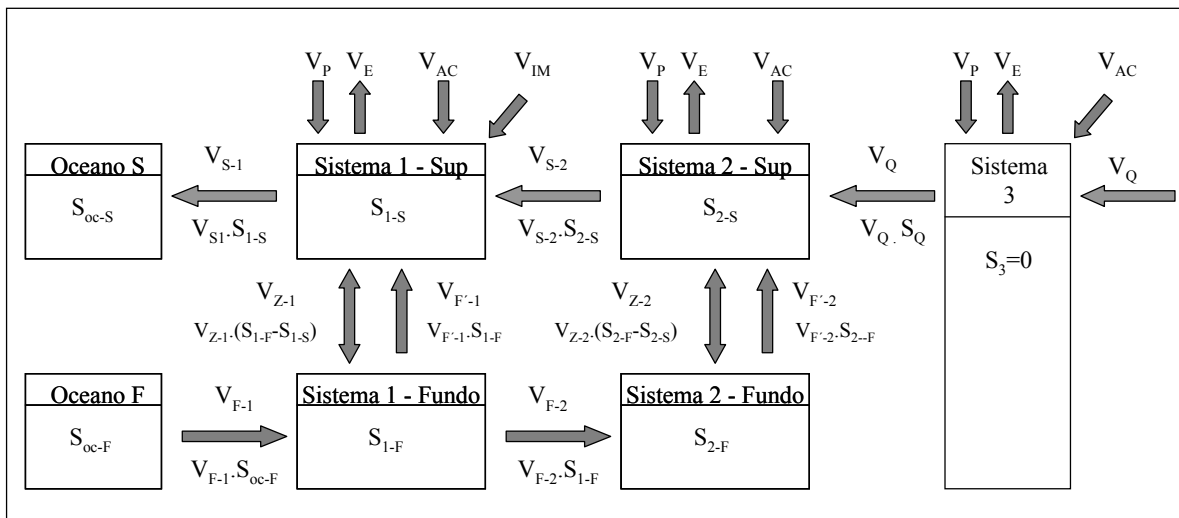


Figura 4: Modelo esquemático de caixas que foi adaptado para o estuário do Rio Itajaí-Açú. O estuário foi dividido em 3 compartimentos (1, 2 e 3) e 2 camadas (superfície e fundo). As setas representam os fluxos entre os compartimentos. S= salinidade, V= fluxo de água (m^3/d), V_S = fluxo de água deixando o sistema pela superfície, V_F = fluxo de água que entra no sistema pelo fundo, a partir do sistema mais externo, trazendo sal do sistema mais externo, V_Z = fluxo de mistura entre superfície e fundo, $V_{F'}$ = fluxo de água do fundo para a superfície, carregando salinidade do fundo para a superfície, V_P = fluxo de água devido à precipitação, V_E = fluxo de água devido à evaporação, V_{AC} = fluxo de água (ou nutrientes) devido ao escoamento superficial da área de contribuição da bacia de drenagem, V_{IM} = fluxo de água devido à entrada do Rio Itajaí-Mirim, principal tributário do sistema (legendas na Tabela 3).

Tabela 3: Sumário das variáveis envolvidas no cálculo do balanço de água.

Simbologia	Variáveis	Descrição
V_Q (m ³ /d)	Descarga Fluvial em Indaial: Entrada do Sistema	Dados diários obtidos na estação limnimétrica de Indaial, mantida pela Aneel. Os dados foram convertidos para m ³ /d
V_P (m ³ /d)	Entrada direta no sistema por Precipitação.	Estimado pela precipitação em cada período e área de lâmina d'água do sistema Não foi incluída nos balanços por ser pouco significativa.
V_E (m ³ /d)	Saída de água direta do sistema por Evaporação	Estimado pela precipitação média anual (1400mm/ano) e área de lâmina d'água do sistema Foi calculada mas não foi incluída nos balanços por ser pouco significativa
V_{AC} (m ³ /d)	Fluxo de água em cada área de contribuição a jusante de Indaial	Fluxo estimado para a área de contribuição (AC) da bacia, considerando uma aproximação linear entre as proporções de cada área da bacia
V_S (m ³ /d)	Fluxo de saída de água pela superfície do sistema	Calculado usando metodologia <i>LOICZ</i> , a partir dos fluxos de água doce no sistema e do princípio de conservação de massa.
V_F (m ³ /d)	Fluxo de entrada de água pelo fundo a partir do oceano ou do sistema mais externo.	Calculado usando metodologia <i>LOICZ</i> , a partir dos fluxos de água doce no sistema e do princípio de conservação de massa.
V'_F (m ³ /d)	Fluxo de entrada da camada de fundo para a superfície em cada compartimento.	Calculado usando metodologia <i>LOICZ</i> , a partir dos balanços de água e sal doce no sistema e do princípio de conservação de massa.
V_Z (m ³ /d)	Fluxo de mistura entre as camadas de superfície e fundo de cada compartimento	Calculado a partir do balanço de água e sal.
V_{IM} (m ³ /d)	Descarga fluvial do Rio Itajaí-Mirim	Calculada a partir de modelo linear que relaciona a descarga em Indaial com a descarga do Rio Itajaí-Mirim (SCHETTINI, 2005)
$T_{Res\ Hidr.}$	Tempo de Residência Hidráulico	Tempo aproximado que a água leva para atravessar o sistema. Calculada a partir do volume do sistema e dos fluxos de entrada e saída de água em cada camada. $T_{Res\ Hidr.} = V_{sist} / IV_S$ ou IV_{FI}

3.4.2. Balanço de Sal:

A salinidade é um parâmetro conservativo no sistema, isto é, é assumido que o sistema não produz nem consome sal, de modo que $\sum entradas = \sum saída$.

Assim, considerando as salinidades em cada sistema e os fluxos de água, obtém-se os fluxos de sal entre os sub-sistemas. O sal que sai pela camada superficial do sistema n é balanceado pelo sal que entra pelo fundo a partir do sistema mais externo ($n-1$):

$V_{Sn} \cdot S_{Sn} = V_{F(n-1)} \cdot S_{F(n-1)}$. Para completar o balanço de sal, um termo de mistura vertical

(V_z) é responsável pelas trocas entre superfície e fundo, capaz de modificar as salinidades (S) dos meios (Figura 4):

$$V_{Zn} = [V_{F(n-1)} \cdot (S_{F(n-1)} - S_{F n})] / [S_{F n} - S_{S n}]$$

3.4.3. Balanço de Nutrientes:

Os fluxos de um nutriente Y entre os compartimentos foram obtidos da mesma forma que o demonstrado para o balanço de sal. Foram calculados os fluxos de entrada e de saída de nutrientes em cada compartimento. Entretanto o nutriente, ao contrário do sal, pode apresentar um comportamento não-conservativo dentro dos compartimentos. Assim, ele sofre transformações no sistema, de modo que um ambiente pode ser dominado por processos que resultem em consumo ou em produção interna do nutriente. Este balanço é chamado de fluxo não-conservativo (ΔY) e é obtido pela expressão: $\sum \text{entradas} + \sum \text{saídas} + \sum (\text{produção} - \text{consumo}) = 0$; $\Delta Y = Y(\text{Produção} - \text{Consumo})$. Se ΔY é positivo, o comportamento não conservativo do nutriente no sistema indica produção interna. No caso do ΔY positivo, significa aumento do nutriente no sistema, não explicado pelas entradas contabilizadas, representando um aumento líquido no sistema, devido a processos internos (decomposição, liberação pelo sedimento...).

Para a determinação do balanço de nutrientes, além dos fluxos relacionados à advecção e mistura (determinados pelo balanço de sal), foram incluídas estimativas das principais entradas que foram consideradas significativas, como segue.

3.4.3.1 Estimativa dos Aportes Originados pelo Esgoto Doméstico:

O fluxo de água associado ao esgoto doméstico é pouco significativo se comparado aos fluxos advectivos, de forma que eles não foram incluídos no balanço de

água (GORDON *et al.*, 1996). Entretanto, para o balanço de nutrientes estas entradas devem ser incluídas. Na região do Vale do Itajaí, nenhuma cidade possui sistema de coleta e tratamento de esgotos domésticos. Assim, para efeito de balanço, as entradas de N e P para o estuário foram calculadas considerando a produção diária de N e P *per capita* multiplicada pela população residente em cada área de contribuição (AC) do estuário. As produções *per capita* de N e P utilizadas foram de 7,98 mg N/d (570 mmol N/d) e de 2,5 mg P/d (81 mmol P/d), respectivamente (VON SPERLING, 1996). Os dados de população foram estimados para ao ano de 2003, baseados no Censo IBGE de 2000 e nas taxas de crescimento populacional para o período (IBGE, 2004).

3.4.3.2 Estimativa dos Aportes Originados pelo Escoamento Superficial (Runoff):

A entrada difusa de nutrientes pelo escoamento superficial foi estimada considerando o uso do solo e a precipitação em cada AC do estuário. Foram calculadas as entradas devido ao escoamento rural e escoamento urbano, cujas áreas foram obtidas a partir das cartas de uso do solo (anexo de 1 a 7), considerando área rural e área urbana. Os valores de entrada foram então calculados de acordo com Schueller (1987 *apud* RORIG, 2005). O cálculo é baseado na seguinte expressão: $L = R \times C \times A$, onde L é a carga diária (em mmol), R é o escoamento diário (em m), C é a concentração da substância (em mmol/m³), A é a área (km²).

O escoamento (R) foi calculado a partir da precipitação média diária (P), do coeficiente de escoamento (Rv) e da fração anual de eventos com escoamento (Pj, geralmente 0,9, segundo o método simples de SCHUELER, 1987), segundo a expressão $R = P \times Pj \times Rv$.

Por sua vez o coeficiente de escoamento (Rv) foi calculado em função da fração impermeável da bacia (Ia), segundo a expressão $Rv=0,05 + 0,9 Ia$ (SCHUELER,

1987). Os valores de I_a usados neste trabalho foram os mesmos usados por Rörig (2005), que selecionou as I_a s baseado em valores médios obtidos por outros autores para áreas rurais e urbanas: I_a (rural) = 0,07 e I_a (urbano) = 0,25. Os valores de concentração de nutrientes no escoamento urbano e rural foram obtidos de Rörig (2005).

3.4.3.3 Aportes Originados pelas Indústrias de Processamento de Pescado:

Os municípios de Itajaí e Navegantes concentram um grande número de indústrias de processamento de pescado, as quais se concentram às margens do estuário do Rio Itajaí. Levantamentos relacionados à estatística pesqueira apontam para um total de 66 indústrias (GEP, 2001). Estas indústrias geram uma quantidade não desprezível de resíduos de alto conteúdo orgânico, estimado em torno de 30.000 ton/ano (GEP, 2001), além de um volume variável de água residuária com alto conteúdo de P e principalmente N. Entretanto não existem dados sobre a carga de N e P lançada por estas indústrias no estuário. Desta forma, esta carga foi estimada considerando os dados de desembarque mensal de pescado na região, para os anos de 2003 e 2004. Estes dados foram obtidos junto ao SIESPE (Sistema Integrado de Estatística Pesqueira, convênio Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento) através da home-page do Grupo de Estudos Pesqueiros da UNIVALI (GEP -<http://siaiacad04.univali.br/>, acesso em 01/07/2006). Foi considerado que em torno de 59% do total desembarcado é processado pela indústria local (GEP, 2001). A produção de N e P foi então calculada considerando que são produzidos entre 2,5 e 3 kg de N (média= 2,75) e entre 0,1 e 0,4 kg (média= 0,25) de P para cada tonelada de pescado processado (UNEP, 2001), além do resíduo sólido. Assim, as entradas mensais de N e P, originadas da indústria pesqueira foram calculadas segundo as expressões:

$$V_{\text{Pesq N}} = (0,59 * \text{Desemb.} * 1,9643 \times 10^5) / n \text{ e}$$

$$V_{\text{Pesq P}} = (0,59 * \text{Desemb.} * 8,0645 \times 10^3) / n, \text{ onde:}$$

$$V_{\text{Pesq}} = \text{entrada de N ou P em mmol / d,}$$

$$\text{Desemb.} = \text{Total desembarque no mês (toneladas),}$$

$$1,9643 \times 10^5 = \text{total de N produzido por tonelada processada (mmol),}$$

$$8,0645 \times 10^3 = \text{total de P produzido por tonelada processada (mmol),}$$

$$n = \text{número de dias no mês}$$

3.5. Variabilidade Intramareal:

3.5.1. Amostragem e Processamento:

Para avaliar a variação intramareal de nutrientes na região de maior influência da maré, foi realizada uma campanha sinótica de coleta de dados. Nesta campanha foram monitoradas, simultaneamente, 3 estações de coleta durante 25 horas de amostragem, correspondendo a 2 ciclos de maré. A campanha foi realizada em condições de maré de sizígia e durante período de onde a descarga fluvial era de 195 m³/s. A amostragem foi iniciada às 14:00 horas do dia 08 de dezembro de 1999 com término às 15:00 horas do dia seguinte. As estações foram localizadas no baixo (correspondendo à estação #9 do monitoramento espaço-temporal) e médio estuário (próxima à estação #7 do monitoramento) e no limite inferior do alto estuário (estação #6 do monitoramento) (Figura 3). Durante toda a campanha o nível d'água foi registrado nas 3 estações.

Em cada estação foram medidos, a cada meia hora, os perfis verticais de velocidade e direção de corrente (perfilador acústico, ADCP), e de salinidade e temperatura (CTD). A descrição detalhada da estrutura física e distribuição de corrente

é descrita em Schettini *et al.* (2006). Em intervalos horários foram obtidas amostras de água em superfície e fundo, nas estações do médio e baixo estuário e de superfície no alto estuário. As amostras foram mantidas resfriadas até o processamento em laboratório, sendo posteriormente determinadas as concentrações dos nutrientes como descrito na metodologia do monitoramento espaço-temporal.

4. RESULTADOS:

4.1. Uso do Solo:

O estuário do Rio Itajaí-Açu está situado na porção final da bacia do Rio Itajaí. Esta região abrange os municípios de Indaial, Blumenau, Gaspar, Ilhota, Luis Alves, Itajaí e Navegantes (Tabela 4). A área de estudo foi classificada em função do uso e ocupação do solo, sendo consideradas 6 classes de uso do solo: mata nativa, área urbanizada, vegetação rasteira (incluindo áreas de cultivo), área de reflorestamento, solo exposto e corpos d'água (RÖRIG, 2005). A área da porção final da bacia de drenagem abrangida pelo estuário foi de cerca de 2500 km², correspondendo a 16% da bacia do Itajaí. Deste total, 60,5% correspondem à mata nativa, 7,6% correspondem à área urbanizada, 26,6% a área com presença de vegetação rasteira (principalmente agricultura), 1,4% a solo exposto, 2,1% a áreas de reflorestamento e 0,7% a cursos d'água. Os valores das áreas de cada classe de uso do solo considerada em cada área de contribuição são mostrados na Tabela 5.

Tabela 4: Indicadores sócio-econômicos dos municípios da região de entorno do estuário do Itajaí. Fontes: IBGE (2004), ICEPA (2005), PNUD (2003).

Município	População total (2000)	Área (km ²)	Densidade demográfica (2000)	População rural (2000)	População urbana (2000)	Área Plantada de Arroz (ha) (2002)	Principal Cultura (ha) (2002)
Blumenau	261.808	510,3	513,0	19.865	241.943	40	Milho (500)
Brusque	76.058	280,6	271,1	2.802	73.256	125	Mandioca (250)
Gaspar	46.414	369,8	125,5	16.813	29.601	3.200	Arroz (3.200)
Ilhota	10.574	245,2	43,1	4.129	6.445	2.100	Arroz (2.100)
Indaial	40.194	429,9	93,5	1.812	38.382	240	Arroz (240)
Itajaí	147.494	303,6	485,8	5.544	141.950	2.020	Arroz (2.020)
Luis Alves	7.974	260,8	30,6	5.850	2.124	550	Banana (3.900)
Navegantes	39.317	119,3	329,6	2.667	36.650	736	Arroz (736)
TOTAL	629.833	2519,5	-	59.482	570.351	9.011	-
MÉDIA	-	314,9	236,5	7480	71.294	-	-
Total Santa Catarina	5.356.360	95.285	-	1.138.429	4.217.931	137.340*	-
Média Santa Catarina	-	-	56,1	3.885	14.395	-	-

* Em 2004, a área plantada de arroz em Santa Catarina subiu para 151.800 ha.

Tabela 5: Áreas e classes de uso do solo em cada área de contribuição (AC) na região terminal da bacia do rio Itajaí.

Classes de Uso		AC1	AC2	AC3	AC5	AC6	AC7	AC9	Total	
									km ²	%
Área Urbanizada	km ²	7,8	57,6	19,7	13,7	20,3	29,3	38,9	187,2	7,6
Cursos de Água	km ²	1,5	2,7	0,7	1,9	2,3	3,3	4,2	16,5	0,7
Mata / Capoeirão	km ²	174,3	416,0	186,2	133,4	118,1	384,1	87,9	1.500,0	60,5
Reflorestamento	km ²	4,6	8,2	0,7	3,0	4,1	29,6	2,5	52,8	2,1
Solo Exposto	km ²	0,6	6,5	7,2	1,5	4,3	11,1	4,4	35,5	1,4
Vegetação Rasteira	km ²	39,8	222,8	27,6	33,0	77,1	217,6	41,7	659,6	26,6
Sem dados	km ²	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,2	0,0	27,2	1,1
Total	km ²	228,6	713,8	242,0	186,5	226,1	702,2	360,5	2.478,8	100
	%	8,6	26,8	9,1	7,0	8,5	26,4	13,6	100	-

Entre os diferentes tipos de uso do solo em cada área de contribuição, que em potencial exercem maior influência sobre a qualidade da água do sistema, estão a urbanização e a agricultura. Com relação à urbanização, merecem destaque as áreas encontradas nas AC 2 e 3, que correspondem ao município de Blumenau e às encontradas nas AC 7 e 9, correspondendo aos municípios de Itajaí e Navegantes. Com relação à agricultura, embora não tenha sido feita uma classificação específica para este uso, ela se encontra inserida dentro da região de vegetação rasteira, a qual se concentra principalmente às margens do estuário do Itajaí. A principal atividade agrícola desenvolvida na região é o cultivo de arroz irrigado (ICEPA, 2005) realizada na planície costeira da bacia do Itajaí, na região de Gaspar, Ilhota e Itajaí, área deste estudo. Esta atividade é desenvolvida às margens do estuário, utilizando água a partir do Rio Itajaí para a manutenção das culturas e representando uma atividade em expansão na região. Dados oficiais do Estado de Santa Catarina (ICEPA, 2005) para os anos de 2002 mostram que nas regiões de Gaspar, Ilhota, Luis Alves, Navegantes e Itajaí a área total utilizada para cultivo de arroz é de 8600 ha ou 86 km² (Tabela 4).

4.2. Variação espaço-temporal:

Para caracterizar a variação espaço-temporal das variáveis selecionadas, foram utilizadas três estratégias distintas. Para avaliação do panorama geral da variabilidade das variáveis, no espaço e no tempo, foram confeccionados gráficos de isolinhas, nos quais foram incluídos os resultados de superfície de todas as estações de amostragem do curso principal do estuário do Rio Itajaí. Para caracterizar a variação espacial, foram utilizadas médias das variáveis por estação de coleta. Neste caso foi incluído também o erro padrão, para dar idéia da dispersão dos resultados. Finalmente, para a visualização da variabilidade temporal, os dados foram apresentados na forma de médias temporais por data de coleta, obtidas considerando todo o estuário.

4.2.1. Descarga Fluvial:

As campanhas de monitoramento para avaliação da variação espaço-temporal das variáveis indicativas da qualidade na água no estuário compreenderam o período entre outubro de 2003 e dezembro de 2004. Durante este período, a descarga fluvial em Indaial (estação #1 do monitoramento), apresentou uma média de 204,2 m³/s, variando entre 48,5 e 1938 m³/s. Apesar da alta variabilidade, durante a maior parte do tempo a descarga foi baixa (moda = 83,4), apresentando pulsos esporádicos de alta descarga. Foi o caso dos meses de dezembro de 2003 e julho, setembro e outubro de 2004 (Figura 5). Estes pulsos de alta descarga foram intercalados por períodos prolongados de baixa descarga, como foi o período compreendido entre os meses de janeiro a junho e de julho a setembro de 2004 (Figura 5), quando a descarga ficou geralmente abaixo de 200 m³/s.

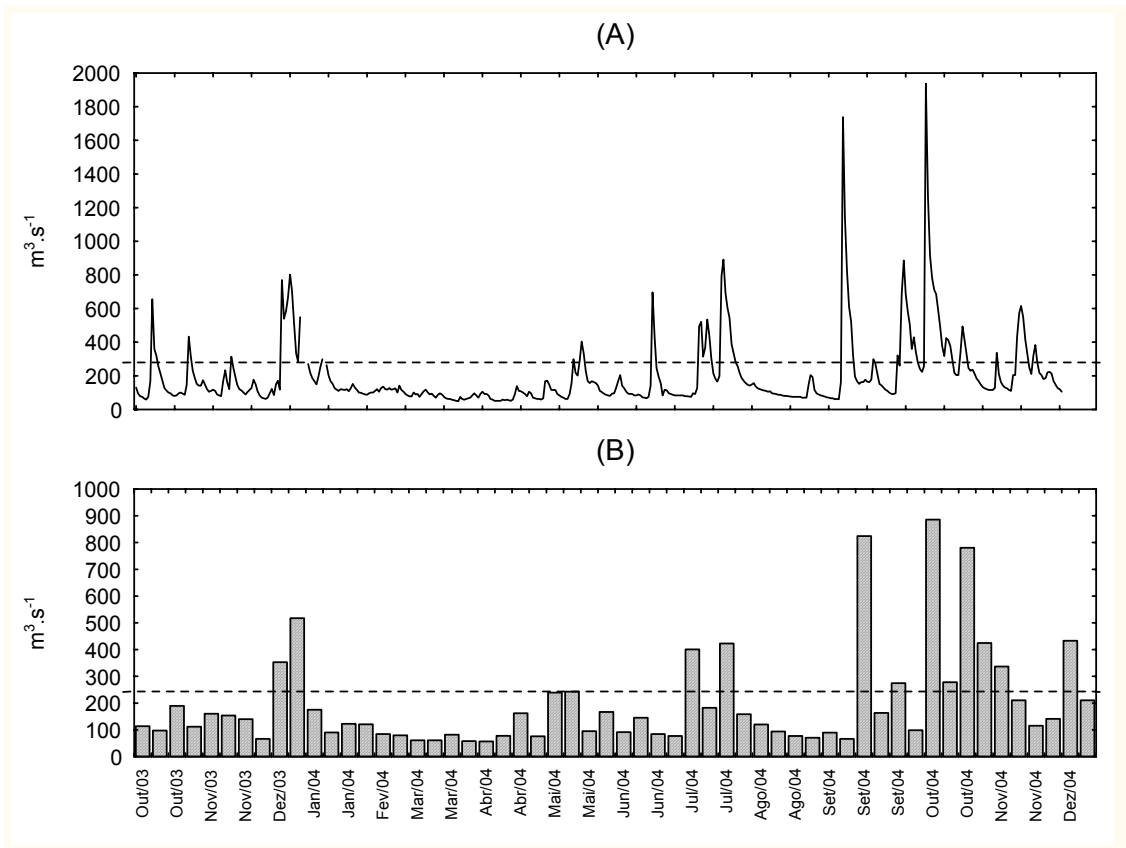


Figura 5: (A) Descarga fluvial diária do Rio Itajaí-Açú medida na estação limnométrica de Indaial (estação #1, situada a 94 km a montante da desembocadura do estuário) no período compreendido pelo monitoramento do estuário (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (B) Descarga nos dias de amostragem. A linha tracejada representa a média histórica da descarga fluvial ($228 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.2.2. Variáveis Físico-químicas:

A temperatura da água durante o período monitorado variou entre 14 e 29,5 °C. Ao longo do curso principal do estuário do Itajaí não foi verificado um padrão nítido de variação espacial. As maiores amplitudes foram registradas na estação #0, em Indaial, em função da baixa profundidade do Rio Warnow. Temporalmente a temperatura mostrou variação relacionada à sazonalidade, com as menores temperaturas registradas no período de inverno, entre julho e agosto e as maiores em janeiro e fevereiro (Figura 6a, b e c).

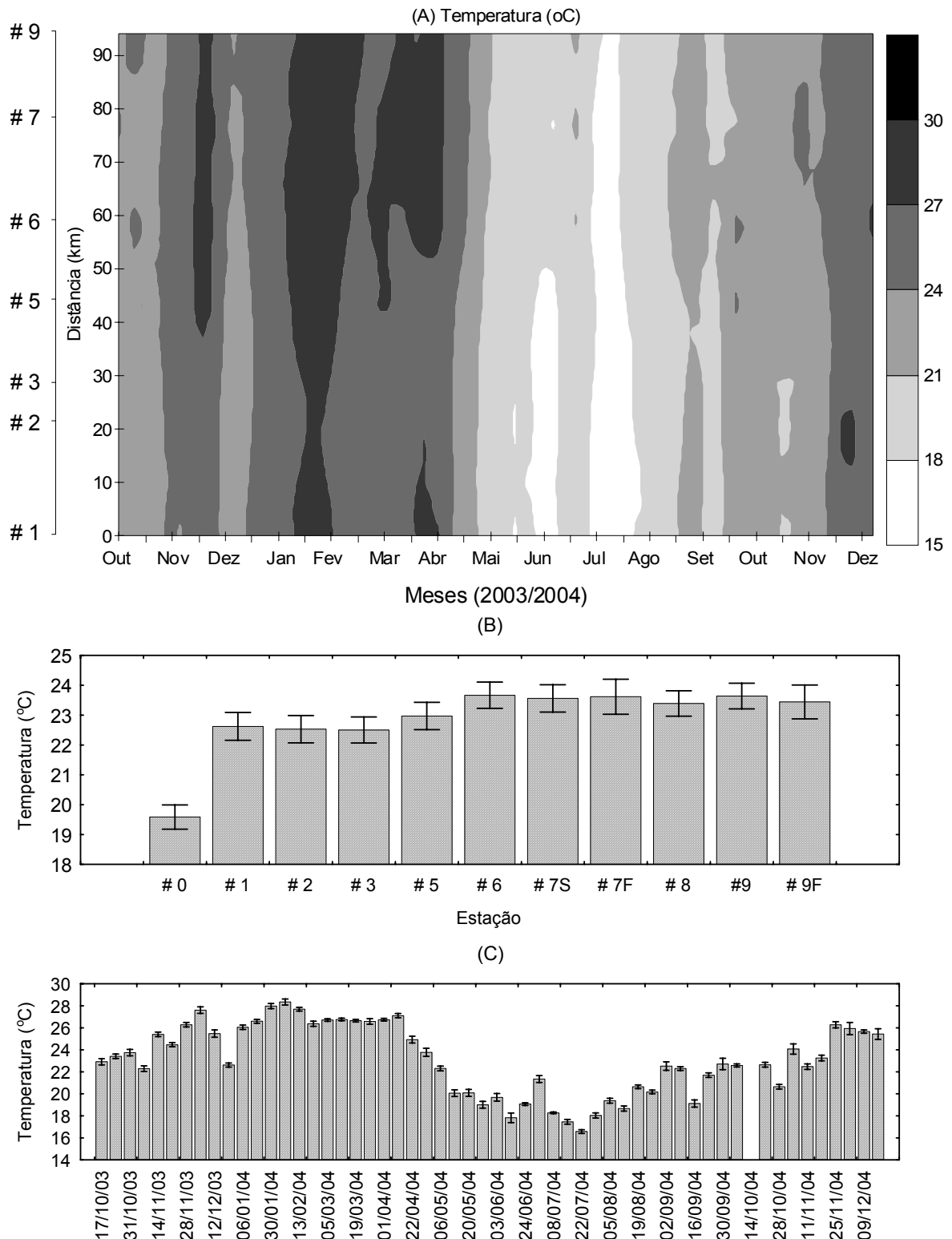


Figura 6: Variação da temperatura no sistema fluvial-estuarino do Rio Itajaí-Açu. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

A variabilidade espaço-temporal da salinidade refletiu a influência marinha no estuário. As estações sujeitas diretamente à influência marinha (#7 e #9) apresentaram salinidade variando entre 0 e 31, com os maiores valores sempre registrados no fundo, em função da penetração da cunha salina. A variação temporal da salinidade esteve relacionada à descarga fluvial. Os maiores valores coincidiram com os períodos prolongados de baixa descarga, como no início de abril de 2004. Nos momentos de pulsos de descarga, como dezembro de 2003 e setembro de 2004, a salinidade diminuiu, chegando ao ponto de todo o estuário ficar dominado pela água doce, como no final de novembro de 2004 (Figuras 7 a, b e c).

O pH ao longo do estuário apresentou uma média geral de 6,7 com valores pontuais mínimo e máximo respectivamente iguais 4,5 e 7,9. De forma geral a variação do pH mostrou diminuição nas estações #3 e #5. Já nas estações #7 e #9, em função da influência marinha, observou-se aumento do pH (Figuras 8 a e 8b).

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram uma média geral de 6,2 mg/l, variando entre 2,1 e 12,3 mg/l. De forma geral as concentrações tenderam a diminuir da estação #1 até a estação #9, refletindo a queda na qualidade da água em direção à desembocadura do estuário (Figuras 9a, b e c). Os maiores valores pontuais foram registrados na estação #0, situada fora do curso principal do rio Itajaí, a estação de referência do estudo. Em média os menores valores ocorreram na estação #8 (Figuras 8b), situada no Rio Itajaí Mirim, um dos principais tributários do estuário do Rio Itajaí, próximo à sua desembocadura.

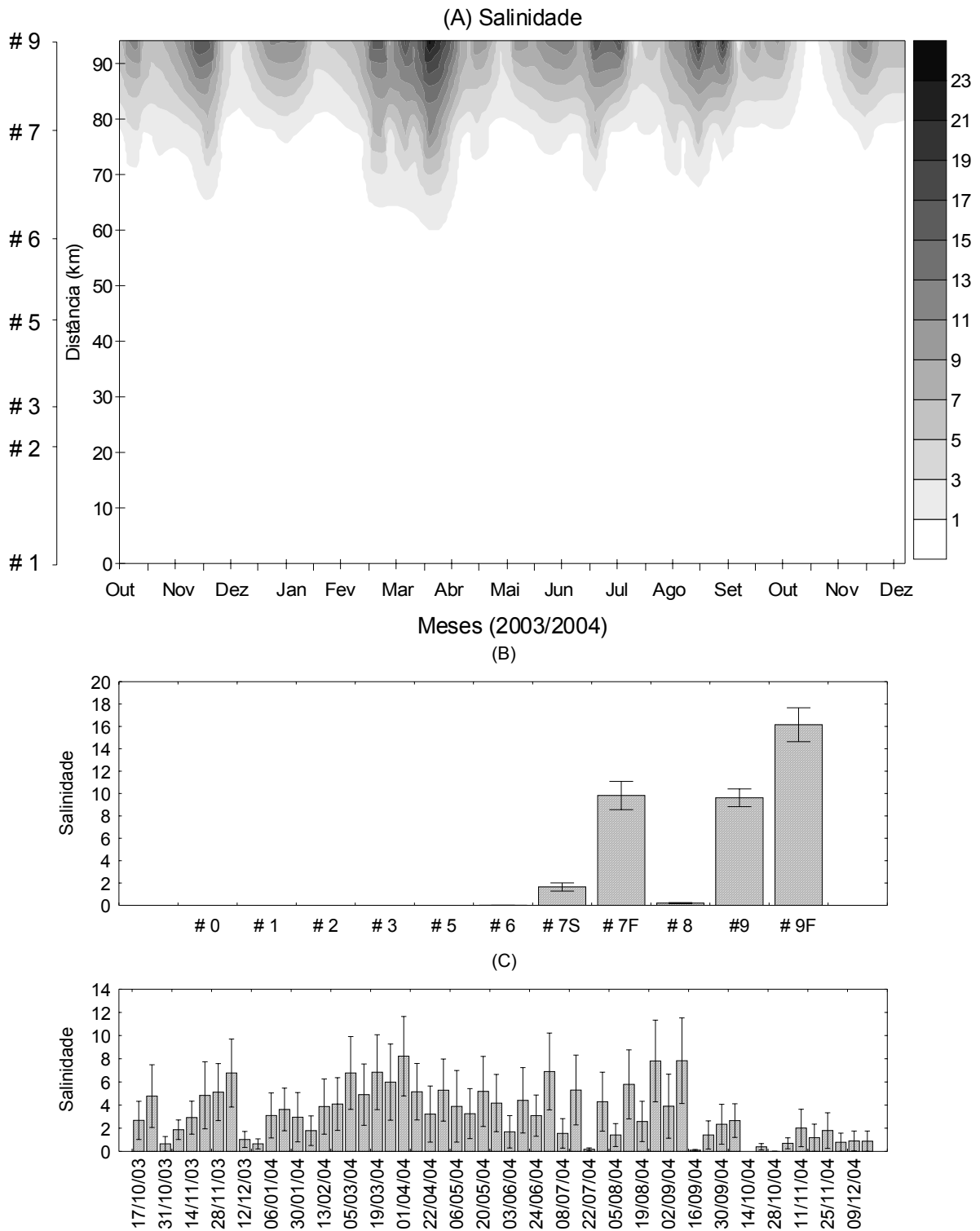


Figura 7: Variação da salinidade no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário..

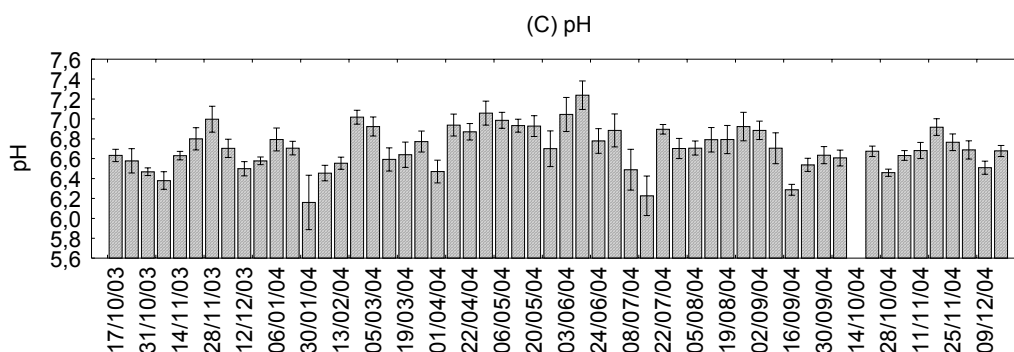
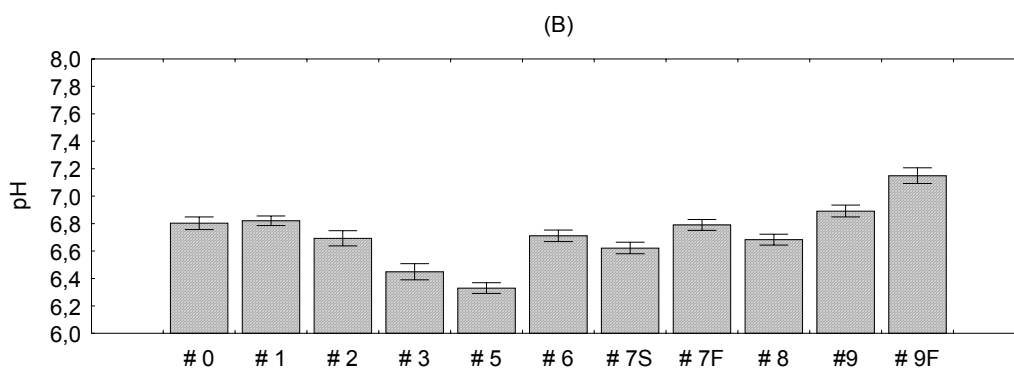
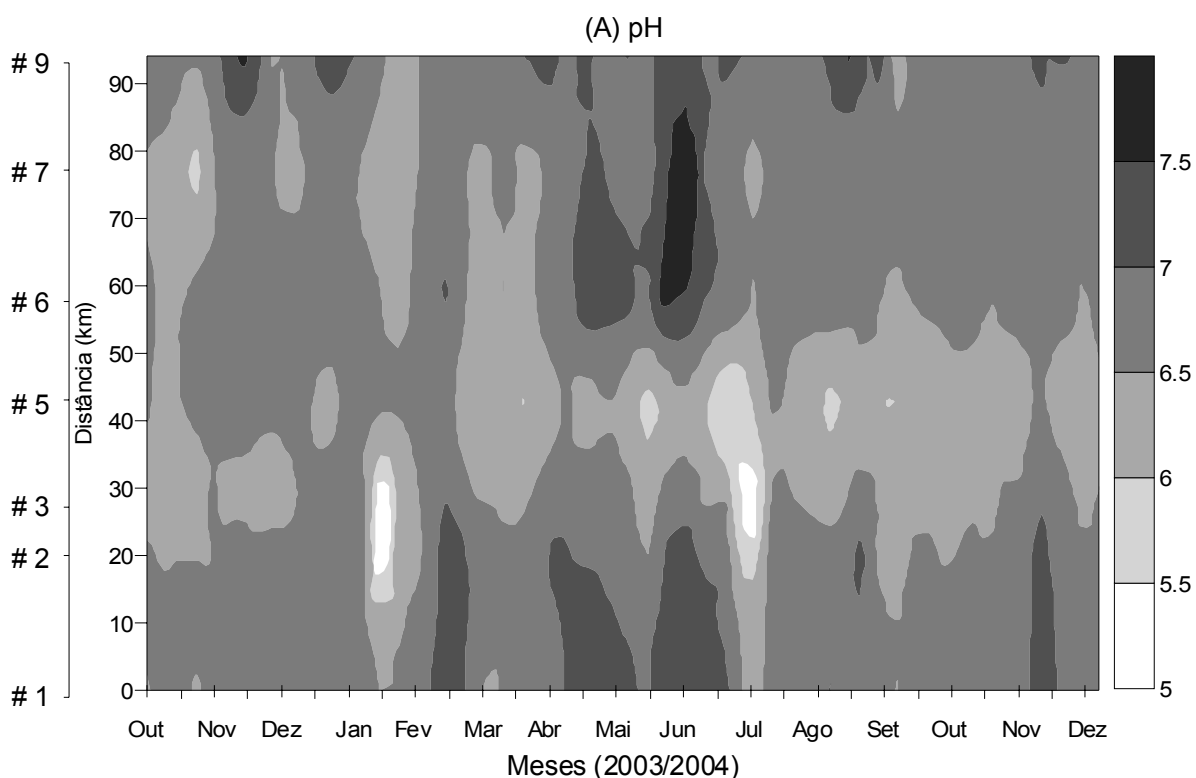


Figura 8: Variação do pH no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

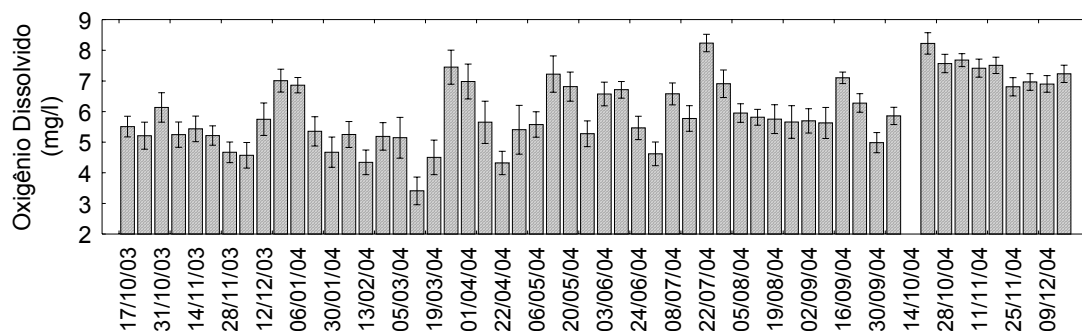
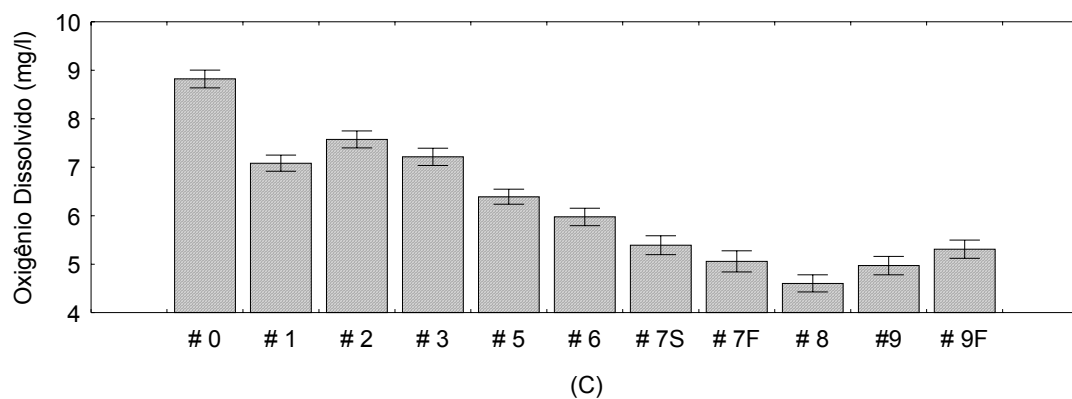
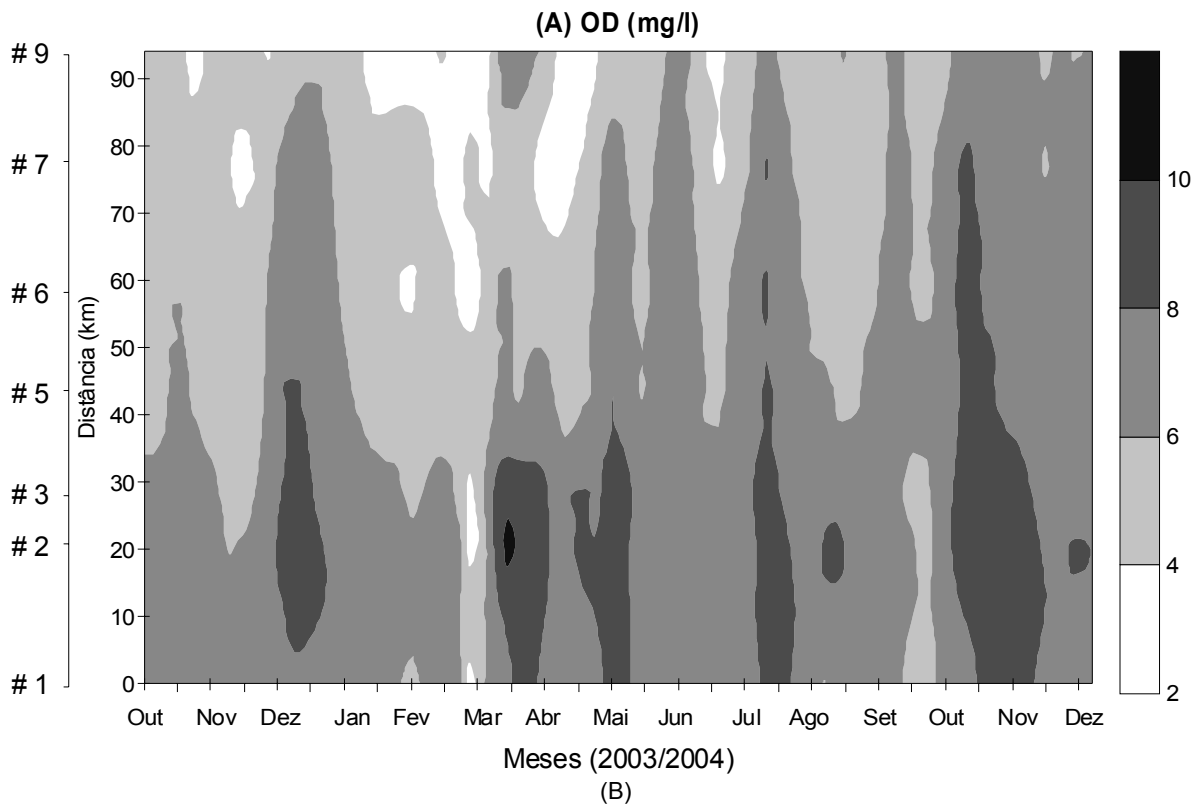


Figura 9: Variação do oxigênio dissolvido no estuário do Rio Itajaí: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

4.2.3. Nutrientes:

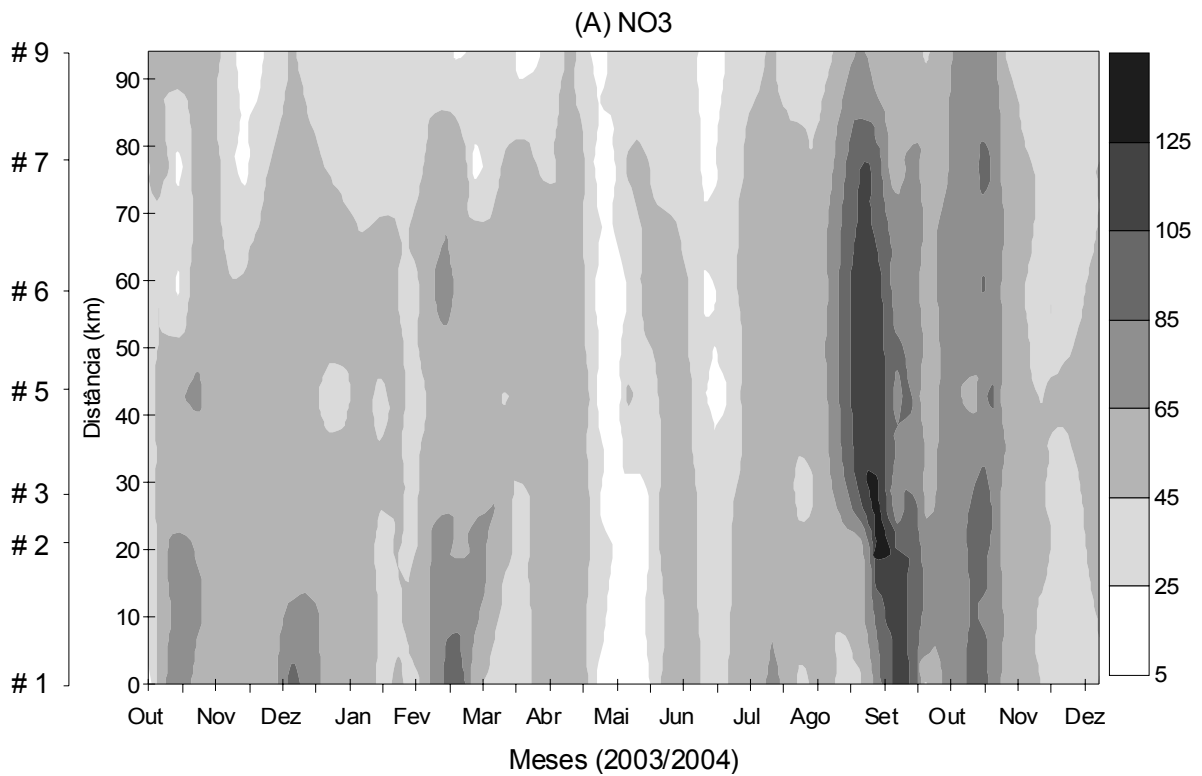
4.2.3.1. Nutrientes Nitrogenados (NID):

O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), correspondendo à soma de nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+), nitrito (N-NO_2^-) e nitrato (N-NO_3^-) variou entre 11,0 e 175 μM . A principal forma de NID foi em geral o NO_3^- , principalmente nas estações da extremidade fluvial do estuário. Variando entre 5,3 e 135,6 μM , o NO_3^- mostrou uma tendência à diminuição em direção à desembocadura do estuário (Figuras 10 a e 10b), nas estações sob influência da água marinha (#7 e #9). Quando comparadas à estação #0, as demais apresentaram concentrações muito superiores de NO_3^- (Figura 10b). Temporalmente, ele foi o responsável pelo aumento do NID, registrado em setembro e outubro de 2004, nos períodos de picos de descarga fluvial (Figura 10c). Da mesma forma, as menores concentrações de NO_3^- foram registradas em períodos prolongados de baixa descarga, como foi o caso de maio até o final de junho de 2004.

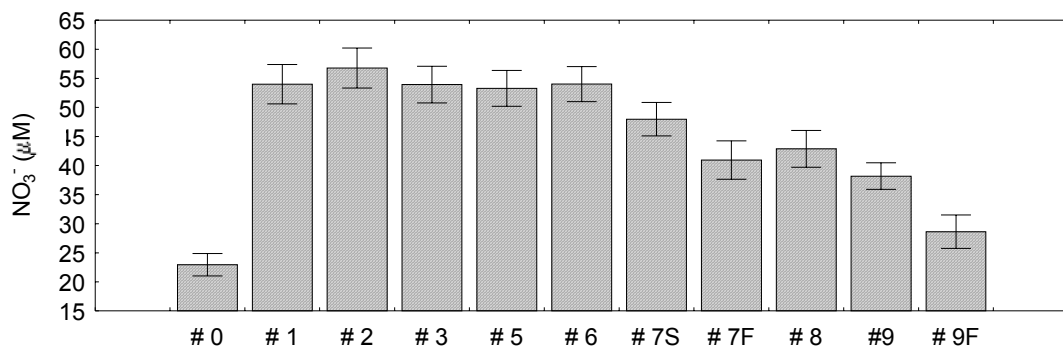
O NO_2^- foi o nutriente nitrogenado que apresentou as menores concentrações, variando entre 0,1 e 10,6 μM no estuário. Em média, o NO_2^- tendeu a aumentar em direção à desembocadura do estuário, variando entre uma média de 0,6 μM na estação #1 até 1,7 μM na estação #7 (Figura 11a e 11b). Temporalmente, ele apresentou picos expressivos de concentração registrados em março e abril de 2004, nas estações #6, #7 e #9 (Figura 11 a). Estes picos coincidiram com situações prolongadas de baixa descarga fluvial, o que resultou na entrada de água salgada (Figura 7), e com as menores concentrações de oxigênio de todo o período, que variou entre 2 e 4 mg/l nesta ocasião (Figura 9).

O NH_4^+ apresentou concentrações variando entre 1,3 e 99,8 μM no estuário. Pontualmente, as maiores concentrações foram registradas nas estações #1 e #2, em uma situação específica em julho de 2004 (Figuras 12 a e c). Entretanto, a

tendência geral de variação do NH_4^+ foi aumentar espacialmente após o município de Blumenau (estações #2-#3) e próximo à desembocadura (Figuras 12 a e b).



(B)



(C)

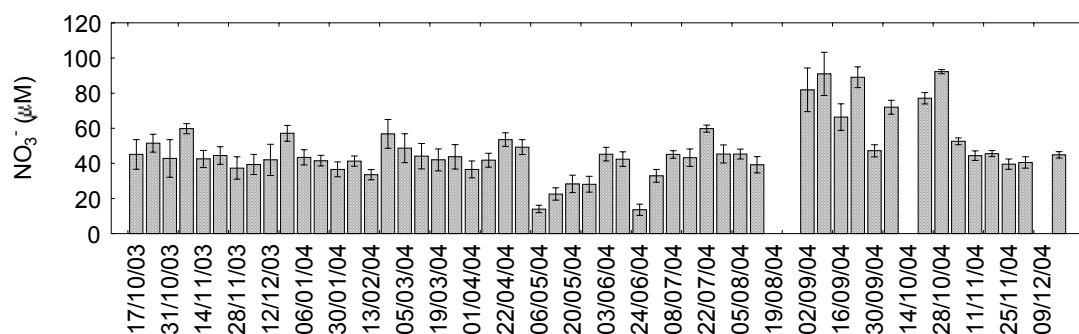
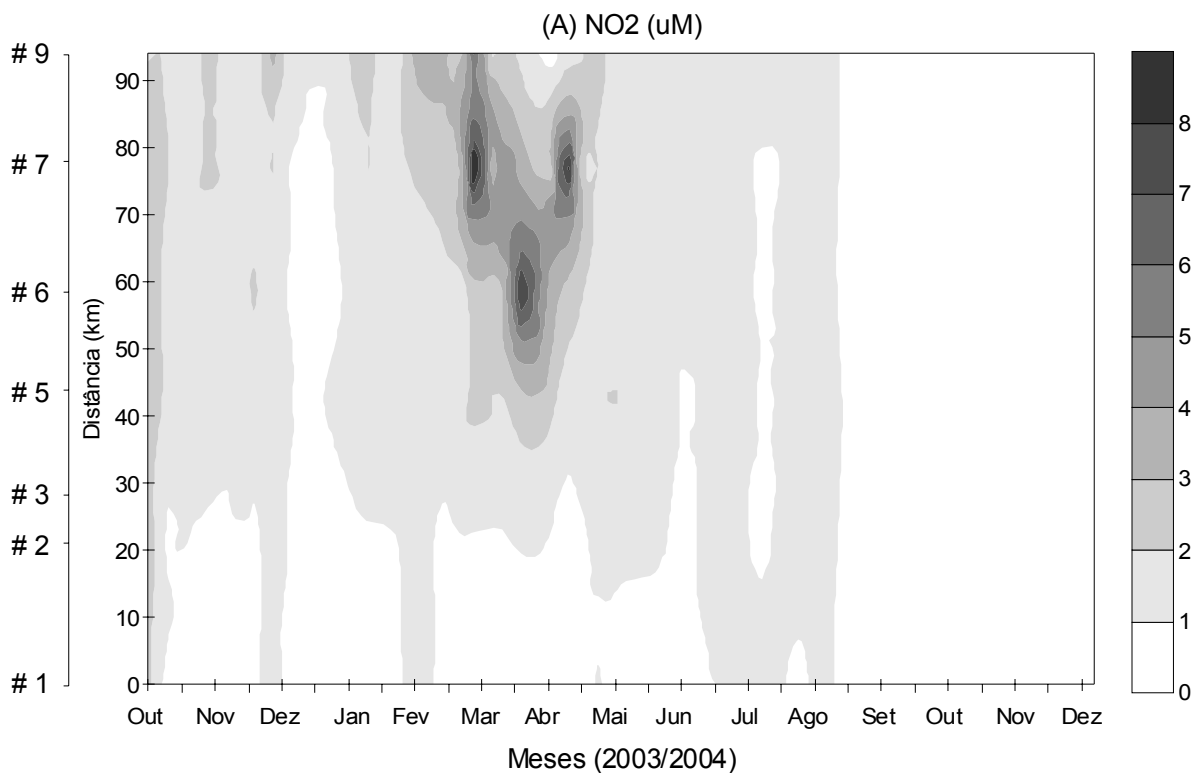
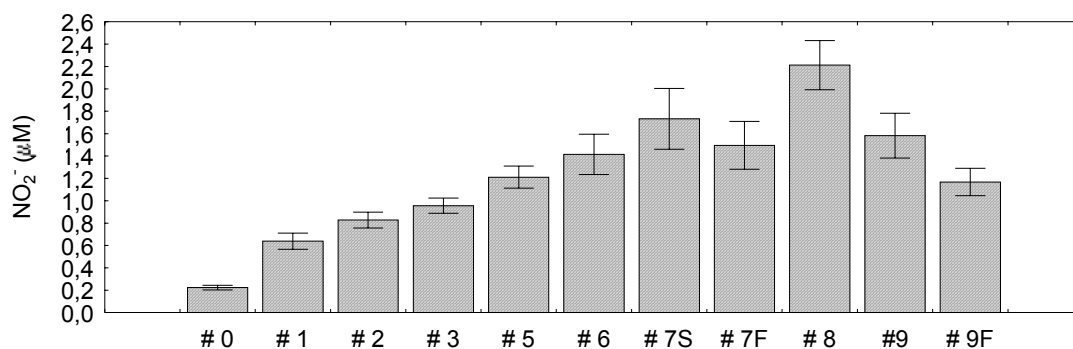


Figura 10: Variação do nitrato (NO₃⁻) no estuário do Rio Itajaí-Açu: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.



(B)



(C)

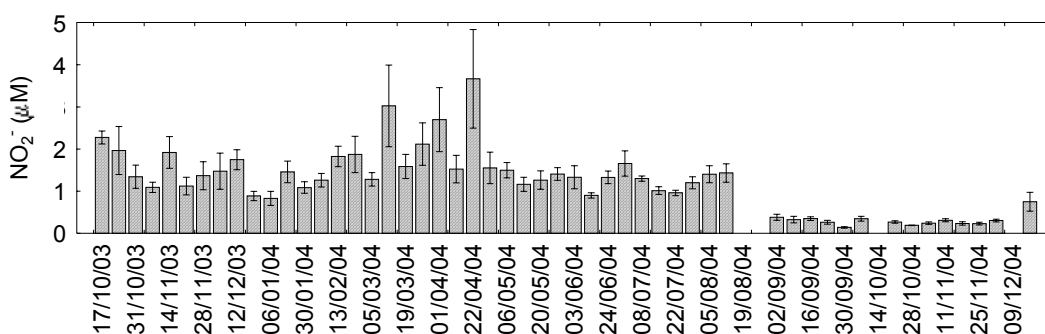


Figura 11: Variação do nitrito (NO₂⁻) no estuário do Rio Itajaí-Açu: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

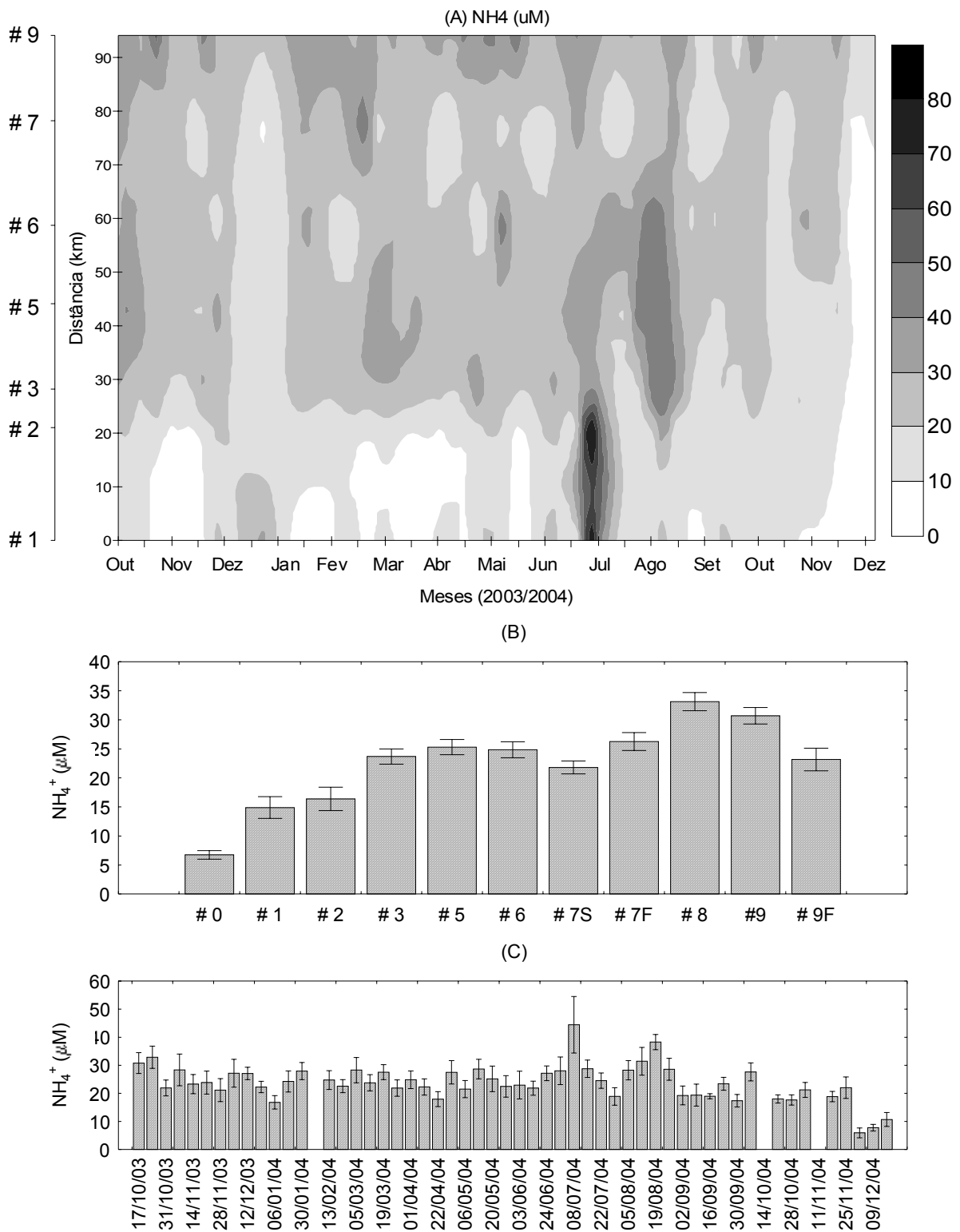


Figura 12: Variação do amônio (NH₄⁺) no estuário do Rio Itajaí-Açú: (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

Comparando a contribuição das 3 formas de nitrogenados em relação ao NID, foi observada uma diminuição progressiva do NO_3^- da estação #1 em direção à estação #9, com o aumento correspondente do NH_4^+ (Figura 13). O NH_4^+ que representava em torno de 20 % do NID nas estações #0 e #1, passa a representar mais de 40% na estação #9. Este aumento percentual do NH_4^+ foi devido ao aumento das concentrações do NH_4^+ ao longo do estuário e à diminuição das concentrações de NO_3^- nas estações com influência de salinidade.

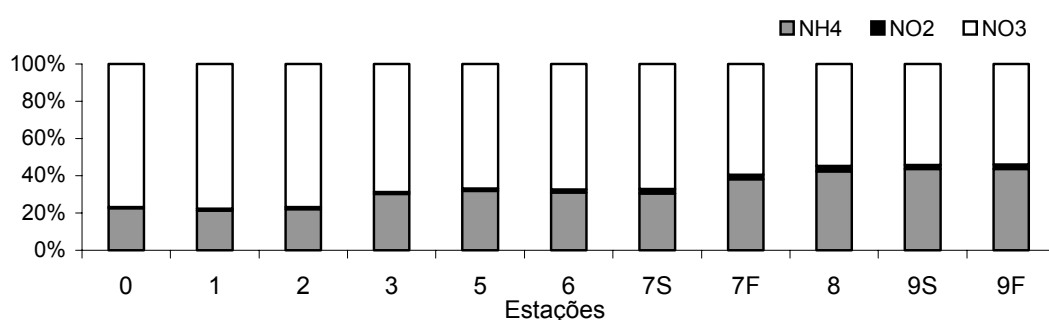


Figura 13: Distribuição dos percentuais médios de amônio (NH_4), nitrito (NO_2) e nitrato (NO_3) sobre a concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) nas estações de amostragem no estuário do Rio Itajaí-Açú. Período amostrado: outubro de 2003 a dezembro de 2004.

4.2.3.2. Fosfato:

O fósforo inorgânico dissolvido, representado pelos íons fosfato (PO_4^{3-}), variou entre 0,1 e 6,2 μM . A tendência geral de variação do PO_4^{3-} mostrou diminuição nas estações próximas à desembocadura, as quais sofrem mistura com a água marinha (Figura 14a e b). Temporalmente foram registradas duas situações de altas concentrações de fosfato em todo o estuário, ocorridas em dezembro de 2003 e final de agosto e início de setembro de 2004 (Figura 14 a e c). Estas situações coincidiram com momentos de elevação da descarga fluvial. Entretanto em outros períodos de alta descarga, como os meses de outubro e novembro, embora a descarga tenha apresentado picos, o mesmo não foi registrado para o PO_4^{3-} .

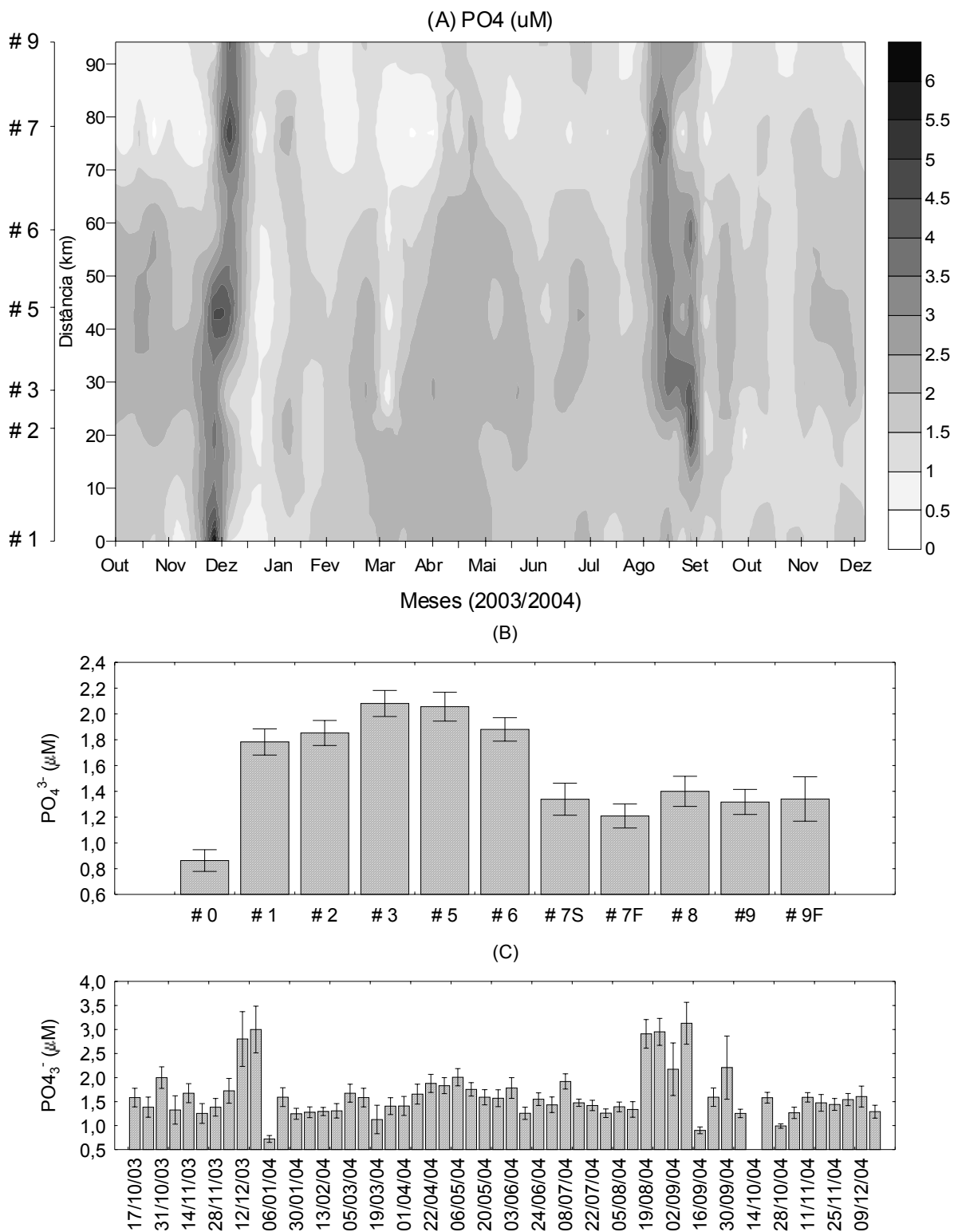


Figura 14: Variação do fosfato (PO₄³⁻) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

4.2.3.3. Silício:

O silício dissolvido, presente normalmente como ácido orto-silícico (H_4SiO_4), tem sua origem relacionada ao intemperismo da crosta terrestre, sendo, portanto associado à lixiviação e exposição do solo. Pontualmente o Si variou entre 15,4 e 260 μM . Não foi observado um padrão claro de variação espacial do Si, ficando as concentrações médias muito semelhantes entre as estações (Figuras 15 a e b). Entretanto, todas as estações apresentaram concentrações de Si muito superiores à estação de referência (#0) (Figura 15b). De forma geral o Si apresentou concentrações mais baixas entre outubro de 2003 e fevereiro/março de 2004 (Figuras 15 a e 15c). A partir de março, o Si apresentou aumento progressivo até o final de junho, quando novamente suas concentrações voltaram a diminuir, atingindo os menores valores de todo o estudo em setembro de 2004. Em seguida, entre setembro e outubro, foram registrados os maiores valores de Si, o que coincidiu com os maiores picos de descarga fluvial em Indaial (Figura 5). Entretanto, nos períodos referentes aos aumentos observados entre março e junho de 2004 não foram registrados aumentos expressivos na descarga fluvial, como o ocorrido em setembro e outubro.

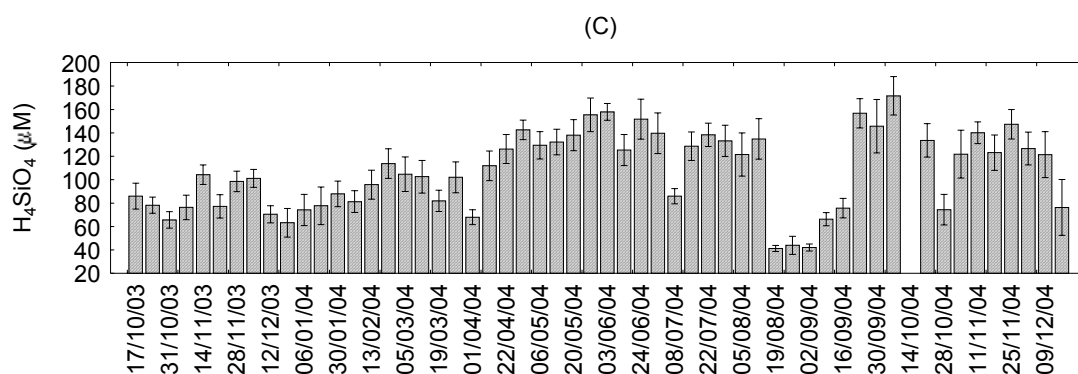
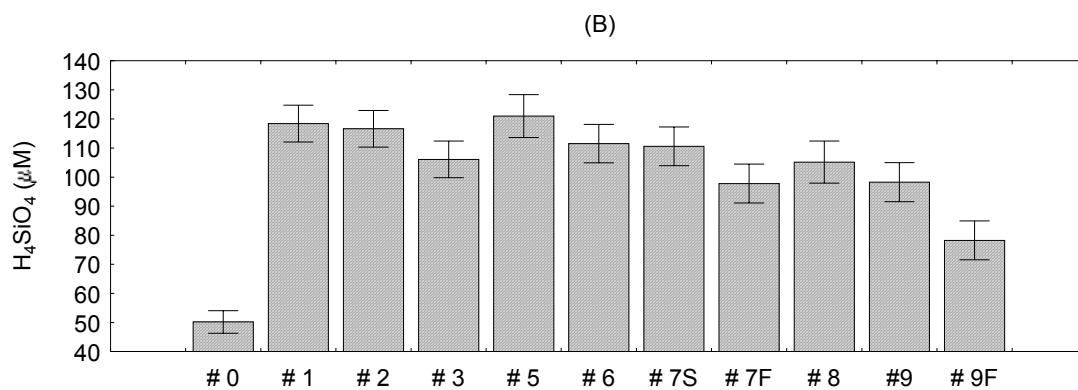
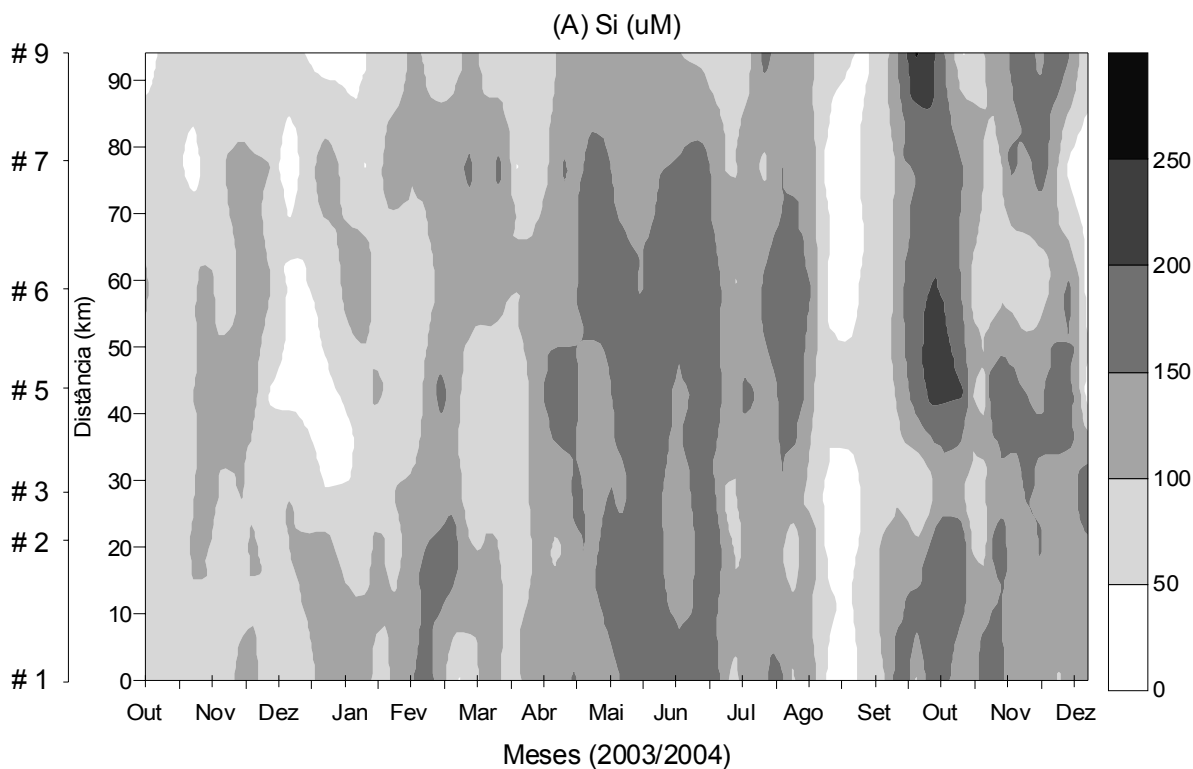


Figura 15: Variação do Silício (H_4SiO_4) no estuário do Rio Itajaí-Açu. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

4.2.4. Material Particulado em Suspensão (MPS):

O material particulado em suspensão apresentou alta variabilidade com valores mínimos e máximos respectivamente iguais a 0,8 e 608 mg/l. Espacialmente, a maior média de concentração foi obtida na estação #6, situada no município de Ilhota (Figuras 16 a e b). Temporalmente, as maiores concentrações de MPS (Figuras 16 a e c) foram registradas após períodos de aumento prolongado da descarga fluvial (Figura 5), como foi o caso dos meses de outubro de 2003, julho de 2004 e outubro de 2004. Embora os maiores valores registrados tenham ficado em torno de 600 mg/l, este fato ocorreu apenas pontualmente, em dezembro de 2004 nas estações #2 e #3. Com exceção desta ocasião, as maiores concentrações ficaram em torno de 300 mg/l.

4.2.5. Material Orgânico:

4.2.5.1. Carbono Orgânico Particulado (COP):

O COP apresentou concentrações variando entre 5,1 e 1260 μM ao longo do estuário do Itajaí (Figura 17a). Não foi observado um padrão claro de variação, demonstrado pela variação das médias em cada estação (Figura 17b). Temporalmente, as maiores concentrações foram observadas durante os períodos de aumento da descarga fluvial. Assim, alguns períodos foram marcados pelo aumento do COP no estuário, como os meses de outubro de 2003, julho de 2004 e setembro e outubro de 2004 (Figuras 17 a e c), coincidentes com momentos de aumento da descarga (Figura 5). Em abril o COP também aumentou ao longo do estuário, sem que, no entanto, fosse registrado aumento da descarga.

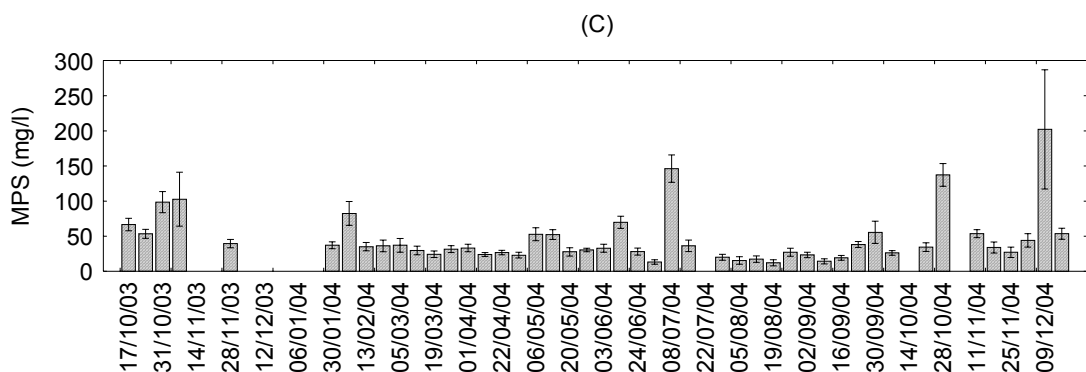
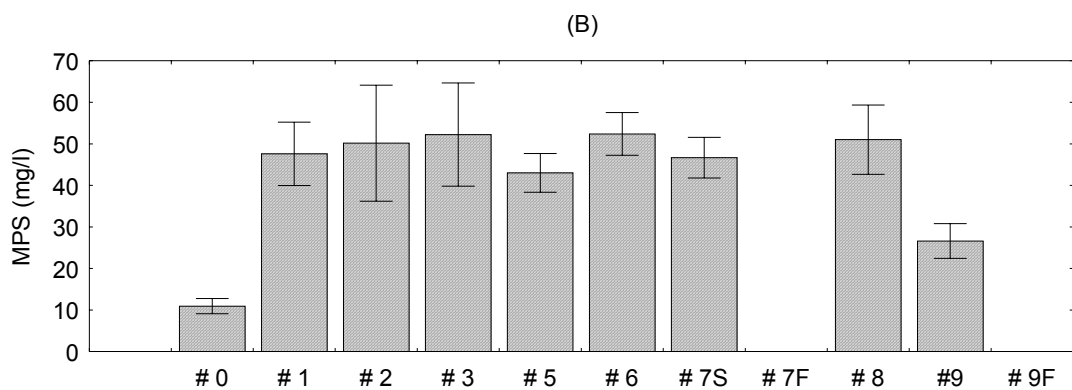
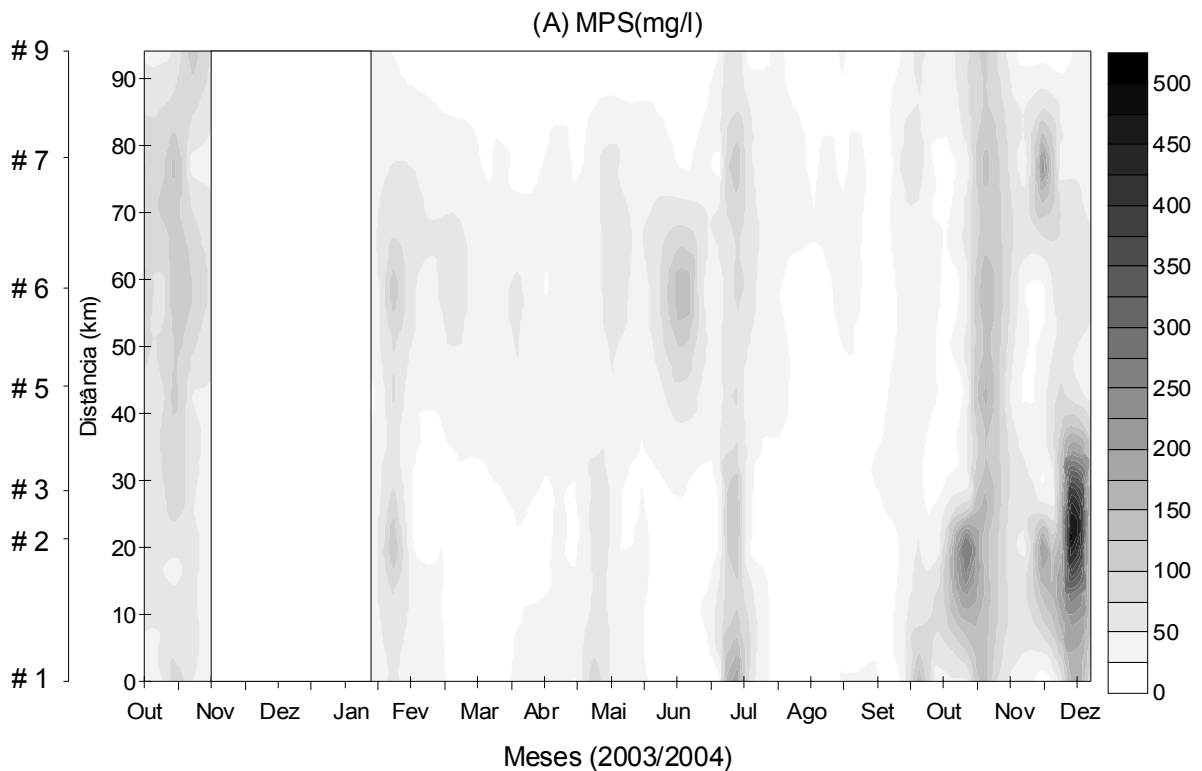
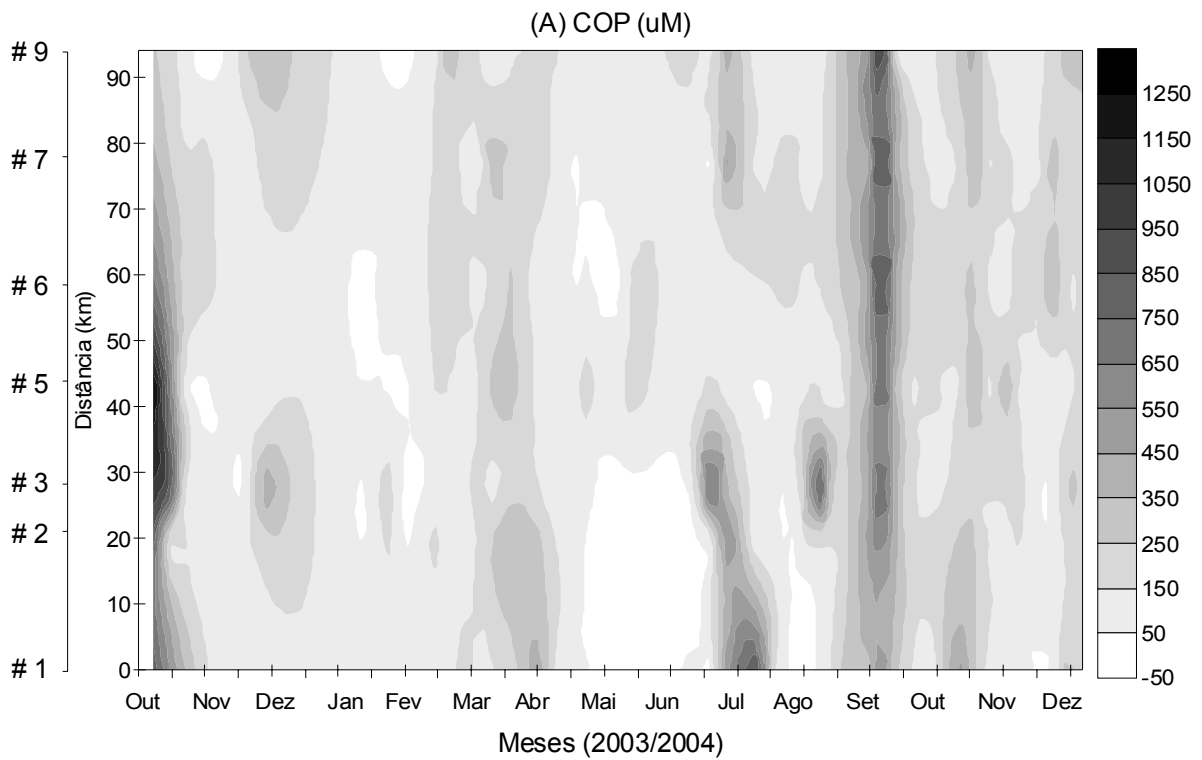
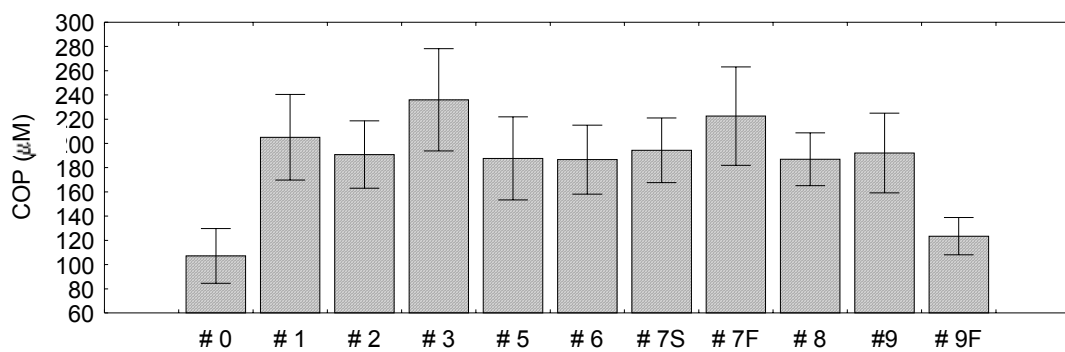


Figura 16: Variação do fosfato (PO_4^{3-}) no estuário do Rio Itajaí-Açu(A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. No período compreendido entre a 2ª quinzena de novembro até o final de janeiro de 2004, não foi feita a determinação do MPS.



(B)



(C)

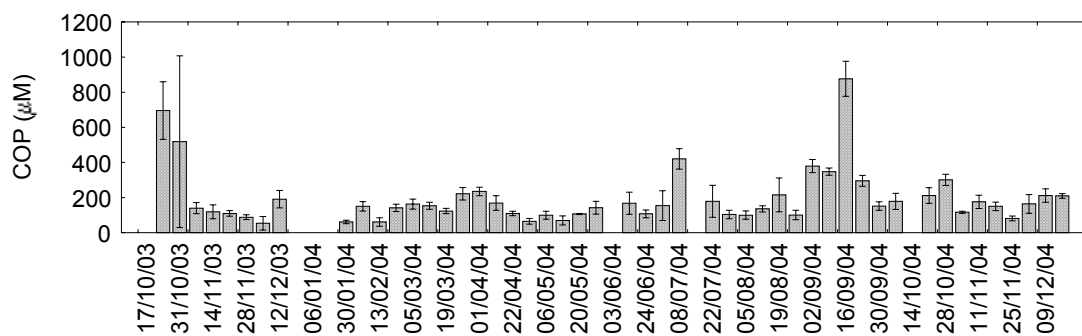


Figura 17: Variação do Carbono Orgânico Particulado (COP) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

4.2.5.2. Fósforo:

O fósforo total (PT) corresponde a todas as formas de fósforo presente na água, incluindo as formas orgânicas e inorgânicas e particulada e dissolvida. O PT apresentou uma média geral de 6,2 μM , variando entre 0,3 e 45,5 μM ao longo de todas as estações amostrais. Espacialmente, não foram observadas grandes diferenças de PT entre as estações amostrais, mas uma pequena diminuição pode ser notada na extremidade estuarina (Figuras 18 a e b). Todas as estações apresentaram concentrações elevadas se comparadas à estação #0 (Figuras 18 b). As maiores concentrações foram registradas nos momentos de alta descarga fluvial. Foi o caso dos meses de dezembro de 2003, julho de 2004 e setembro e outubro de 2004 (Figura 18 a e c). Os aumentos de PT coincidiram com os aumentos de MPS.

Correspondendo à cerca de 17%, em média, do PT, o fósforo orgânico dissolvido (POD) apresentou concentração média de 1,1 μM , variando entre valores próximos a zero e 8,4 μM . O padrão de variação do POD foi o semelhante à variação do PT, temporal e espacialmente (Figuras 19 a, b e c).

4.2.5.3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO):

A DBO é uma variável indicativa da concentração de matéria orgânica em sistemas aquáticos. No período amostrado, a DBO foi monitorada entre abril e dezembro de 2004. Neste período a DBO apresentou uma média geral de 1,9 mg/l, variando entre 0,2 e 6,5 mg/l O_2 . Espacialmente foi observado aumento da DBO entre as estações #2 e #5 (Figuras 20 a e b), correspondendo à influência dos municípios de Blumenau e Gaspar. A variação da DBO, principalmente na extremidade fluvial do estuário, esteve diretamente associada à descarga fluvial, como foi o caso dos aumentos de DBO registrados nos meses de junho e julho e setembro e novembro de 2004 (Figuras 20 a e c).

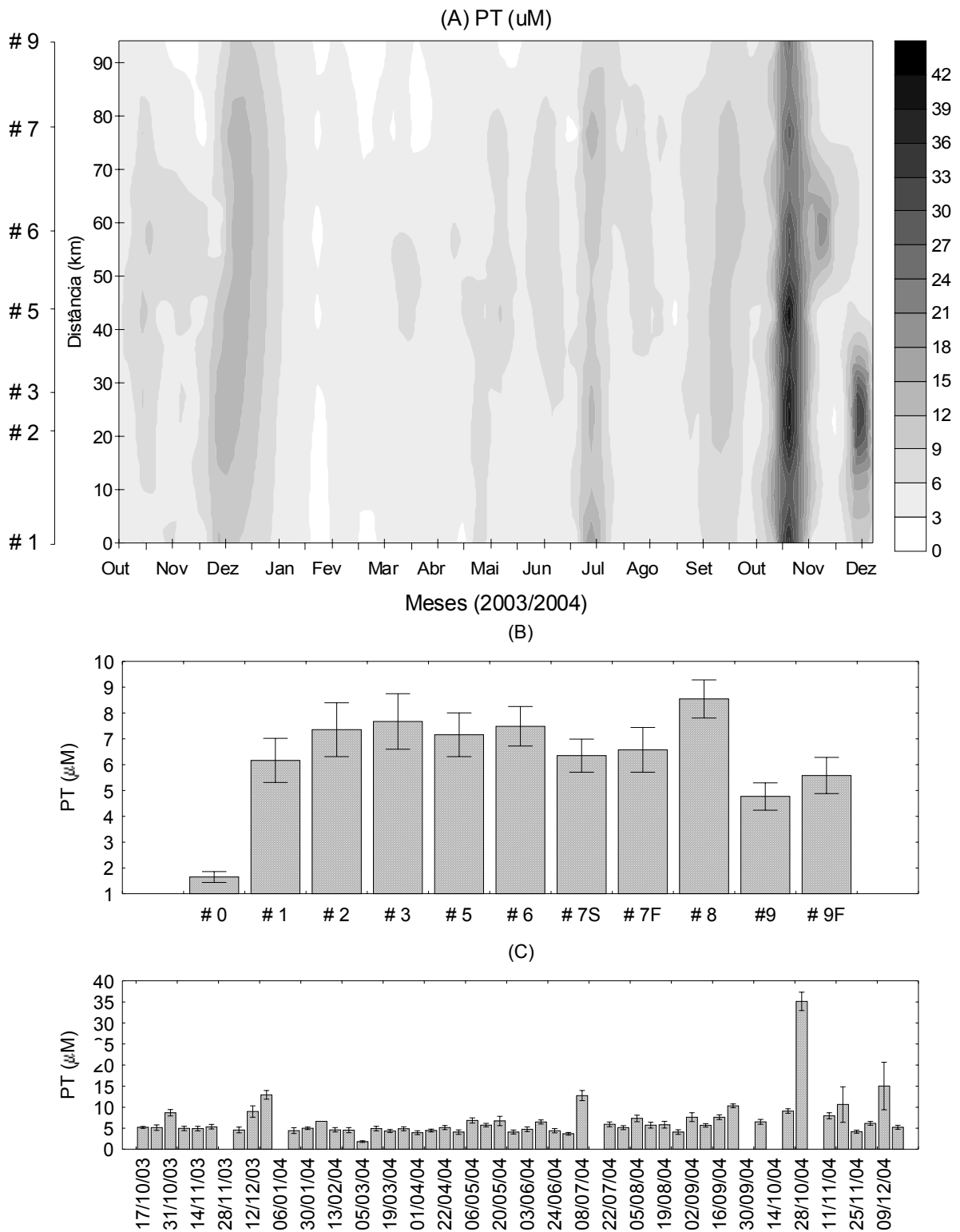


Figura 18: Variação do fósforo total (PT) no estuário do Rio Itajaí-Açu. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

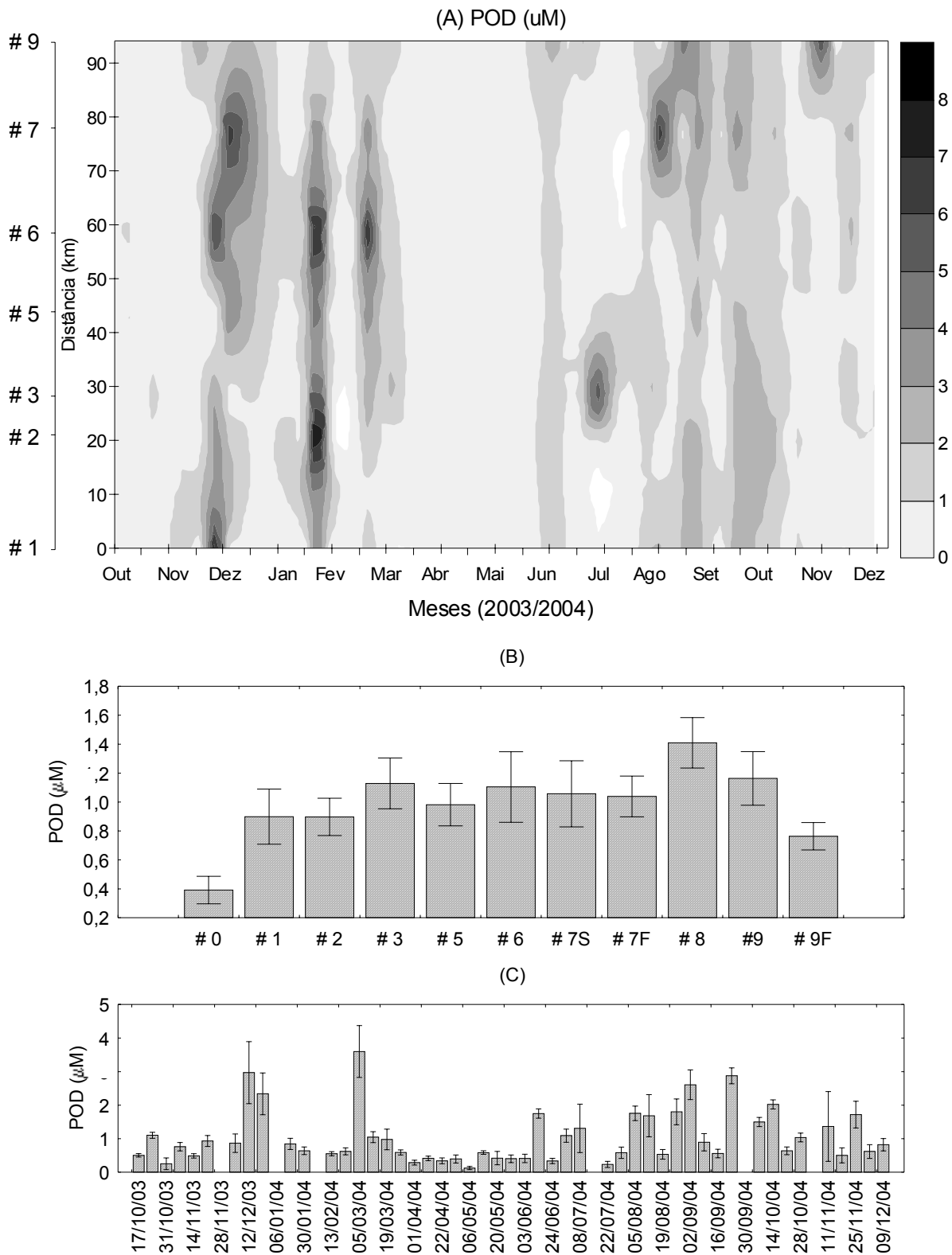


Figura 19: Variação do fósforo orgânico dissolvido (POD) no estuário do Rio Itajaí-Açu. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

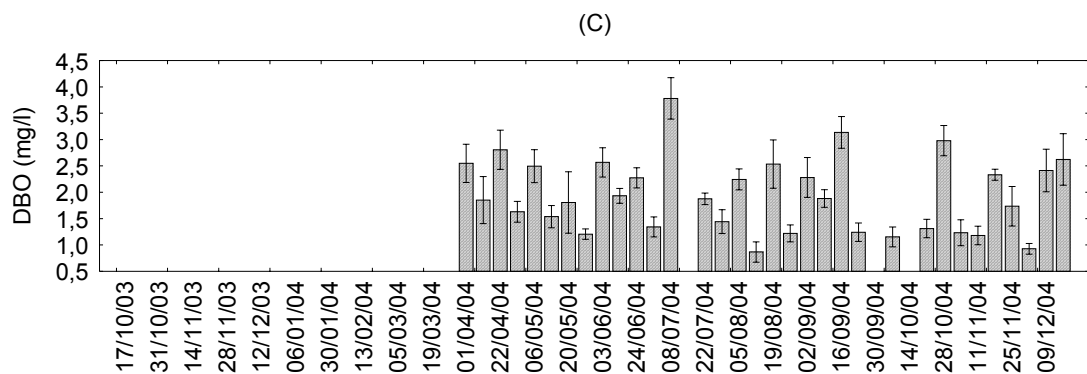
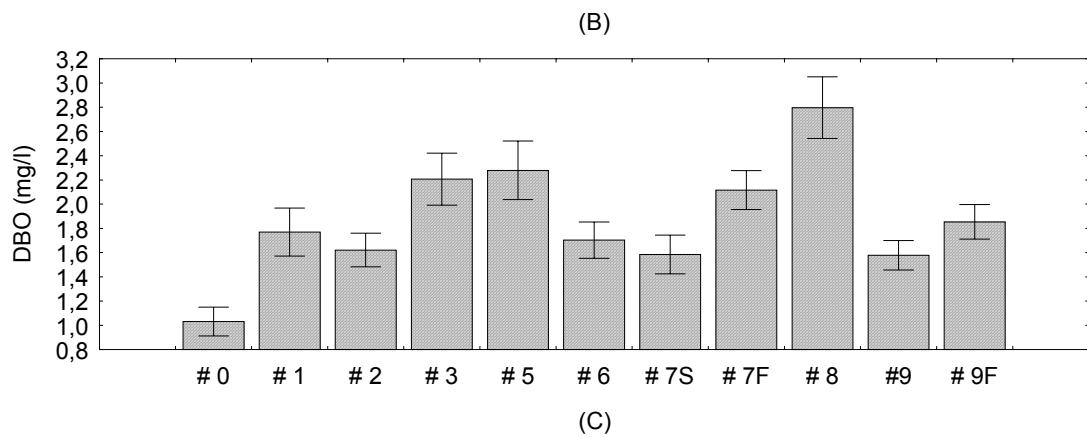
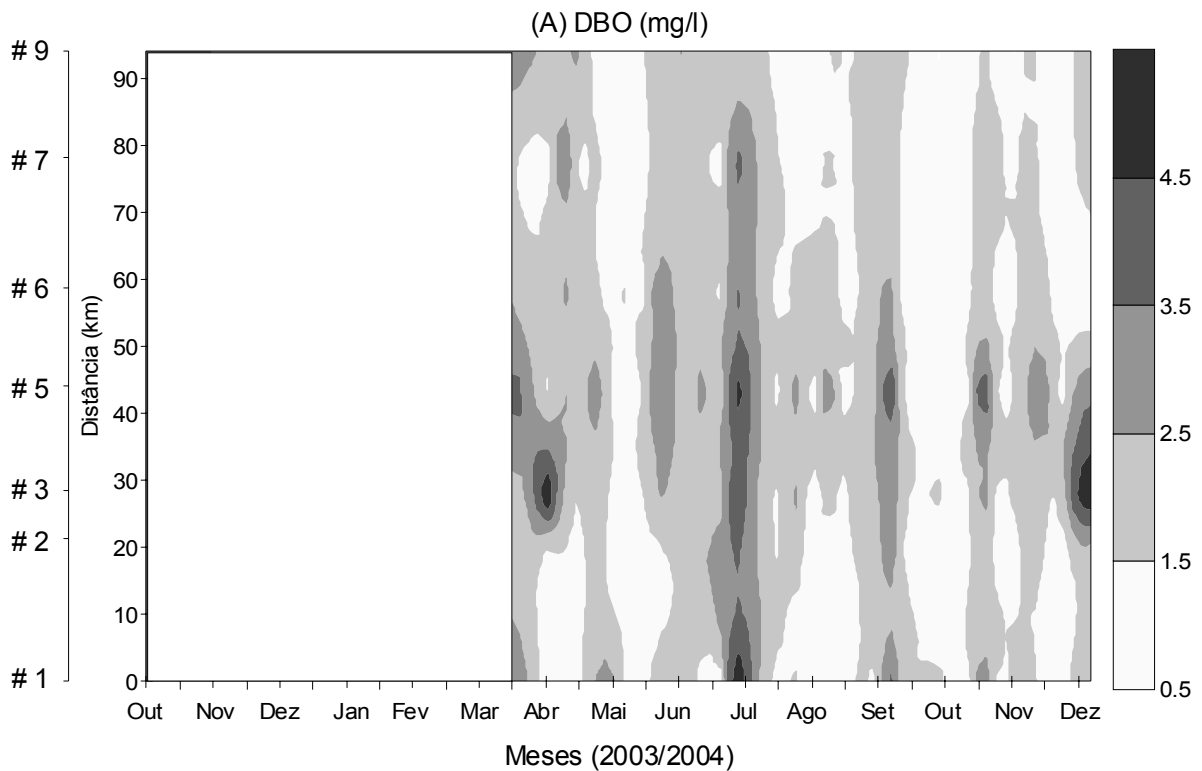


Figura 20: Variação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) no estuário do Rio Itajaí-Açú. (A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário. Dentro do período amostrado, a DBO foi determinada entre abril e dezembro de 2004.

4.2.5.4. Clorofila-a:

A clorofila-a apresentou valores baixos em todo o estuário, durante a maior parte do período de estudo, variando pontualmente entre $< 0,1$ e $16,5\mu\text{g/l}$, com uma média geral de $1,7 \mu\text{g/l}$, mas ficando geralmente abaixo de $2,0 \mu\text{g/l}$ (Figura 21 a). Apenas nas estações situadas próximas à desembocadura do estuário, a clorofila-a apresentou concentrações mais significativas em algumas ocasiões (Figuras 21 a, b e c). A maior delas ocorreu no início de setembro, quando a clorofila atingiu $16,5 \mu\text{g/l}$. Estas baixas concentrações são o resultado da alta turbidez do estuário, resultando em baixa intensidade luminosa em toda a coluna d'água.

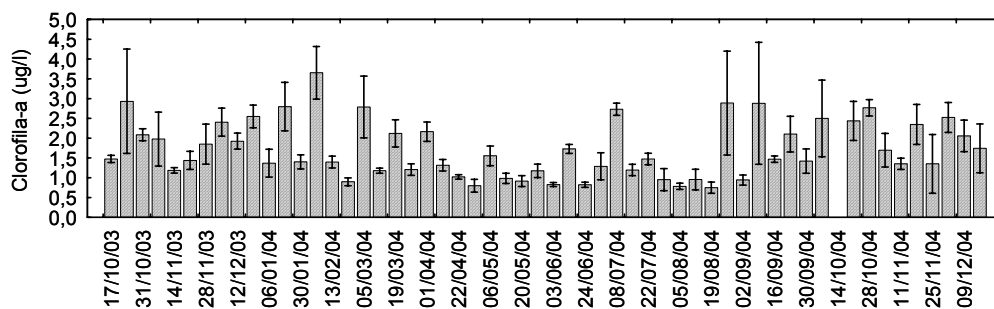
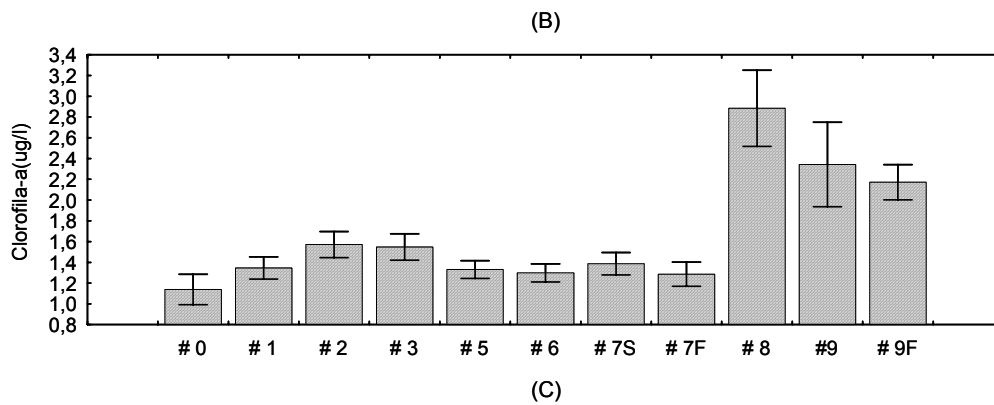
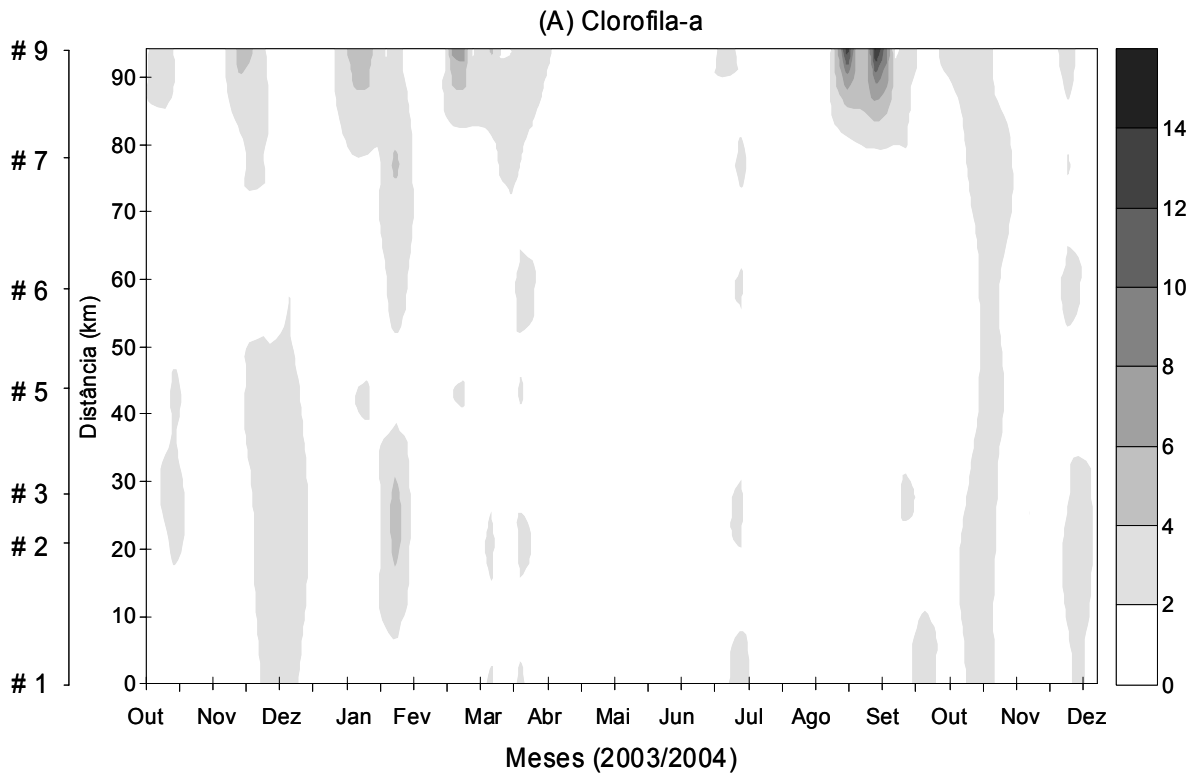


Figura 21: Variação da clorofila-a (Cla-a) no estuário do Rio Itajaí-Açú. ((A) Variação espaço-temporal em superfície. (B) Média geral e Erro Padrão por estação de amostragem, considerando todo o período amostrado (outubro de 2003 a dezembro de 2004). (C) Média e Erro padrão por campanha, considerando todas as estações amostradas no estuário.

4.2.6. Tratamento dos Dados:

4.2.6.1. Variação Espacial:

4.2.6.1.1. Análise de Agrupamento:

Para avaliar a variabilidade espacial das variáveis ao longo do estuário, foi aplicada uma análise de agrupamento sobre os dados médios de todas as variáveis em cada estação de amostragem. A análise, mostrada na forma de um dendrograma (Figura 22), resultou no agrupamento das estações de amostragem cujo comportamento das variáveis monitoradas foi semelhante. Assim, estas estações agrupadas foram tratadas em conjunto, sendo denominadas de compartimentos.

A primeira grande tendência observada é a separação da estação #0 de todos os demais compartimentos. Excluindo-se a estação #0, foram identificados mais 2 agrupamentos de estações, o primeiro formado pelas estações #1, #2, #3, #5 e #6 e o segundo pelas estações #7, #7F, #8, #9 e #9F (Figura 22).

O primeiro agrupamento formado correspondeu à porção fluvial do sistema e foi dividido em 2 subgrupos, um deles incluindo as estações #1 e #2 e o outro as estações #3, #5 e #6 (Figura 22). O primeiro subgrupo, o qual incluiu as estações mais à montante do sistema, correspondeu ao compartimento aqui denominado de Extremidade Fluvial. O segundo sub-grupo, que incluiu as estações #3, #5 e #6, foi chamado de compartimento Alto Estuário.

O segundo grande grupo incluiu as estações mais a jusante do sistema, as quais sofrem influência do efeito da salinidade. Dentro deste grupo a estação #8 foi claramente isolada das demais, correspondendo a um afluente do Rio Itajaí, o Rio Itajaí-Mirim, e foi então chamado de compartimento Itajaí-Mirim. Em seguida foi isolada a estação #9F das demais, correspondendo às amostras de fundo da extremidade estuarina do sistema, as quais sofrem grande influência da água marinha. Este compartimento

corresponde ao Baixo Estuário – Fundo. As amostras de superfície da estação #9 foram em seguida separadas, sendo denominadas de compartimento Baixo Estuário Superfície. Finalmente o subgrupo formado pelas estações #7 e #7F foi chamado de compartimento Médio Estuário. Os subgrupos formados pela análise de agrupamento são mostrados na Tabela 6 e na Figura 22. As denominações de Alto, Médio e Baixo estuário estão de acordo com o proposto por SCHETTINI (2002), baseado na distribuição da salinidade no estuário. As principais características de cada grande grupo foram:

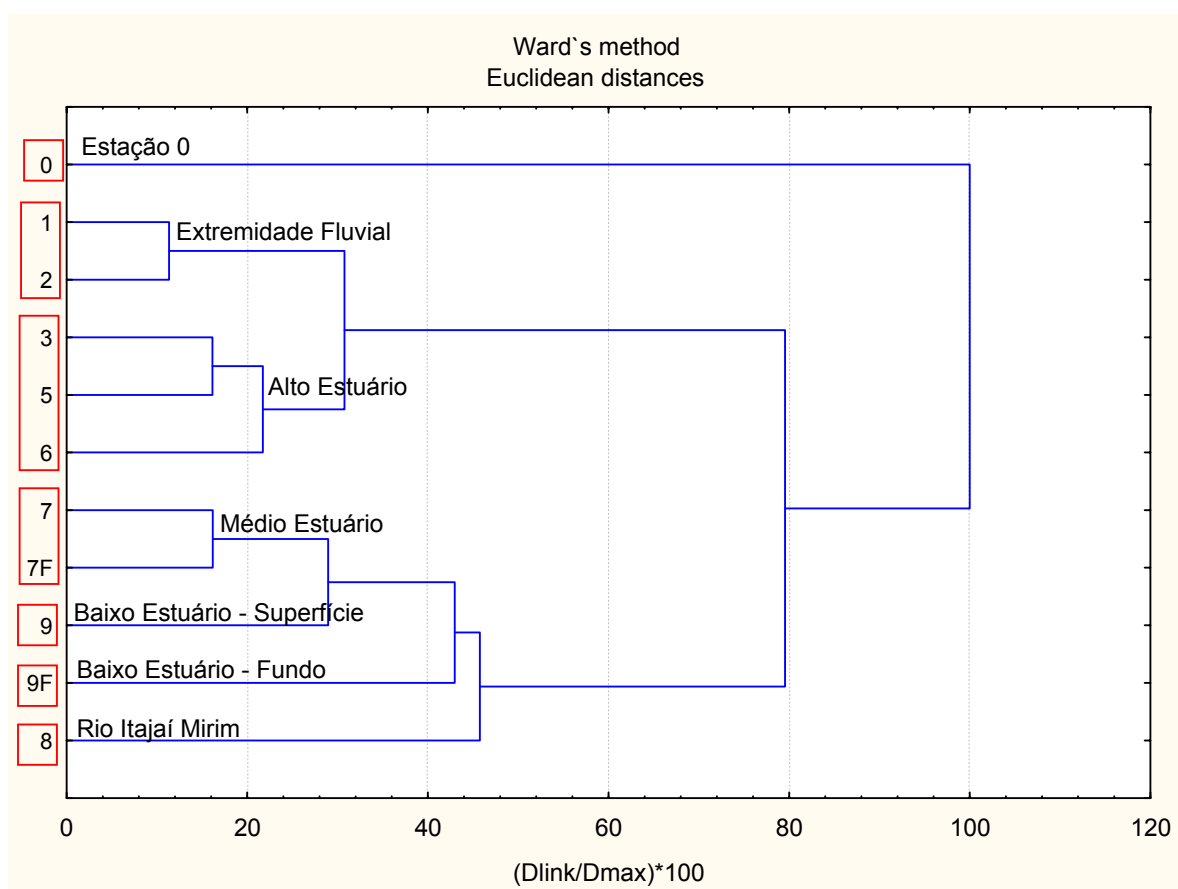


Figura 22: Dendrograma mostrando os agrupamentos formados a partir da análise de agrupamento efetuada sobre as médias das variáveis em cada estação de coleta, no estuário do Rio Itajaí-Açú. As estações agrupadas corresponderam aos compartimentos do estuário, desde sua extremidade fluvial no município de Indaial (estação 1) até a desembocadura (estação 9).

4.2.6.1.1.1. Estação #0: Ponto Branco:

- Altas concentrações de oxigênio dissolvido, geralmente próximos à saturação.
- Baixas concentrações de nutrientes inorgânicos dissolvidos.

- Baixas concentrações de compostos orgânicos, evidenciados pelo COP, DBO, POT e PT.
- Baixas concentrações de MPS e Clorofila-a.

4.2.6.1.1.2. Grupo 2: Extremidade Fluvial e Alto Estuário:

- Sem influência da salinidade.
- pH reduzido.
- Baixa Clorofila-a.
- Altas concentrações de nitrato, fosfato e Silício.
- Maiores concentrações de MPS.

4.2.6.1.1.3. Grupo 3: Médio e Baixo Estuário e Itajaí Mirim:

- Presença de salinidade.
- pH mais elevado.
- Maiores concentrações de Clorofila-a, amônio, nitrito e razão N:P.
- Menores concentrações de oxigênio dissolvido.

Tabela 6: Principais características do compartimentos individualizados pela análise de agrupamento e as estações que foram incluídas em cada compartimento.

Denominação	Estações Correspondentes	Localização
Ponto Branco	Estação #0	Estação de referência situada na região rural de Indaial, em local pouco impactado (Rio Warnow). Ponto Branco da Bacia.
Extremidade Fluvial	Estações #1 e #2	Situadas no curso principal do Rio Itajaí, nos municípios de Indaial e Blumenau, na extremidade fluvial do sistema.
Alto Estuário	Estações #3, #5 e #6	Localizado nos municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota. Recebem influência dos centros urbanos de Blumenau e Gaspar e da região rural destes municípios. Corresponde ao Alto Estuário.
Médio Estuário	Estações #7 e #7F	Localizado em Itajaí, mas antes da influência da região urbana e industrial do município. Corresponde ao Médio Estuário.
Baixo Estuário - Superfície	Estação #9	Localizado próximo à foz do Rio Itajaí, sofrendo influência da entradas de efluentes domésticos e industriais da região de Itajaí. Sofre influência direta da salinidade, correspondendo ao Baixo Estuário.
Baixo Estuário - Fundo	Estação #9F	Localizado próximo à foz do Rio Itajaí, corresponde às água de fundo do estuário, com grande influência marinha, devido à entrada da cunha salina. Corresponde também ao Baixo Estuário.
Rio Itajaí-Mirim	Estação #8	Localizado no Rio Itajaí-Mirim, o principal afluente do Rio Itajaí, na proximidade de sua foz. Recebe influência direta dos aportes da região de Brusque.

4.2.6.1.2. Análise de Ordenação:

Uma análise em componentes principais (ACP) foi aplicada à mesma matriz de dados utilizada na análise de agrupamento. Os eixos fatoriais foram calculados a partir da matriz de correlação r de Pearson entre as variáveis. Foram interpretados os dois primeiros eixos fatoriais da ordenação, explicando 77 % da variância total dos dados. O plano formado pelos eixos fatoriais 1 e 2, mostrando a ordenação das variáveis é mostrado na Figura 23 (modo R). A ordenação das amostras (modo Q) é mostrada na Figura 24.

- Eixo 1:

O primeiro componente foi formado pelas coordenadas positivas da variáveis oxigênio dissolvido (em concentração e saturação) e pH. Na extremidade negativa, aparecem as variáveis POD, POT e PT, temperatura, MPS, NH_4^+ , NO_2^+ , DBO e COP e Si.

A distribuição das amostras ao longo do eixo 1 corroborou o resultado da análise de agrupamento, discriminando a estação #0 na extremidade positiva do eixo, das demais. Ainda do lado positivo, mas mais próximas ao centro, ficaram as estações #1 e #2 e a estação #9F. Na extremidade negativa ficou situada a estação #8, correspondendo ao Rio Itajaí-Mirim, com as estações #3, #5 e #6 e #7 e #7F ficando também do lado negativo, próximas ao centro.

Este primeiro eixo ilustra a grande diferença das características da estação #0 em relação as demais estações de coleta do estudo. Ele reflete assim a variação da qualidade da água ao longo do estuário, com a estação #0 apresentando elevados valores de oxigênio dissolvido e os menores valores de material orgânico (POT, POT, DBO, COP), de material particulado (MPS, PT) e de nutrientes e as menores temperaturas. Em

oposição ficou a estação #8 (Rio Itajaí-Mirim) com os piores indicativos de qualidade de água do estudo. As demais estações se posicionaram entre estes dois extremos.

- Eixo 2:

O segundo eixo foi ligado positivamente à salinidade, pH, clorofila, nitrito, amônio e razão N:P. Na extremidade negativa ficaram o oxigênio dissolvido, fosfato, nitrato e Si.

Com relação às estações de coleta, novamente a estrutura verificada na análise de agrupamento se repetiu, com as estações referentes à extremidade fluvial do Rio Itajaí (#1 e #2) e Alto Estuário (#3, #5 e #6) ficando no lado negativo do eixo. Já as estações do Médio Estuário (estação #7 e #7F), Itajaí-Mirim (estação #8) e Baixo Estuário ficaram do lado positivo. Este eixo reflete, portanto a influência progressiva da salinidade, a medida em que as estações se aproximam da foz do estuário, com aumento da salinidade, pH e clorofila-a e diminuição do Si, nitrato e fosfato. Ao contrário, o amônio e nitrito tenderam a aumentar no Baixo estuário e Rio Itajaí Mirim, ficando do lado positivo do eixo.

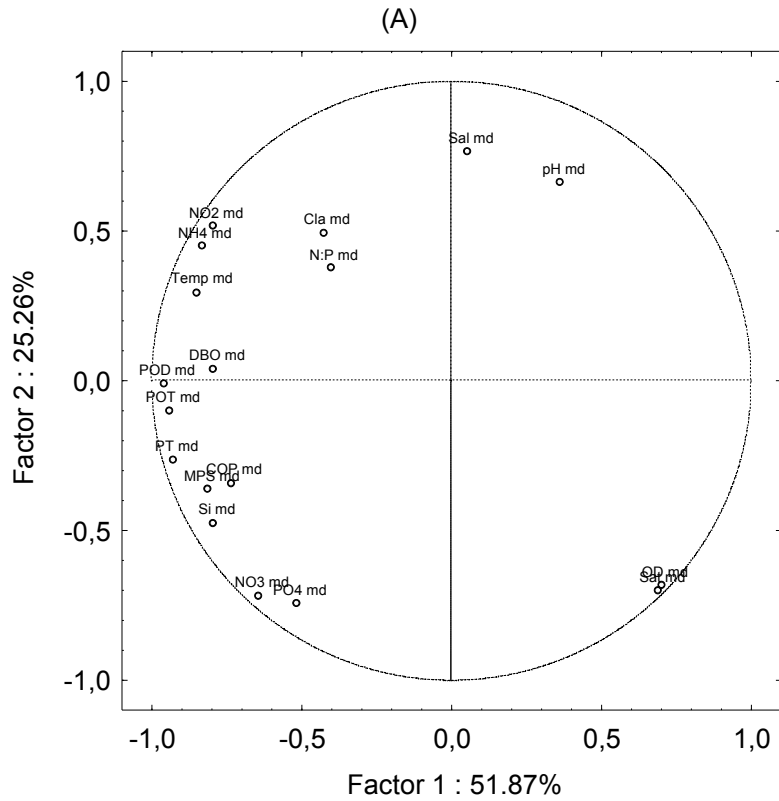


Figura 23: Plano formado pelos eixos 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias espaciais, mostrando as variáveis (modo R).

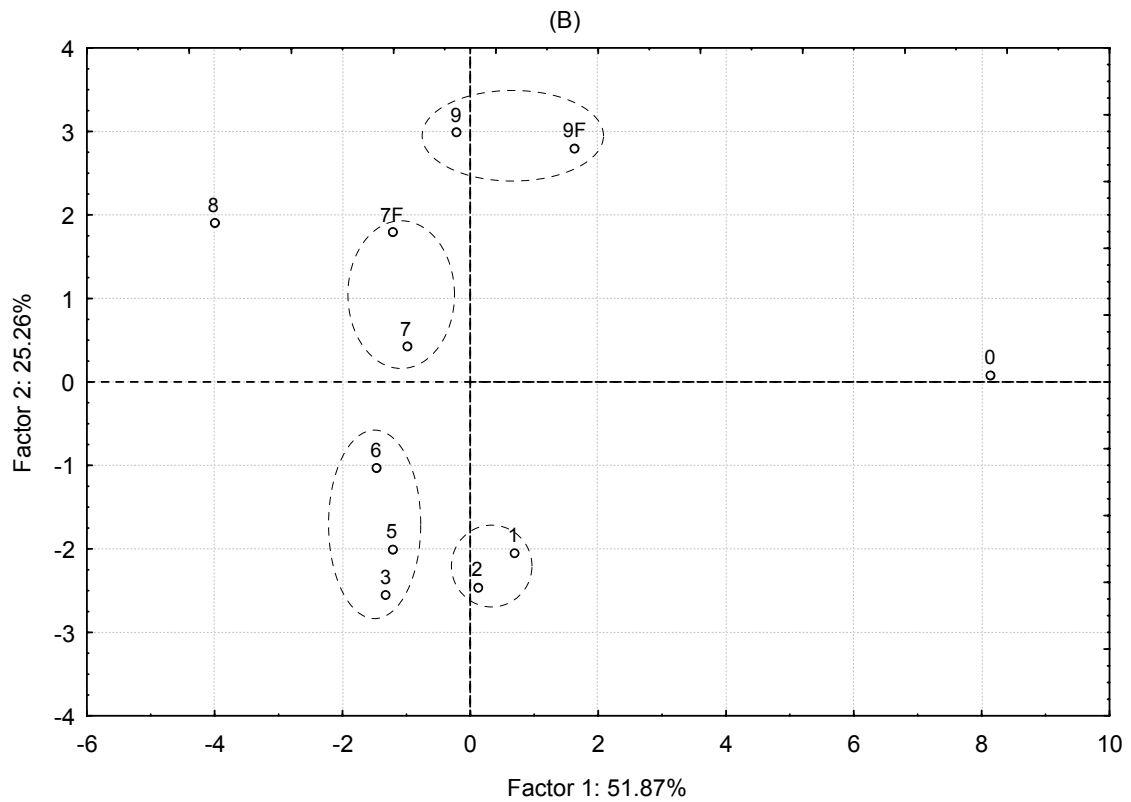


Figura 24: Plano formado pelos eixos 1 e 2 do ACP efetuada sobre as médias espaciais, mostrando as estações amostrais (modo Q). As elipses ilustram as associações encontradas na análise de agrupamento.

4.2.6.2. Variação Temporal:

4.2.6.2.1. Análise de Agrupamento:

Para avaliar a variabilidade temporal das variáveis ao longo do estuário, a análise de agrupamento foi também aplicada sobre as médias temporais das variáveis em cada campanha, com o objetivo de determinar períodos de comportamento semelhante do ambiente. A divisão dos períodos foi claramente influenciada pela descarga fluvial. Assim, para a realização desta análise, as datas das amostragens realizadas após grandes picos de descarga fluvial foram descartadas e foram consideradas como um grupo à parte. Esta exclusão foi feita baseada em uma análise prévia, onde os dias 16 de setembro, 14 de outubro e 28 de outubro de 2004 apresentaram comportamento muito diferenciado dos demais períodos. Nestas situações, a descarga fluvial atingiu valores superiores a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, caracterizando situações atípicas dentro do período amostrado. O resultado, apresentado na forma de um dendrograma (Figura 25), separou inicialmente os dados em dois agrupamentos. O primeiro foi formado pelas amostragens realizadas do início do estudo até o final de abril, mais o final de agosto e início de setembro de 2004. O segundo correspondeu, aproximadamente, à segunda metade do período amostral, de maio a dezembro de 2004. Cada agrupamento foi dividido em 2 subgrupos, resultando em um total de 4 subgrupos (além das datas previamente excluídas), correspondendo a períodos consecutivos de tempo.

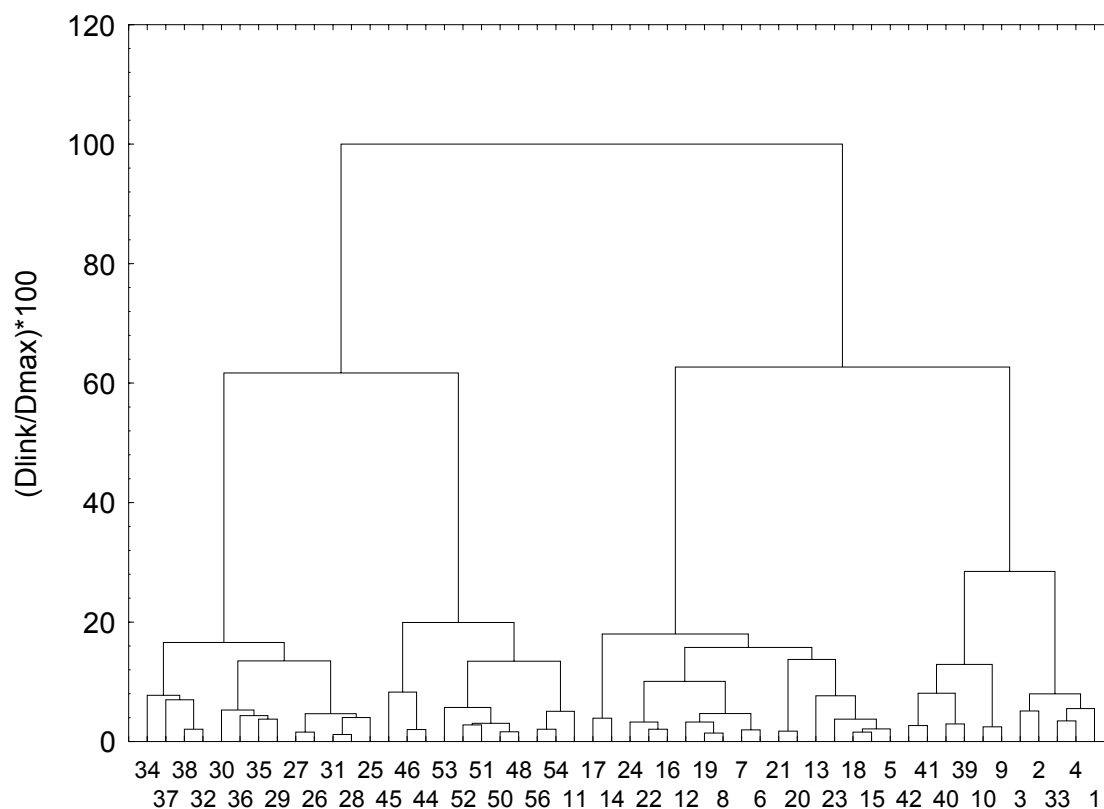


Figura 25: Dendrograma resultado da análise de agrupamento feita sobre as médias temporais, resultando na formação dos 4 agrupamentos que correspondem a 4 períodos. Cada código corresponde a uma campanha de amostragem, as quais foram numeradas em ordem cronológica. A primeira campanha (17/10/03) corresponde ao código 1 e assim sucessivamente (anexo 8).

O primeiro período agrupado correspondeu aos meses de outubro de 2003 e final de agosto e início de setembro de 2004, além dos dias 12 e 19 de dezembro de 2003. O segundo período correspondeu aos meses de novembro de 2003 a abril de 2004, mas com interrupções em dezembro e janeiro, devido ao aumento da descarga fluvial registrado neste período. O terceiro período foi formado pelos meses de maio até o início de agosto de 2004 e o último grupo foi formado pelos meses de setembro a dezembro de 2004. Os períodos agrupados pela análise de agrupamento são mostrados na Tabela 7. A Figura 26 mostra a variação da descarga fluvial em Indaial e os períodos agrupados.

Tabela 7 : Períodos com diferentes classes de descarga fluvial, separados pela análise de agrupamento.

Sub-grupos	Período	Descarga Fluvial (m³/s) Média ± E.P (n)	Características
1	Out. 2003 e Set. 2004	191 ± 47 (17)	Período de elevação de temperatura e de descarga intermediária,
2	Nov. 2003 a Abril 2004	97 ± 9,1 (11)	Baixa descarga fluvial, temperatura elevada, baixos valores de nitrito e oxigênio dissolvido.
3	Mai 2004 a Ago. 2004	157 ± 26 (13)	Descarga intermediária, temperatura baixa
4	Set. 2004 a Dez. 2004	228 ± 24 (12)	Período de descarga mais elevada, pós-picos de descarga, temperatura baixa
5	15 Set.; 14 Out. E 28 Out.2004	955 ±190 (3)	Picos de descarga

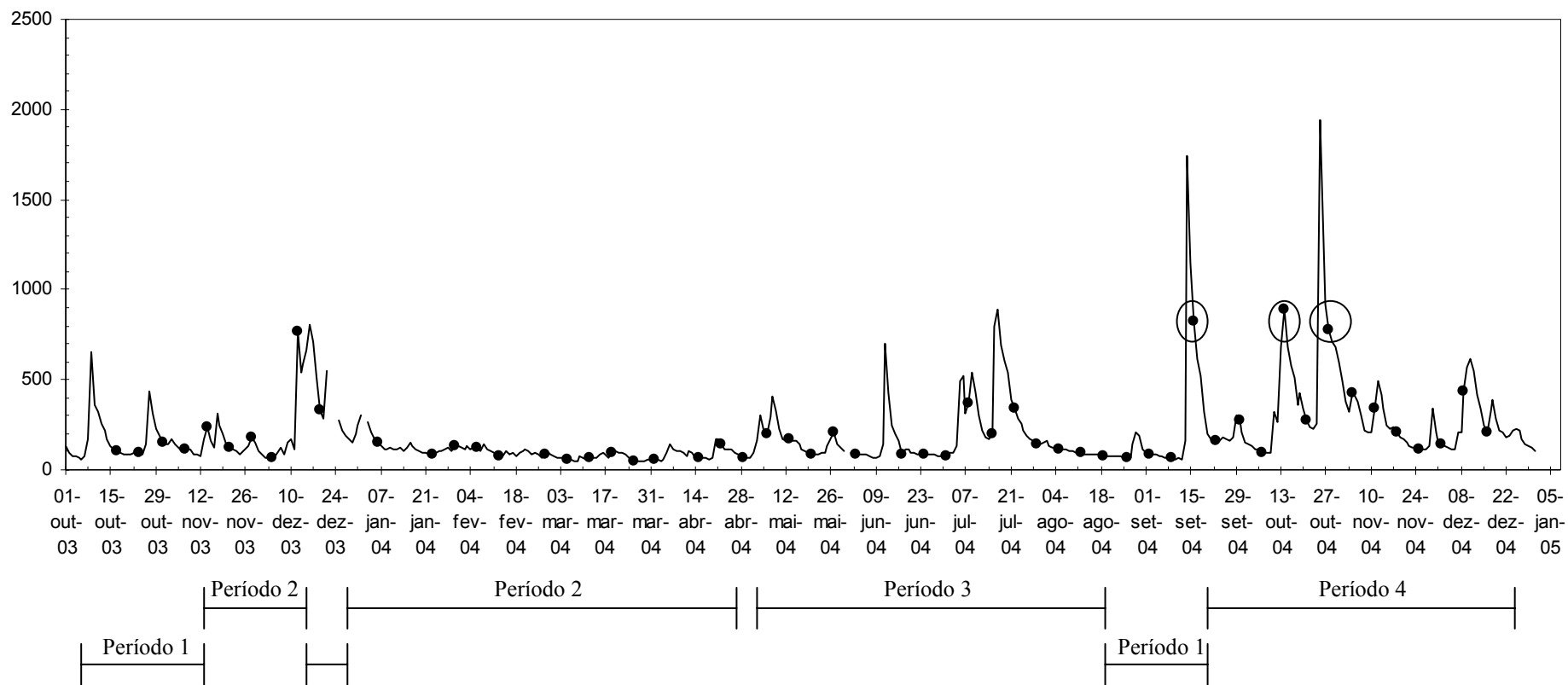


Figura 26: Variação da descarga fluvial (m^3/s) mostrando os períodos individualizados pela análise de agrupamento. As elipses mostram as datas previamente excluídas.

4.2.6.2.2. Análise de Ordenação:

Uma análise em componentes principais também foi aplicada à matriz de dados utilizada na análise de agrupamento para avaliação da variabilidade temporal das características estuarinas. O plano formado pelos eixos fatoriais 1 e 2, mostrando a ordenação das variáveis é apresentado na Figura 27. A ordenação das amostras (modo Q) é apresentada na Figura 28.

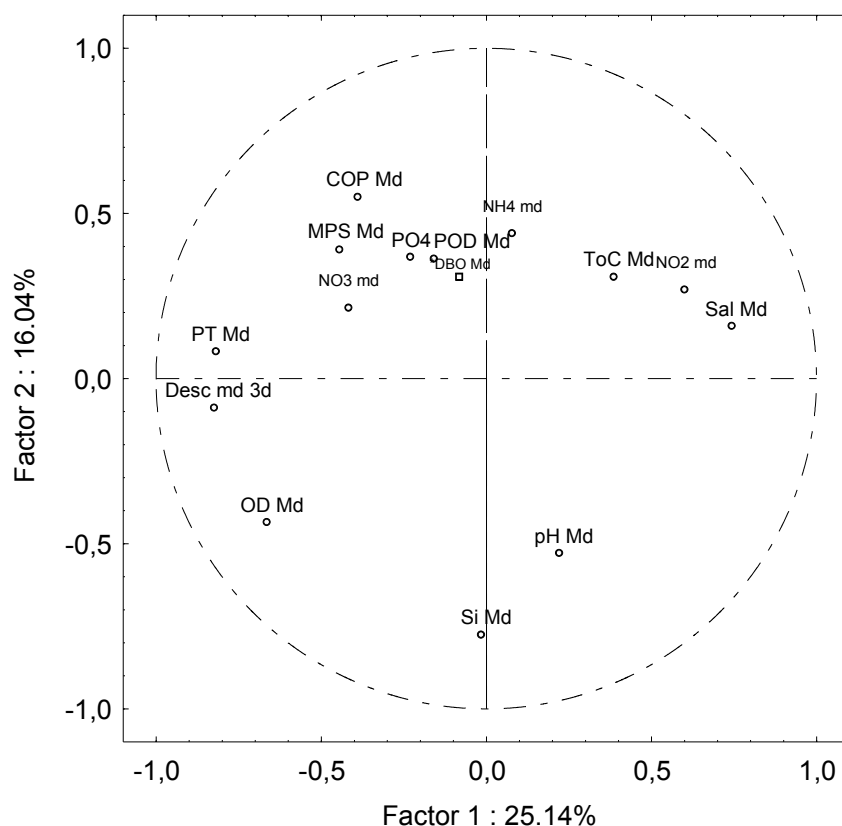


Figura 27: Plano formado pelos componentes 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias temporais, mostrando a ordenação das variáveis (modo R).

O primeiro componente foi formado pelas coordenadas positivas das variáveis salinidade, NO_2^- e temperatura. Na extremidade negativa, apareceram as variáveis descarga fluvial, fósforo total (PT), oxigênio dissolvido (OD) e em seguida MPS, NO_3^- e COP. O segundo eixo foi ligado positivamente ao COP, NH_4^+ , MPS, PO_4^{3-} POD e temperatura. Na extremidade negativa ficaram o Si, pH e OD.

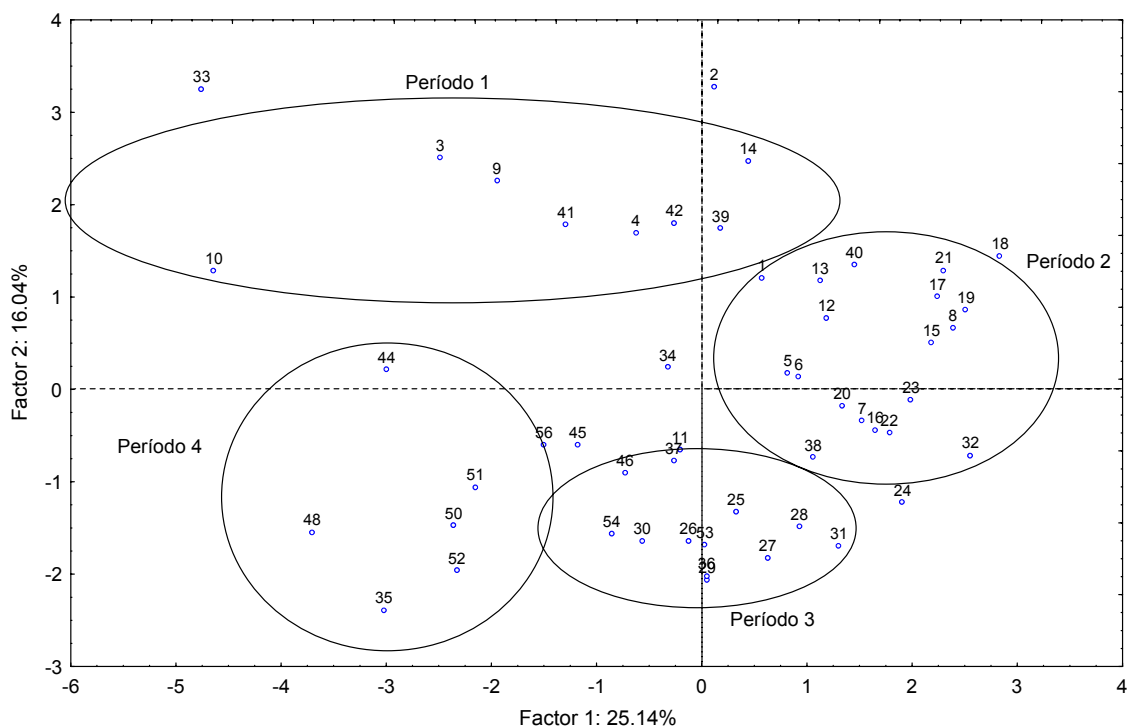


Figura 28: Plano formado pelos eixos 1 e 2 da ACP efetuada sobre as médias temporais. As elipses mostram os agrupamentos formados pela análise de agrupamento. Cada código corresponde a uma campanha de amostragem, as quais foram numeradas em ordem cronológica. A primeira campanha (17/10/03) corresponde ao código 1 e assim sucessivamente (anexo 8).

A distribuição das amostras ao longo do plano fatorial formado pelos eixos 1 e 2 corroborou o resultado da análise de agrupamento, individualizando os períodos agrupados anteriormente. O eixo 1 separou as amostras formadas pelos períodos 2 e 3 (lado positivo) e 1 e 4 (extremidade negativa). No eixo 2, as amostras dos grupos 1 e 2 foram localizadas na extremidade positiva. Em oposição, no lado negativo, foram plotadas as amostras referentes aos períodos 3 e 4 (Figuras 27 e 28). O eixo 2 mostrou o que os grupos 1 e 2 apresentaram maiores valores de COP, NH₄ e MPS e baixos valores de Si e pH, em oposição aos grupos 3 e 4.

4.3. Balanço de Massa:

Para a determinação do balanço de massa, o estuário foi dividido em compartimentos, considerando as análises desenvolvidas previamente. O balanço foi

calculado para o setor terminal do estuário, correspondendo ao médio e baixo estuário e a região costeira. O balanço foi feito de acordo com a metodologia proposta pelo LOICZ (*Land Ocean Interactions in the Coastal Zone*), descrito por Gordon *et al.* (1996).

Para determinação do balanço de massa, o baixo estuário foi delimitado como os 8,5 km finais do estuário, caracterizados pela estação #9. O médio estuário foi delimitado como a região compreendida entre o baixo estuário até cerca de 27,5 km a montante da desembocadura (foi considerado como limite, a média da distância entre as estações #6 e #7), sendo caracterizado pela estação #7. O alto estuário foi caracterizado pelas estações #3, #5 e #6, conforme separação determinada pela análise estatística. A Tabela 8 mostra um resumo das principais dimensões adotadas para cada compartimento do estuário. Estas dimensões foram baseadas na descrição fisiográfica do estuário do Itajaí, feita por Schettini (2002).

Tabela 8: Dimensões dos compartimentos do estuário utilizadas para o cálculo do balanço de massa.

Compartimento	Extensão (km)	Largura Média (m)	Profundidade Média (m)	Área de Lâmina d'água (km ²)	Volume (x 10 ⁶ m ³)
Alto Estuário	48	150	7	7,20	50,4
Médio Estuário	19	150	7	2,85	19,6
Baixo Estuário	8,5	225	7	1,91	13,4

Em função da inexistência dos dados de descarga fluvial para o Rio Itajaí-Mirim para o período estudado, os dados foram estimados a partir da descarga fluvial do Rio Itajaí-Açu, obtidos em Indaial. Esta estimativa foi feita a partir de modelo proposto por Schettini (2005), que relaciona a descarga de ambos os rios com um coeficiente de explicação (r^2) de 0,69.

O balanço de massa foi calculado para o fosfato e nutrientes nitrogenados, que estão diretamente relacionados às transformações da matéria orgânica no sistema. O

cálculo foi feito para os dois períodos extremos do ambiente, correspondendo aos períodos de baixa e de alta descarga fluvial, com o objetivo de avaliar como as transformações de nutrientes são influenciadas pelos períodos extremos de vazão. Estes dois períodos também foram selecionados em função das médias da descarga fluvial, em ambos os casos, terem apresentado baixos valores de dispersão (Tabela 7), de modo que o valor médio, usado no cálculo do balanço, representou bem a descarga do período. Nos períodos 1 e 3, ao contrário, a descarga fluvial apresentou alta variabilidade, sugerindo que o sistema estava passando por mudanças, não estando em *Steady State*.

Além dos balanços de nitrogênio e fósforo calculados para os períodos 2 e 4, também foi feito o cálculo do balanço para o silício no período 1, que correspondeu ao período de início do ciclo do cultivo do arroz irrigado na região. Embora a descarga tenha apresentado alta variabilidade neste período, o balanço do silício foi determinado para avaliar um possível efeito da rizicultura irrigada sobre a dinâmica do silício no estuário, já que as concentrações deste nutriente apresentaram diminuição neste período.

4.3.1. Período 1: O início do ciclo da rizicultura

O período 1 compreendeu os meses de outubro de 2003 e setembro de 2004, correspondendo ao início do ciclo da rizicultura irrigada na região. A descarga fluvial média no período foi de $170 \text{ m}^3/\text{s}$, apresentando no entanto, alta variabilidade, com valores mínimo e máximo de 68 e $517 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. O balanço de água e sal para o período 1, é mostrado na Figura 29. A partir da determinação dos balanços de água e sal, foi determinado o balanço de silício, mostrado na Figura 30.

Balço de Água e Sal: Período 1

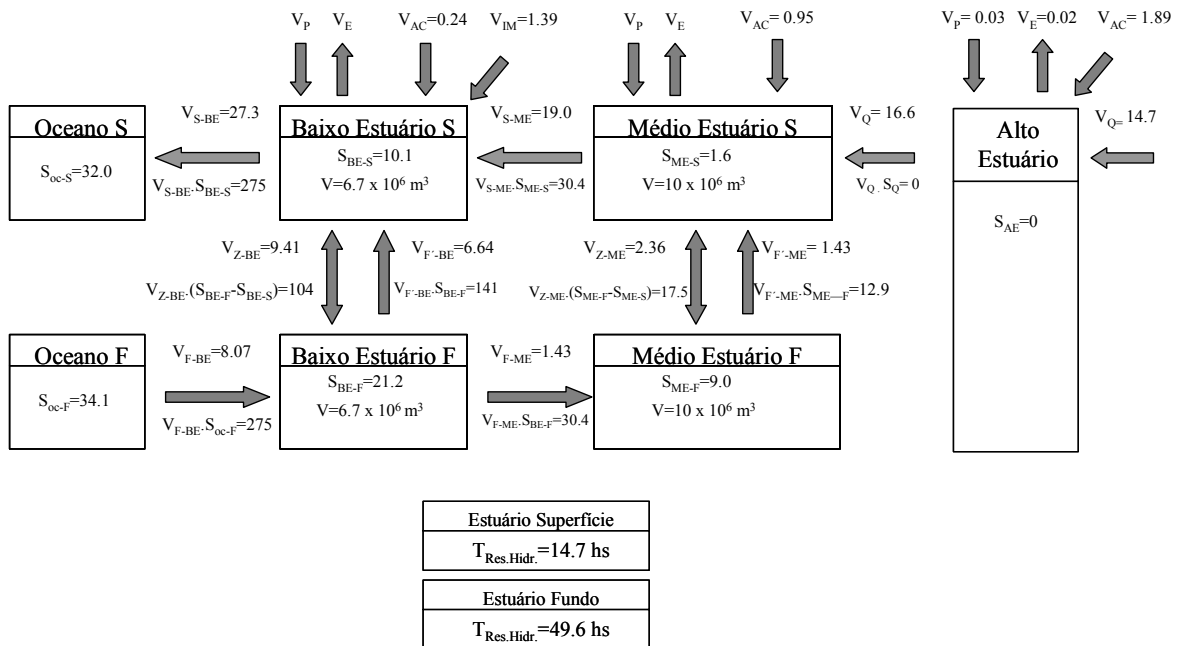


Figura 29: Balço de água e sal no período 1 (setembro de 2003 e outubro de 2004), com descarga fluvial média de $170.4 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V, em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) e sal ($V * S$, em 10^6 kg/d) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{Res.Hidr.}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores.

Balanco de Si: Período 1

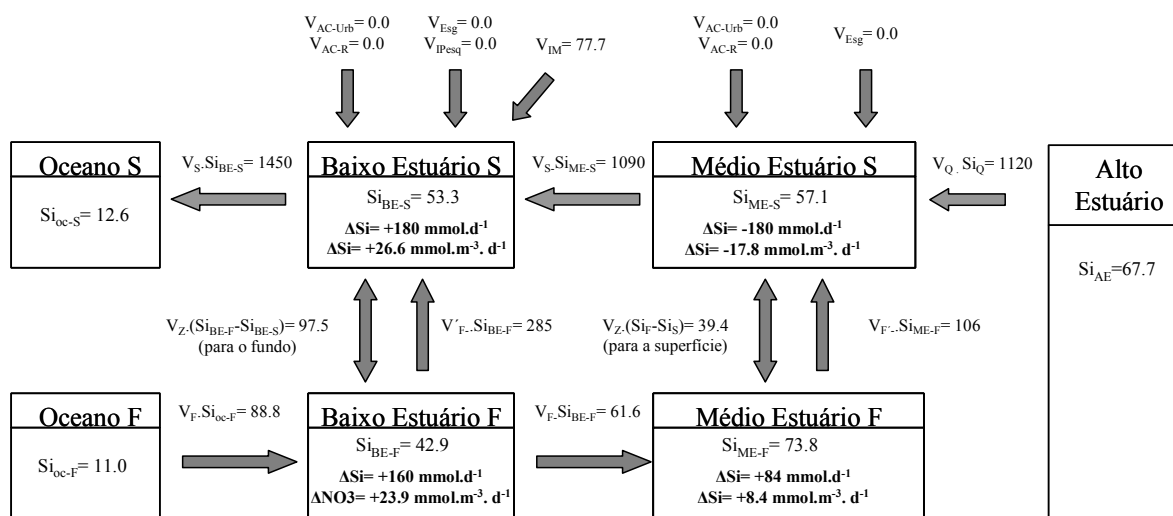


Figura 30: Balanço de silício no período 1 (setembro de 2003 e outubro de 2004), período marcado pelo início do ciclo da rizicultura irrigada na região, com descarga fluvial média de $170.4 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de silício (Si em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de silício a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot Si_Q$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot Si_{\text{compartimento}}$, em $10^6 \text{ mmol}/\text{d}$) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de silício devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (Si_{\text{entra}} - Si_{\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de silício (ΔSi). ΔSi positivo significa que houve aumento do Si , devido a processos internos no sistema; já ΔSi negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de silício no sistema.

4.3.2. Período 2: Baixa descarga Fluvial

O período 2 correspondeu aos meses de novembro de 2003 a abril de 2004, com uma descarga fluvial média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$, em Indaial. Os balanços de água e sal, calculados para o período são mostrados na Figura 31. A partir da determinação dos balanços de água e sal, foram determinados os balanços de fosfato, amônio, nitrito, nitrato, os quais são mostrados nas Figuras 32, 33, 34 e 35, respectivamente. Os valores dos fluxos de água e nutrientes no período de baixa descarga, considerando o médio e baixo estuário, juntos, são mostrados na Tabela 9.

Balço de Água e Sal: Período 2

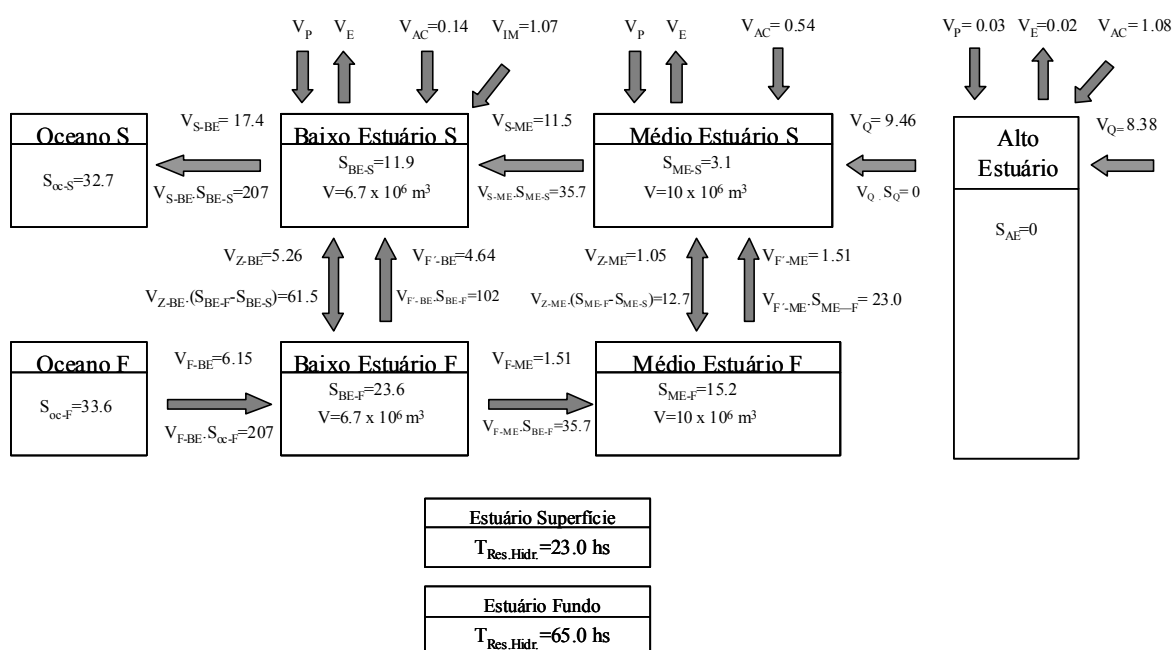


Figura 31: Balço de água e sal no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004) com descarga fluvial média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo ao período de menor descarga ao longo do período estudado. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V , em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) e sal ($V \cdot S$, em $10^6 \text{ kg}/\text{d}$) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{Res.Hidr.}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores.

Balanco de PO_4^{3-} : Período 2

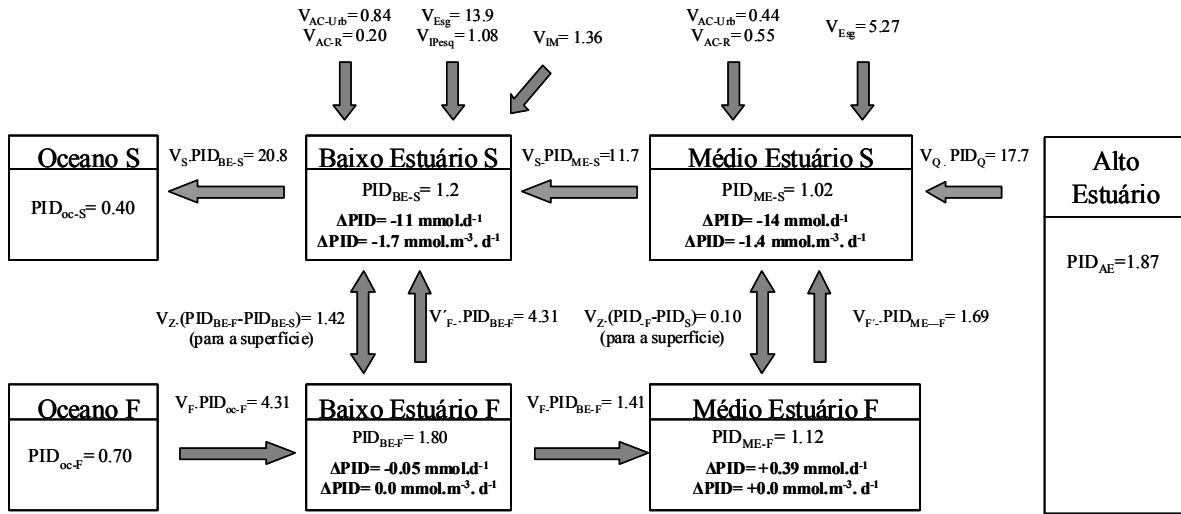


Figura 32: Balanço de fósforo (PID) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As concentrações médias de fósforo (PID em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de fósforo a partir da descarga fluvial ($V_{\text{Q}} \cdot \text{PID}_{\text{Q}}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot \text{PID}_{\text{compartimento}}$, em 10^6 mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de fósforo (10^6 mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de fósforo devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_{\text{Z}} \cdot (\text{PID}_{\text{entra}} - \text{PID}_{\text{saí}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de fósforo (ΔPID). ΔPID positivo significa que houve aumento do fósforo, devido a processos internos no sistema; já ΔPID negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de fósforo no sistema.

Balço de NH_4^+ : Período 2

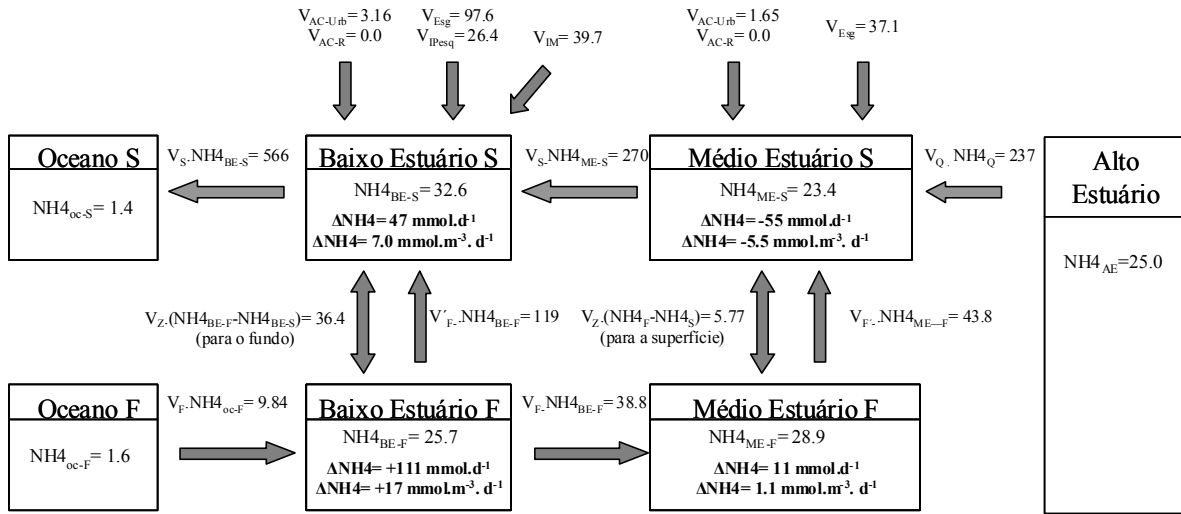


Figura 33: Balço de amônio (NH_4) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As concentrações médias de amônio (NH_4 em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de amônio a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot \text{NH}_{4Q}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot \text{NH}_{4\text{compartimento}}$, em 10^6 mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de amônio (10^6 mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana (V_{AC-Urb}) e rural (V_{AC-R}) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de amônio devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (\text{NH}_{4\text{entra}} - \text{NH}_{4\text{saí}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de amônio (ΔNH_4). ΔNH_4 positivo significa que houve aumento do amônio, devido a processos internos no sistema; já ΔNH_4 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NH_4 no sistema.

Balço de NO₂⁻: Período 2

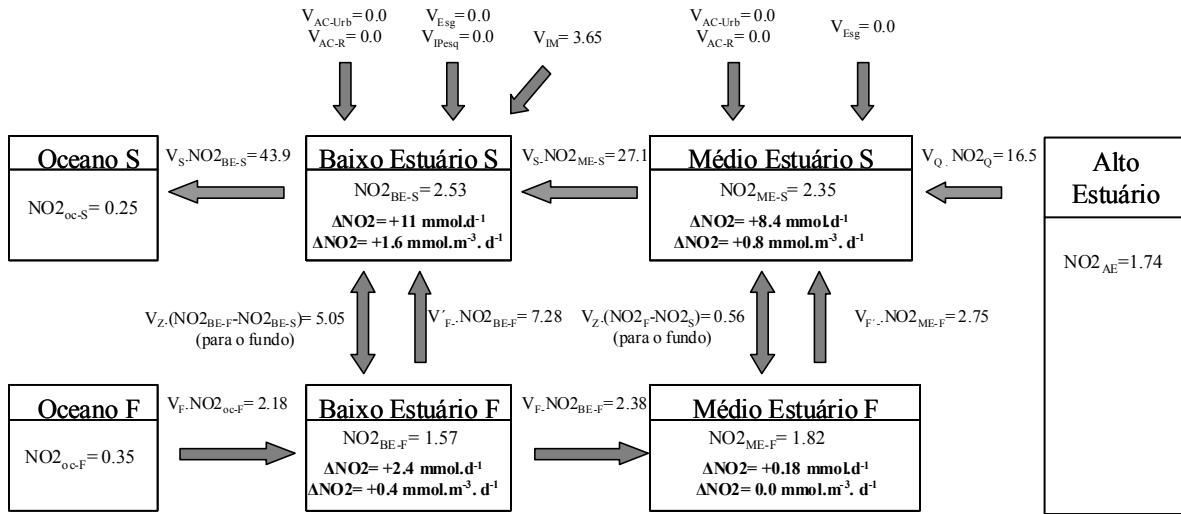


Figura 34: Balço de nitrito (NO₂) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As concentrações médias de nitrito (NO₂ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial (V_Q*NO₂_Q, em mmol/d), do Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}) e entre os compartimentos (V_{compartimento} * NO₂_{compartimento}, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo (V_Z*(NO₂_{entra}-NO₂_{sai})). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO₂). ΔNO₂ positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO₂ negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₂ no sistema.

Balço de NO₃⁻: Período 2

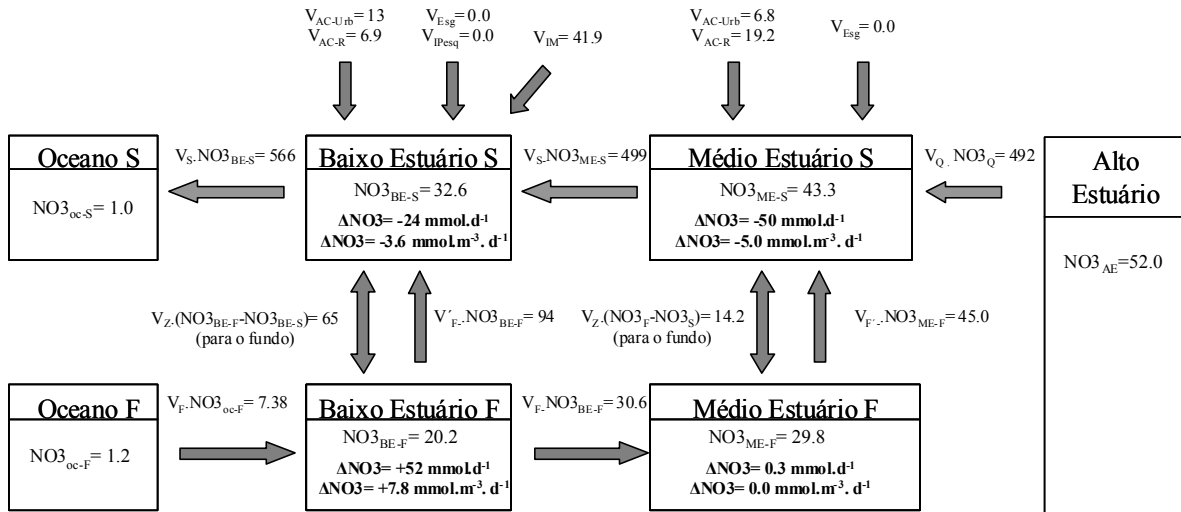


Figura 35: Balço de nitrito (NO₃) no período 2 (novembro de 2003 a abril de 2004), período marcado pela baixa descarga fluvial, com média de 97 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrito (NO₃ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial (V_Q*NO₃_Q, em mmol/d) e entre os compartimentos (V_{compartimento} * NO₃_{compartimento}, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de nitrito (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana (V_{AC-Urb}) e rural (V_{AC-R}) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo (V_Z*(NO₃_{entra}-NO₃_{saí})). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO₃). ΔNO₃ positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO₃ negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₃ no sistema.

Tabela 9: Fluxos de água e nutrientes para a porção terminal do estuário do Itajaí (médio e baixo estuário) no período de baixa descarga fluvial (período 2, descarga fluvial = 97 m³/s). Valores positivos representam entrada para o estuário e negativos saída. A partir dos fluxos entrada e saída de água e nutrientes, foi determinado o balanço de massa para os nutrientes (Δ), mostrando que o sistema representou uma fonte (Δ positivo) ou sumidouro (Δ negativo) do nutriente.

Período 2: Descarga Fluvial = 97 m ³ /s	Água 10 ⁶ m ³ /d	P-PO ₄ 10 ⁶ mmol/d	N-NH ₄ 10 ⁶ mmol/d	N-NO ₂ 10 ⁶ mmol/d	N-NO ₃ 10 ⁶ mmol/d
Descarga Fluvial (V _Q)	9,46	17,7	237	16,5	492
Escoamento Superficial (V _{AC})	0,68	2,0	4,8		45,9
Rio Itajaí Mirim (V _{IM})	1,1	1,4	40	3,7	41,9
Esgoto Doméstico (V _{Esg})		19,2	135		
Indústria Pesq. (V _{IPesq})		1,1	26,4		
Intrusão Água do Mar (V _F)	6,15	4,3	9,8	2,2	7,4
Σ Entradas	17,4	45,7	453	22,4	587,2
Saída Advectiva p/ Zona Costeira (V _s)	-17,4	-20,8	-566	-44	-566
Variação Não Conservativa (Δ)		-24,9	+113	+21,6	-21,7
Fluxo Residual para Zona Costeira	-11,2	-16,5	-556	-42	-558,6

4.3.3. Período 4: Descarga elevada

O período 4 correspondeu aos meses de setembro a dezembro de 2004, com uma descarga fluvial média de $228 \text{ m}^3/\text{s}$, em Indaial. Os fluxos de água e sal, calculados para o período são mostrados na Figura 36. Os balanços de fosfato, amônio, nitrito e nitrato são mostrados nas Figuras 37, 38, 39 e 40, respectivamente. Os fluxos de água e nutrientes, considerando o médio e baixo estuário juntos, são mostrados na Tabela 10.

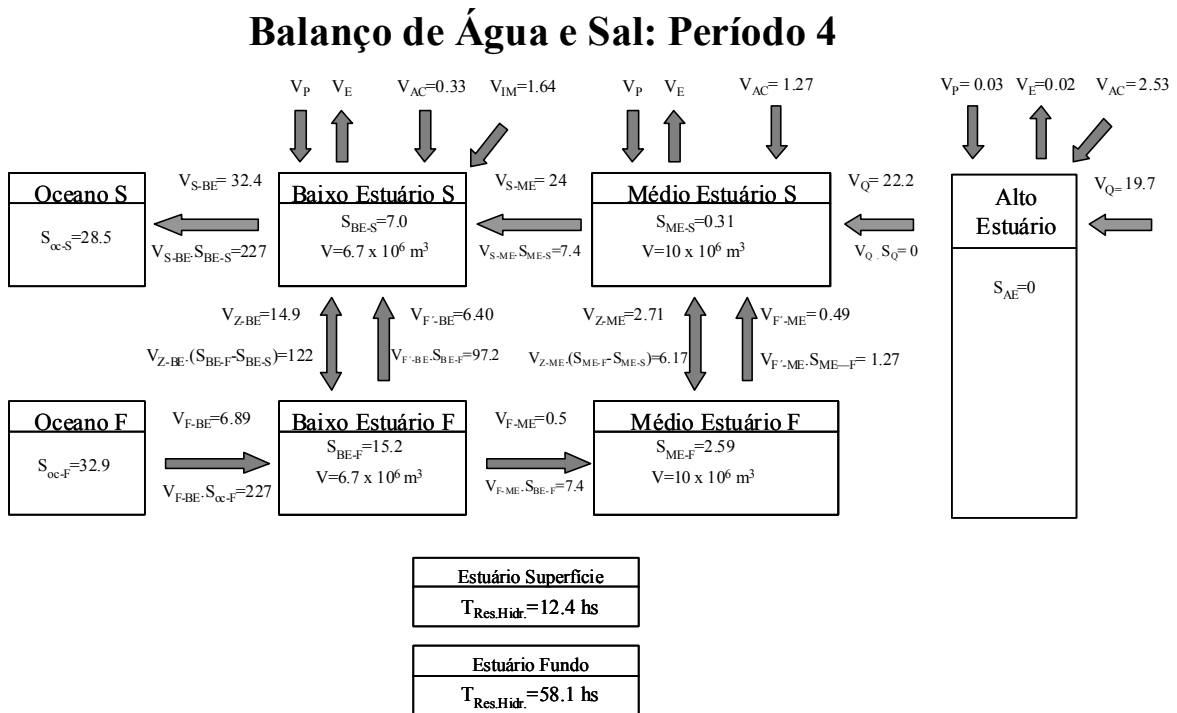


Figura 36: Balanço de água e sal no período 4 (setembro a dezembro de 2004) com descarga fluvial média de $228 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo ao período de alta descarga ao longo do período estudado. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (S) e fundo (F). As salinidades médias (S) e os volumes médios (V) de cada compartimento em superfície e fundo são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de água (V , em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) e sal ($V \cdot S$, em 10^6 kg/d) entre os compartimentos são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de água devido à descarga fluvial (V_Q), precipitação (V_P), evaporação (V_E), escoamento superficial pela área de contribuição da bacia de drenagem (V_{AC}) e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. A partir do balanço de água e sal foram estimados os fluxos de mistura entre superfície e fundo (V_Z) em cada compartimento. Os tempos de residência hidráulica ($T_{Res.Hidr.}$, em horas) em cada camada, calculado a partir do volume do sistema e dos fluxos de água são mostrados nas caixas inferiores.

Balço de PO_4^{3-} : Período 4

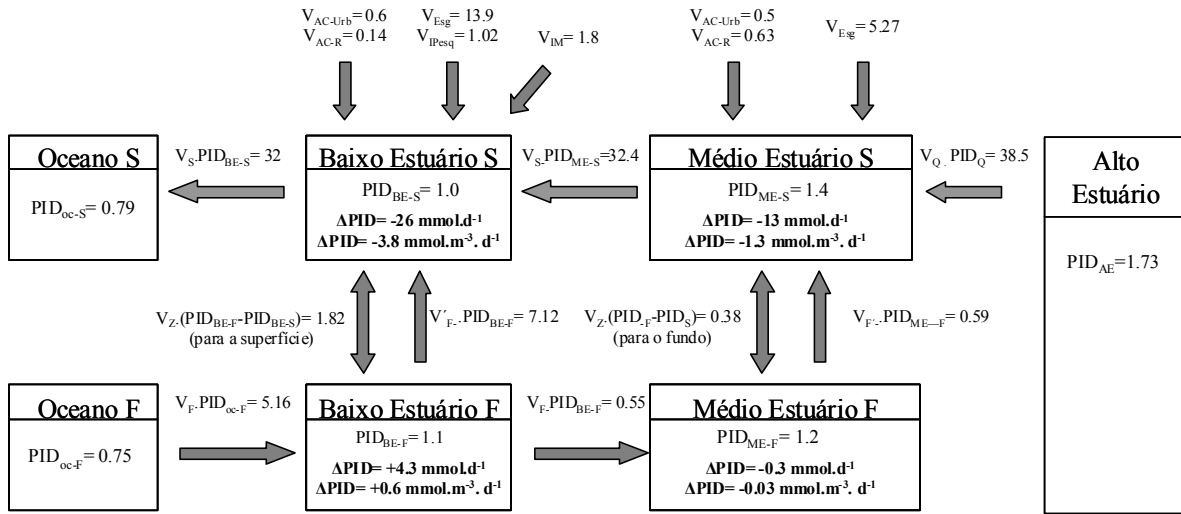


Figura 37: Balço de fósforo (PID) no período 4 (setembro a dezembro de novembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de $228 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de fósforo (PID em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de fósforo a partir da descarga fluvial ($V_{\text{Q}} \cdot \text{PID}_{\text{Q}}$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot \text{PID}_{\text{compartimento}}$, em 10^6 mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de fósforo (10^6 mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de fósforo devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_{\text{Z}} \cdot (\text{PID}_{\text{entra}} - \text{PID}_{\text{saí}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de fósforo (ΔPID). ΔPID positivo significa que houve aumento do fósforo, devido a processos internos no sistema; já ΔPID negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de fósforo no sistema.

Balço de NH_4^+ : Período 4

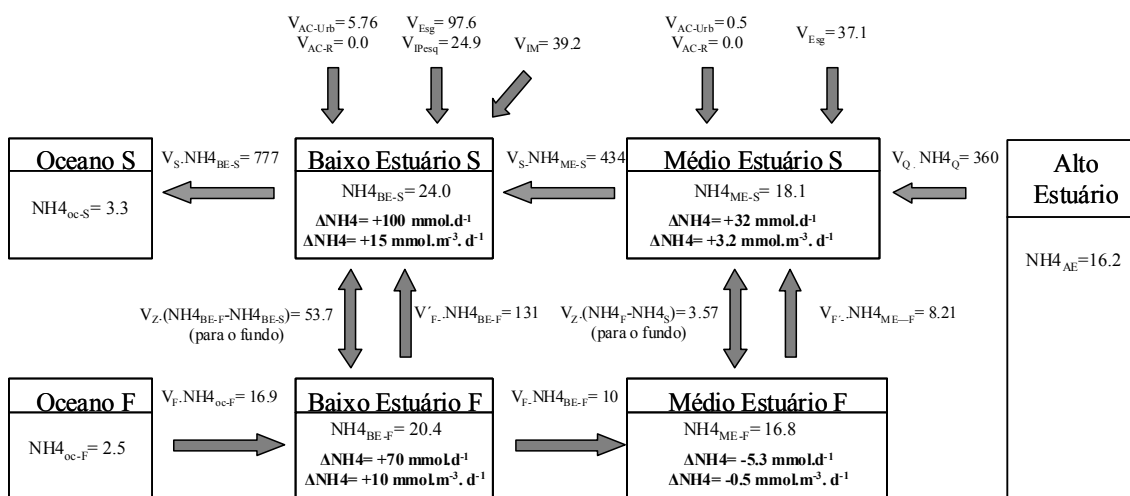


Figura 38: Balço de amônio (NH_4) no período 4 (setembro a dezembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de $228 \text{ m}^3/\text{s}$. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de amônio (NH_4 em mmol/m^3) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de amônio a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot \text{NH}_4_Q$, em mmol/d) e entre os compartimentos ($V_{\text{compartimento}} \cdot \text{NH}_4_{\text{compartimento}}$, em 10^6 mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de amônio (10^6 mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana ($V_{\text{AC-Urb}}$) e rural ($V_{\text{AC-R}}$) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de amônio devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (\text{NH}_4_{\text{entra}} - \text{NH}_4_{\text{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de amônio (ΔNH_4). ΔNH_4 positivo significa que houve aumento do amônio, devido a processos internos no sistema; já ΔNH_4 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NH_4 no sistema.

Balço de NO₂⁻: Período 4

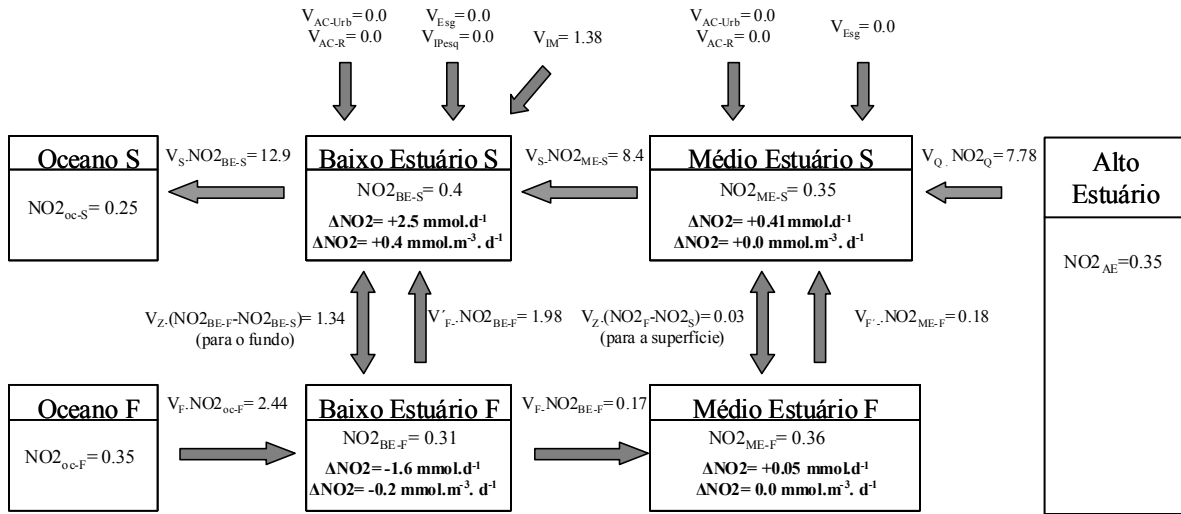


Figura 39: Balço de nitrito (NO₂) no período 4 (setembro a dezembro 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrito (NO₂ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial ($V_Q \cdot NO_{2_Q}$, em mmol/d), do Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}) e entre os compartimentos ($V_{compartimento} \cdot NO_{2_{compartimento}}$, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo ($V_Z \cdot (NO_{2_{entra}} - NO_{2_{sai}})$). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO_2). ΔNO_2 positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO_2 negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₂ no sistema.

Balço de NO₃⁻: Período 4

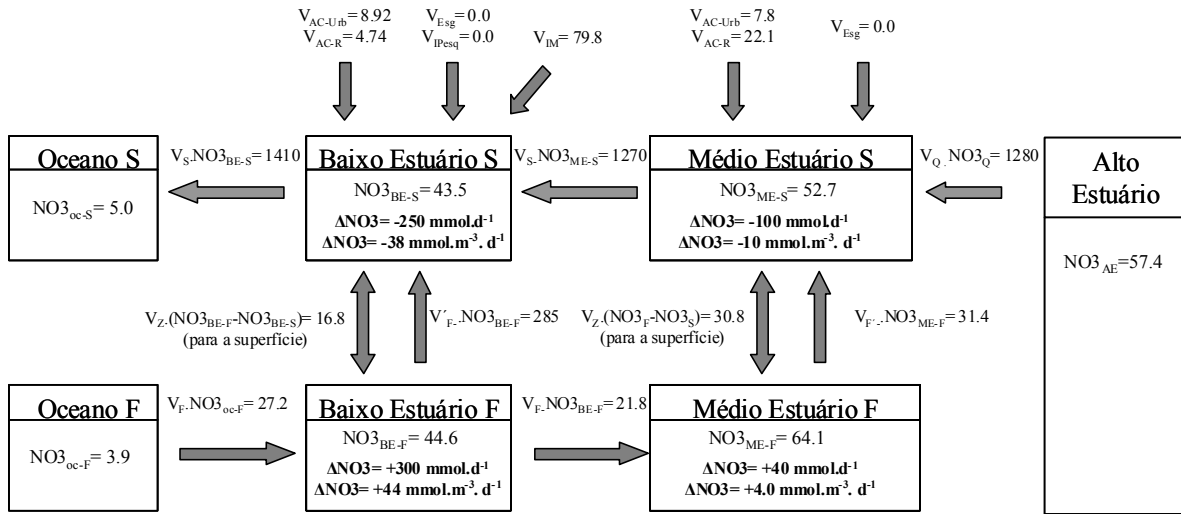


Figura 40: Balço de nitrito (NO₃⁻) no período 4 (setembro a dezembro de 2004), período marcado pela alta descarga fluvial, com média de 228 m³/s. As caixas representam os compartimentos do estuário (Alto Estuário, AE, Médio Estuário, ME, e Baixo Estuário, BE) em superfície (s) e fundo (f). As concentrações médias de nitrito (NO₃ em mmol/m³) em cada compartimento, em superfície e fundo, são mostradas dentro das caixas. Os fluxos advectivos de nitrito a partir da descarga fluvial (V_Q·NO₃_Q, em mmol/d) e entre os compartimentos (V_{compartimento} · NO₃_{compartimento}, em 10⁶mmol/d) são indicados pelas setas. Além dos fluxos entre os sistemas, foram estimadas entradas de nitrito (10⁶ mmol/d) devido ao esgoto doméstico (V_{Esg}), escoamento superficial pela área de contribuição urbana (V_{AC-Urb}) e rural (V_{AC-R}) da bacia de drenagem e Rio Itajaí-Mirim (V_{IM}), principal tributário, que desemboca no baixo estuário. Também foram estimados os fluxos de nitrito devido à mistura entre as águas de superfície e fundo (V_Z·(NO₃_{entra} - NO₃_{sai})). A partir dos fluxos de entrada e saída em cada compartimento foi calculada a variação não conservativa de nitrito (ΔNO₃). ΔNO₃ positivo significa que houve aumento do nitrito, devido a processos internos no sistema; já ΔNO₃ negativo significa que os processos internos resultaram em diminuição de NO₃ no sistema.

Tabela 10: Fluxos de água e nutrientes para a porção terminal do estuário do Itajaí (médio e baixo estuário) no período de descarga fluvial elevada (período 4, descarga = 228 m³/s). Valores positivos representam entrada para o estuário e negativos saída. A partir dos fluxos entrada e saída de água e nutrientes, foi determinado o balanço de massa para os nutrientes (Δ), mostrando que o sistema representou uma fonte (Δ positivo) ou sumidouro (Δ negativo) do nutriente.

Período 4: Descarga Fluvial = 228 m ³ /s	Água 10 ⁶ m ³ /d	P-PO4 10 ⁶ mmol/d	N-NH4 10 ⁶ mmol/d	N-NO2 10 ⁶ mmol/d	N-NO3 10 ⁶ mmol/d
Descarga Fluvial (V _Q)	22,2	38,5	360	7,8	1280
Escoamento Superficial (V _{AC})	1,6	1,9	6,3		43,6
Rio Itajaí Mirim (V _{IM})	1,64	1,8	39,2	1,4	79,8
Esgoto Doméstico (V _{Esg})		19,2	135		
Indústria Pesq. (V _{IPesq})		1,0	24,9		
Intrusão Água do Mar (V _F)	6,9	5,2	16,9	2,4	27,2
Σ Entradas	32,4	67,6	582,4	11,6	1431
Saída Advectiva p/ Zona Costeira (Vs)	-32,4	-32,0	-777	-12,9	-1410
Variação Não Conservativa (Δ)		-35,6	+195	+1,3	-21,0
Fluxo Residual para Zona Costeira	-25,5	-26,8	-760	-10,5	-1383

4.4. Variação Intra-mareal:

A avaliação da variação intramareal de nutrientes no baixo e médio estuário do Rio Itajaí foi feita a partir de um experimento intensivo de 25 horas de duração. Durante o experimento, três estações de amostragem foram monitoradas, com coletas de amostras com frequência horária. As estações foram localizadas no Alto Estuário (AE), Médio Estuário (ME) e Baixo Estuário (BE). A estação utilizada para caracterizar o Alto Estuário, correspondeu à estação #6 do monitoramento espaço-temporal (município de Ilhota); a estação referente ao Médio Estuário foi localizada cerca de 3 km a jusante da estação #7 do monitoramento e a estação referente ao Baixo Estuário correspondeu à estação #9 do monitoramento. A Tabela 11 mostra um sumário dos resultados obtidos para cada estação de amostragem durante a campanha.

Tabela 11: Sumário dos resultados obtidos em cada estação de amostragem durante a campanha de 25 horas nas estações do alto, médio e baixo estuário (AE, ME e BE), em dezembro de 1999, no estuário do Rio Itajaí-Açú.

Estação	Parâmetro	Salinidade	MPS (mg/l)	NH ₄ ⁺ (μM)	NO ₂ ⁻ (μM)	NO ₃ ⁻ (μM)	PO ₄ ³⁻ (μM)	N:P	Si (μM)
Alto Estuário	Média ±	0,0	29,4	12,2	0,8	27,3	1,4	28,7	143,1
	D.P.		±8,2	±1,0	±0,1	±1,2	±0,1	±3,2	±39,0
	C.V. (%)		27,9	8,2	12,5	4,4	7,1	11,1	27,3
	Mínimo		9,9	10,8	0,7	23,2	1,1	22,4	41,6
	Máximo		49,5	14,5	0,9	29,6	1,6	37,4	178,6
Médio Estuário - Superfície	Média ±	0,2 ±0,2	20,9	16,0	1,1 ±0,2	31,0 ±2,9	1,3 ±0,3	39,4	139,8
	D.P.		±5,6	±3,5				±8,5	±32,7
	C.V. (%)		26,7	21,8	18,2	9,3	23,1	21,6	23,4
	Mínimo	0,1	14,7	6,1	0,9	19,9	0,9	19,3	57,8
	Máximo	0,7	27,5	23,5	1,4	34,7	2,5	55,8	168,1
Médio Estuário - Fundo	Média ±	3,8 ±3,8	21,0	20,6	1,0 ±0,3	32,6 ±5,7	0,9 ±0,2	61,6	178,1
	D.P.		±12,5	±6,9				±25,1	±42,0
	C.V. (%)	100	59,5	33,4	30,0	17,5	22,2	40,7	23,6
	Mínimo	0,1	8,0	10,9	0,01	14,0	0,5	16,0	55,4
	Máximo	10,4	39,0	39,5	1,4	44,2	1,3	116,5	282,7
Baixo Estuário - Superfície	Média ±	9,2 ±3,9	10,3	34,4	1,1 ±0,3	26,5 ±6,1	0,9 ±0,3	74,5	140,7
	D.P.		±1,2	±8,8				±27,3	±28,7
	C.V. (%)	42,4	11,6	25,6	27,3	23,0	33,3	36,6	20,4
	Mínimo	5,1	8,6	22,7	0,2	20,4	0,4	31,3	99,7
	Máximo	19,9	10,9	58,5	1,4	46,1	2,0	166,9	220,3
Baixo Estuário - Fundo	Média ±	33,5 ±0,6	60,4	7,2 ±3,7	0,3 ±0,2	3,7 ±1,2	0,7 ±0,3	17,3	16,4
	D.P.		±42,6					±6,1	±9,6
	C.V. (%)	1,8	70,5	51,4	66,7	32,4	42,8	35,3	58,5
	Mínimo	32,2	13,4	2,6	0,2	2,1	0,3	3,4	6,3
	Máximo	35,7	173	14,3	1,0	6,4	1,2	32,3	42,8

4.4.1. Estação AE:

Correspondendo a estação representante do alto estuário, a estação *AE* não sofreu influência direta da salinidade. Entretanto o efeito da maré pôde ser observado na variação do nível d'água durante o ciclo de maré. O início da campanha foi marcado pela progressiva elevação do nível d'água até às 17:00hs. A partir deste horário, com a maré vazante, foi observada a diminuição do nível até às 22:00 hs, quando foi registrado o menor valor da estação *AE*. O mesmo padrão de variação foi observado no ciclo seguinte, com o maior nível sendo observado às 04:00hs e o menor às 09:00 do dia seguinte (Figura 41a).

A partir do nível e das medições dos perfis de corrente, foi calculada a variação da descarga ao longo do ciclo de maré. Com média de $-198\text{m}^3/\text{s}$, a descarga variou entre -492 e $160\text{ m}^3/\text{s}$, com os máximos de vazante registrados logo após os maiores de valores de nível, durante a vazante (Figura 41b). De forma geral, apenas durante pequenos intervalos de tempo foram registrados valores positivos de descarga fluvial (valores positivos representam entrada de água para o interior do continente e vice-versa). Ao contrário, durante a maior parte do tempo a descarga foi negativa. Foi observada discrepância entre o pico de entrada de água e o nível máximo registrado, que nesta estação foi de aproximadamente 2 horas.

O material particulado em suspensão (MPS) na estação *AE* apresentou média de $29,4\text{ mg/l}$ variando entre $9,9$ e $49,5\text{ mg/l}$. Seu coeficiente de variação ao longo dos 2 ciclos de maré foi de 28%. A variação do MPS ao longo dos ciclos de maré na estação *AE* é mostrada na Figura 41c.

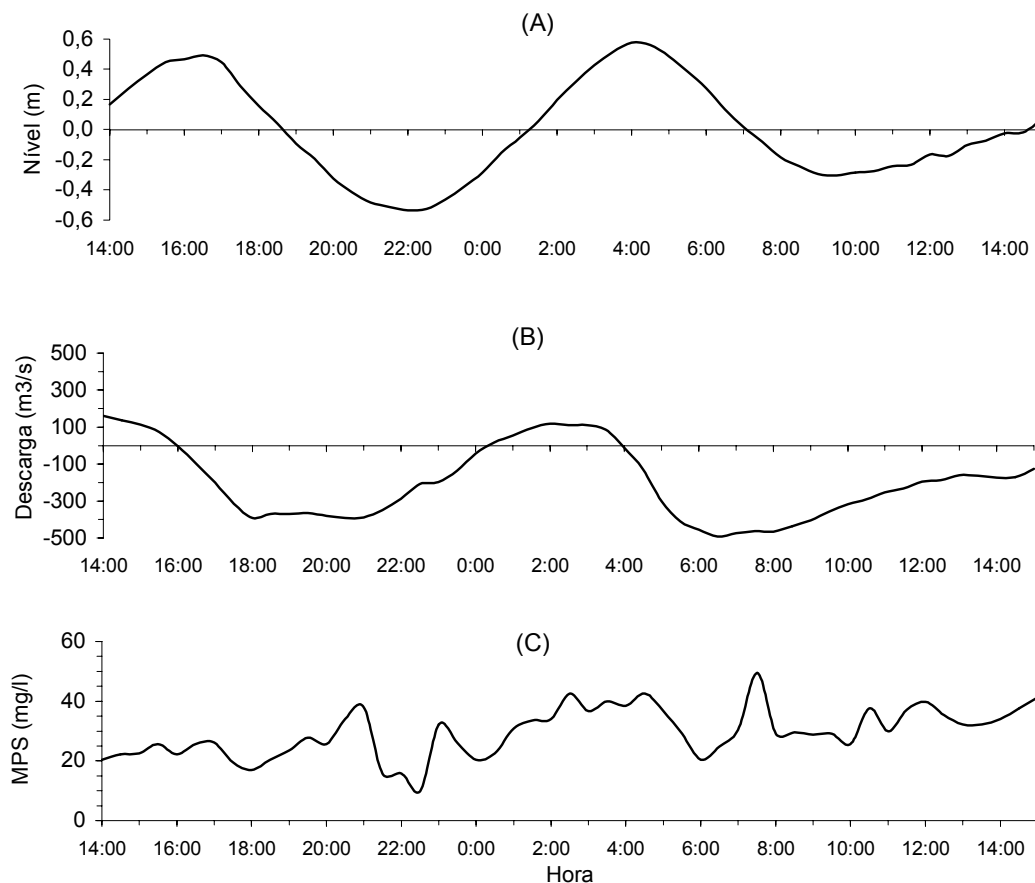


Figura 41: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) nível, (B) descarga, (C) MPS.

O Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), correspondendo à soma de N-NH_4^+ , N-NO_2^- e N-NO_3^- , apresentou média de $40,2\mu\text{M}$, variando entre 35 e $42\mu\text{M}$ ao longo do período amostrado (Figura 42 a). Dentre as 3 estações observadas, a estação *AE* foi a que apresentou menor variabilidade nas concentrações de NID com um coeficiente de variação de 4,2%. Em média a principal forma de NID foi o NO_3^- , que correspondeu a 68% do NID, seguido pelo NH_4^+ (30%) e NO_2^- (2%). As variações do NID, NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^- na estação *AE*, ao longo do ciclo de maré, são mostradas na Figura 42.

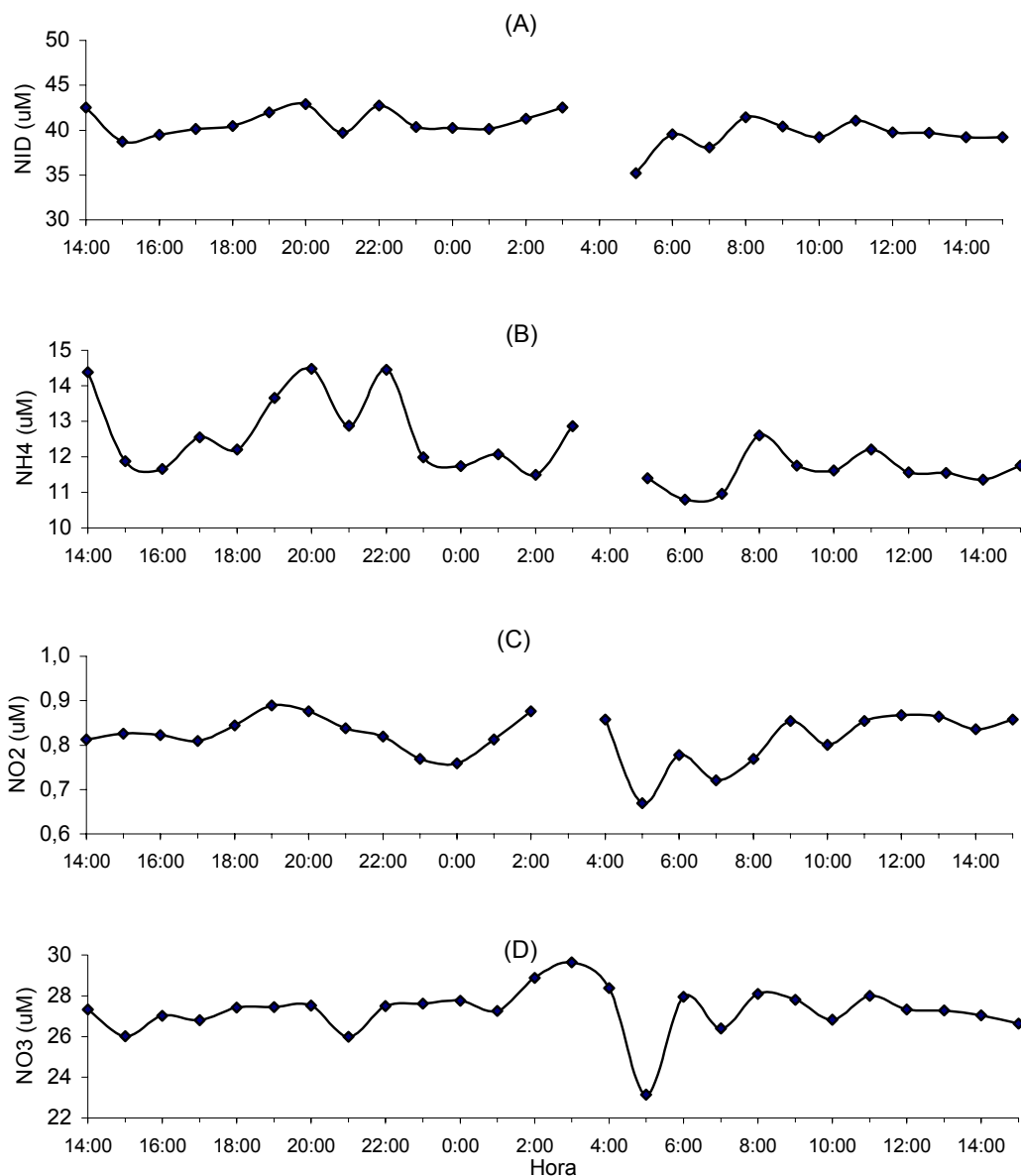


Figura 42: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajai-Açu em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2) e (D) Nitrato (NO_3).

O PO_4^{3-} apresentou média geral para a estação AE de 1,4 μM , variando entre 1,1 e 1,6 μM ao longo dos ciclos de maré (Figura 43 a). Com um coeficiente de variação de 8,5%, o PO_4^{3-} na estação AE apresentou a menor variabilidade entre as estações amostradas ao longo do ciclo de maré. A partir das concentrações de NID e PO_4^{3-} foram obtidas as razões N:P na Estação AE, que apresentou média de 29, variando entre 22 e 37 e apresentou um coeficiente de variação de 11% (Figura 43b , rz N:P).

Para o Si (H_4SiO_4) a média para o período amostrado foi de $143,1\mu\text{M}$ com as concentrações variando entre 42 e $179\mu\text{M}$ (Figura 43c: Si). Com um coeficiente de variação de 27% ao longo dos ciclos de maré, o Si foi o nutriente que apresentou a maior variabilidade ao longo dos ciclos de maré, na estação *AE*.

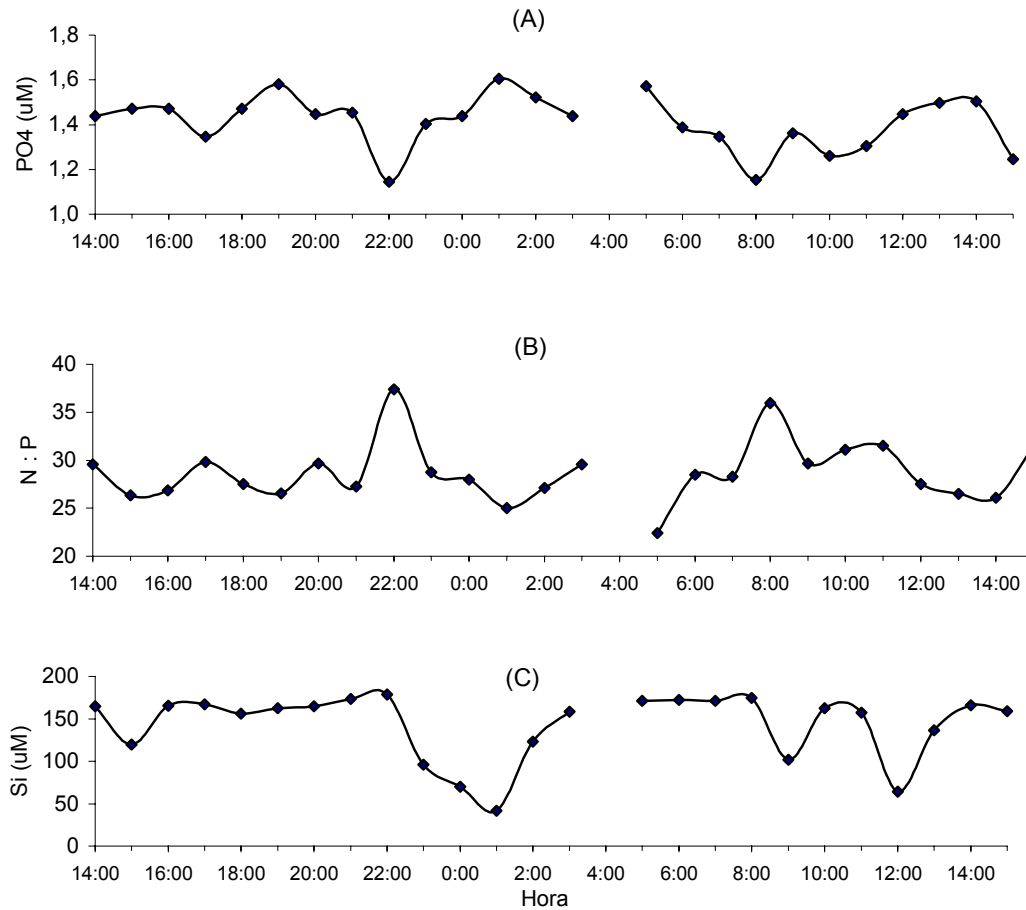


Figura 43: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Alto Estuário (AE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) fosfato (PO_4^{3-}), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).

4.4.2. Estação ME:

A estação correspondente ao médio estuário (ME), além do efeito da maré sobre o nível d'água, sofreu influência direta da salinidade, principalmente no fundo. O início da campanha foi marcado pela maré alta, correspondendo a um nível de 0,50 m,

às 15:30hs. A partir de então o nível diminuiu progressivamente, atingindo o menor valor da campanha às 21:00 hs, quando ele atingiu -0,53m, correspondendo ao final do primeiro ciclo de maré. No ciclo seguinte foi observado o mesmo padrão de variação, com os níveis máximos e mínimos registrados, respectivamente às 03:30 e às 08:00 hs (Figura 44 a). Os valores extremos registrados foram de -0,53 e + 0,53 m.

A descarga fluvial na estação do médio estuário apresentou média de -195,5 m³/s, variando entre - 656 e +281 m³/s. Os picos de descarga em direção ao oceano foram registrados cerca de 3 horas após os níveis máximos (Figura 44b).

A estação do médio estuário sofreu influência direta da salinidade no período amostrado. Ela variou entre 0,1 e 10,4 durante os ciclos de maré, com os maiores valores registrados no fundo. A média da salinidade em superfície foi de 0,2, com valores mínimo e máximo, respectivamente iguais a 0,1 e 0,7. Já no fundo a salinidade média foi de 3,8, variando entre 0,1 e 10,4. A variação da salinidade evidenciou a penetração da cunha salina no estuário, resultando na estratificação da coluna d'água nos momentos de subida da maré. Esta estratificação foi evidente nos momentos de elevação de nível, que nesta campanha foi registrado entre 14 e 18 hs e entre as 0:00 e 06:00 no ciclo seguinte (Figura 44c: salinidade).

O MPS no médio estuário apresentou concentração média em superfície de 31 mg/l, variando entre 20 e 35 mg/l. No fundo a média foi de 33 mg/l, variando entre 14 e 44 mg/l. As maiores concentrações de MPS foram registradas no fundo em momentos de maré vazante. Assim, os maiores valores de MPS foram registrados às 22:00hs no primeiro ciclo de maré e às 07:00 no segundo (Figura 44 d). Estes picos de concentração estiveram associados ao limite da zona de influência da cunha salina, durante a vazante.

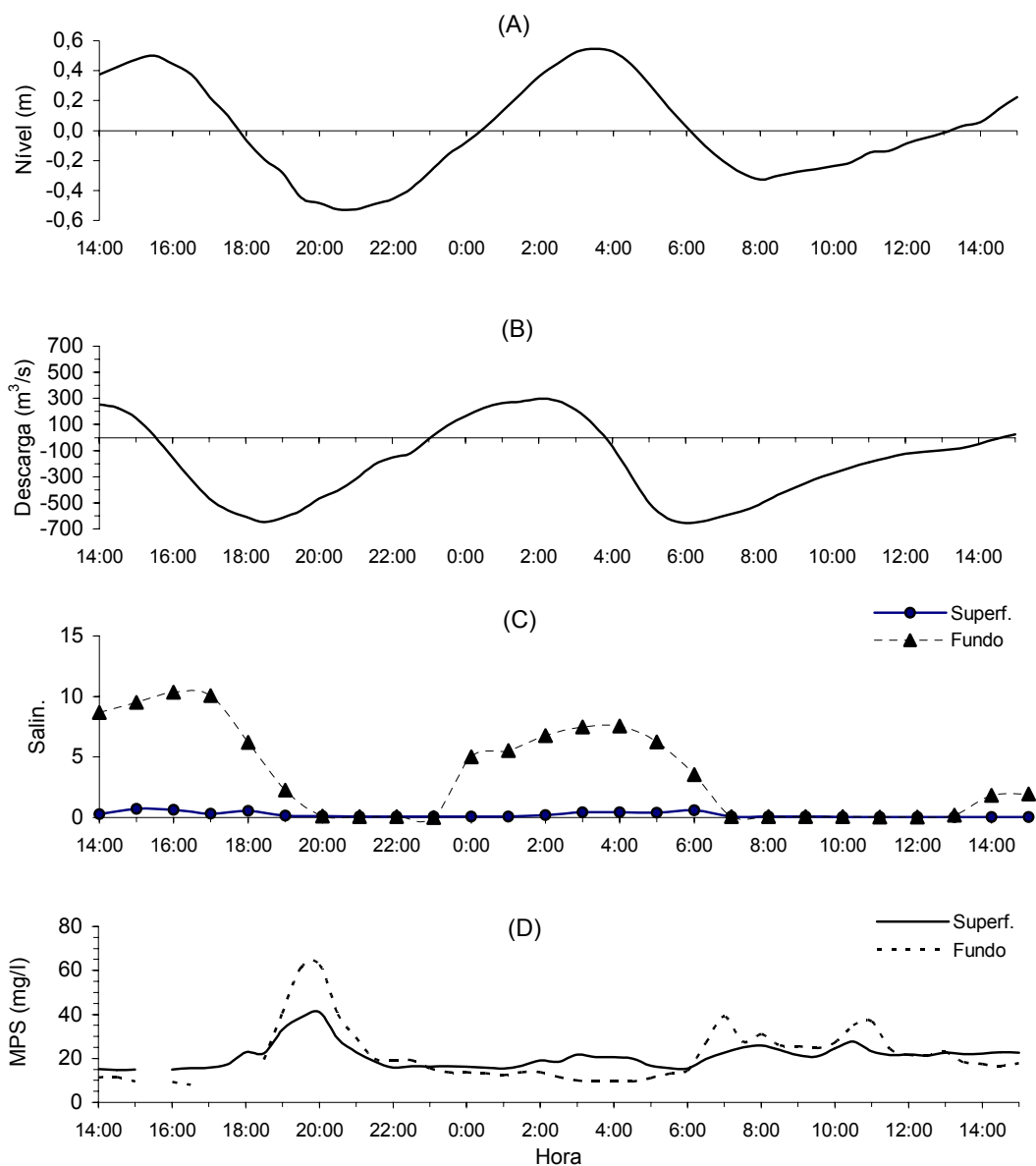


Figura 44: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açú em dezembro de 1999: (A) nível, (B) descarga, (C) Salinidade e (D) MPS.

O NID na estação ME apresentou média na superfície de $48\mu\text{M}$, variando entre 37 e $60\mu\text{M}$. Ao fundo a concentração média foi de $54\mu\text{M}$ com valores mínimo e máximo, respectivamente iguais a 17 e $73\mu\text{M}$ (Figura 45a). Assim como no alto estuário, a principal forma de NID no médio estuário foi o NO_3^- , que representou em média 65% do NID em superfície, seguido pelo NH_4^+ (33%) e NO_2^- (2%). Ao fundo a distribuição do NID foi similar, com o NO_3^- contribuindo com 60% do NID, o NH_4^+

com 38% e o NO_2^- com 2%. De forma geral as contribuições de NH_4^+ tenderam a aumentar com a elevação da salinidade, particularmente ao fundo, o que ocorreu entre as 14:00 e 18:00hs e entre as 0:00 e 06:00hs (Figuras 44 c e 45 b). A variações de NID, NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^- no médio estuário são mostradas nas Figuras 45 a, b, c e d, respectivamente.

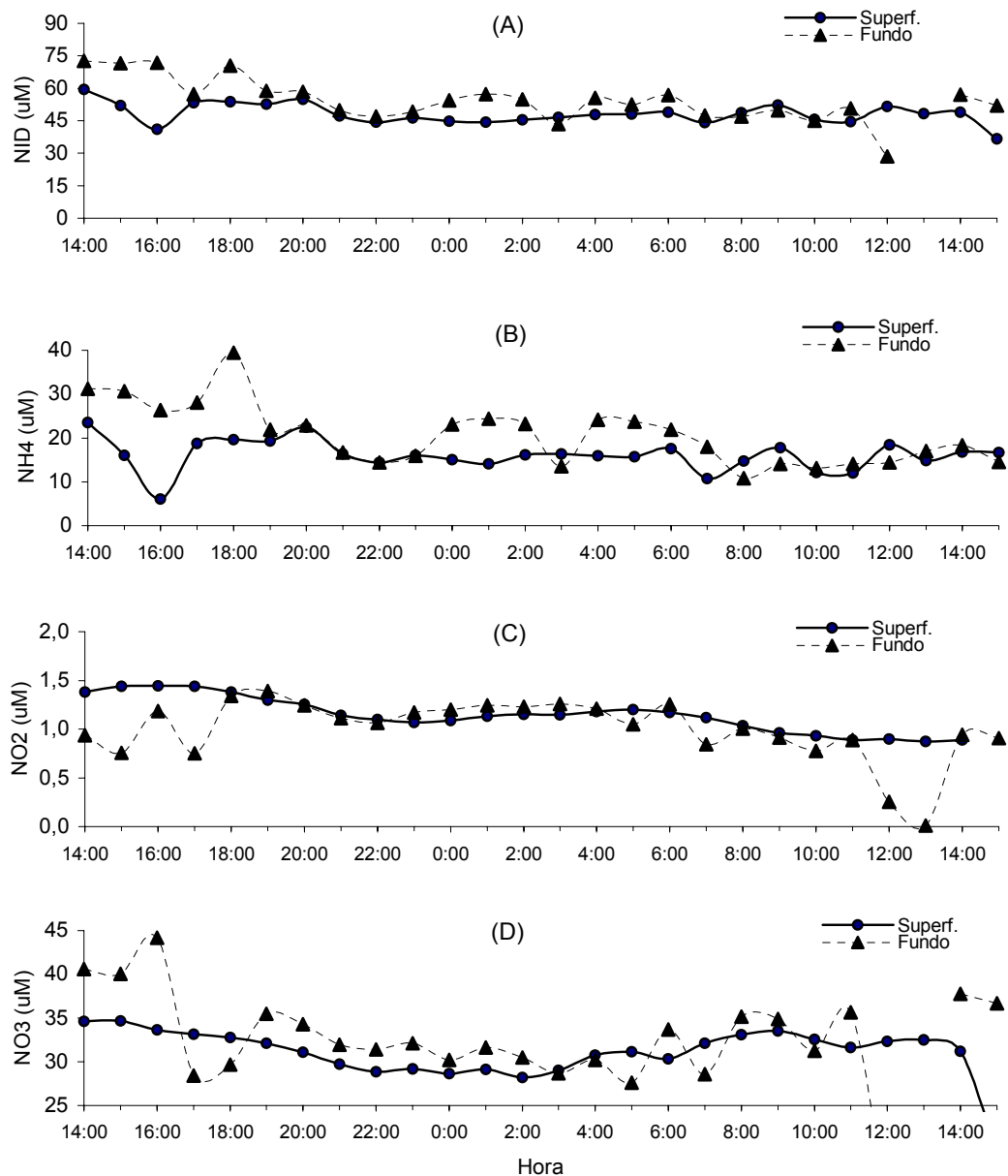


Figura 45: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açu em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2^-) e (D) Nitrato (NO_3^-).

O PO_4^{3-} no médio estuário apresentou média de $1,3\mu\text{M}$, variando entre $0,9$ e $2,5\mu\text{M}$ na superfície. No fundo, as concentrações foram menores, e a concentração média foi de $0,9\mu\text{M}$ com mínimo e máximo iguais a $0,5$ e $1,3\mu\text{M}$, respectivamente. Em superfície, aparentemente a variação do PO_4^{3-} não esteve associada à variação da maré. Entretanto, ao fundo, as concentrações de PO_4^{3-} tenderam a diminuir nos períodos de aumento da salinidade. Assim o PO_4^{3-} nesta profundidade aumentou das 18:00 às 22:00hs, período marcado pela diminuição da salinidade. A partir das 22:00 o PO_4^{3-} tendeu a diminuir, durante um período em que a salinidade voltou a aumentar e assim sucessivamente (Figura 46a: PO4 na estação ME).

A razão N:P entre os nutrientes apresentou média na superfície de 39, variando entre 19 e 56. Ao fundo a razão média foi maior, com média de 62 e valores mínimo e máximo de 16 e 117, respectivamente. Ao fundo apresentou tendência de aumento com o aumento da salinidade, em função da variação do PO_4^{3-} (Figura 46b).

O Si dissolvido na estação ME. variou na superfície entre 58 e $168\mu\text{M}$, com média de $140\mu\text{M}$. No fundo as concentrações foram maiores, com média de $178\mu\text{M}$ e valores mínimos e máximos respectivamente iguais a 55 e $287\mu\text{M}$. A variação do Si é mostrada na Figura 46c.

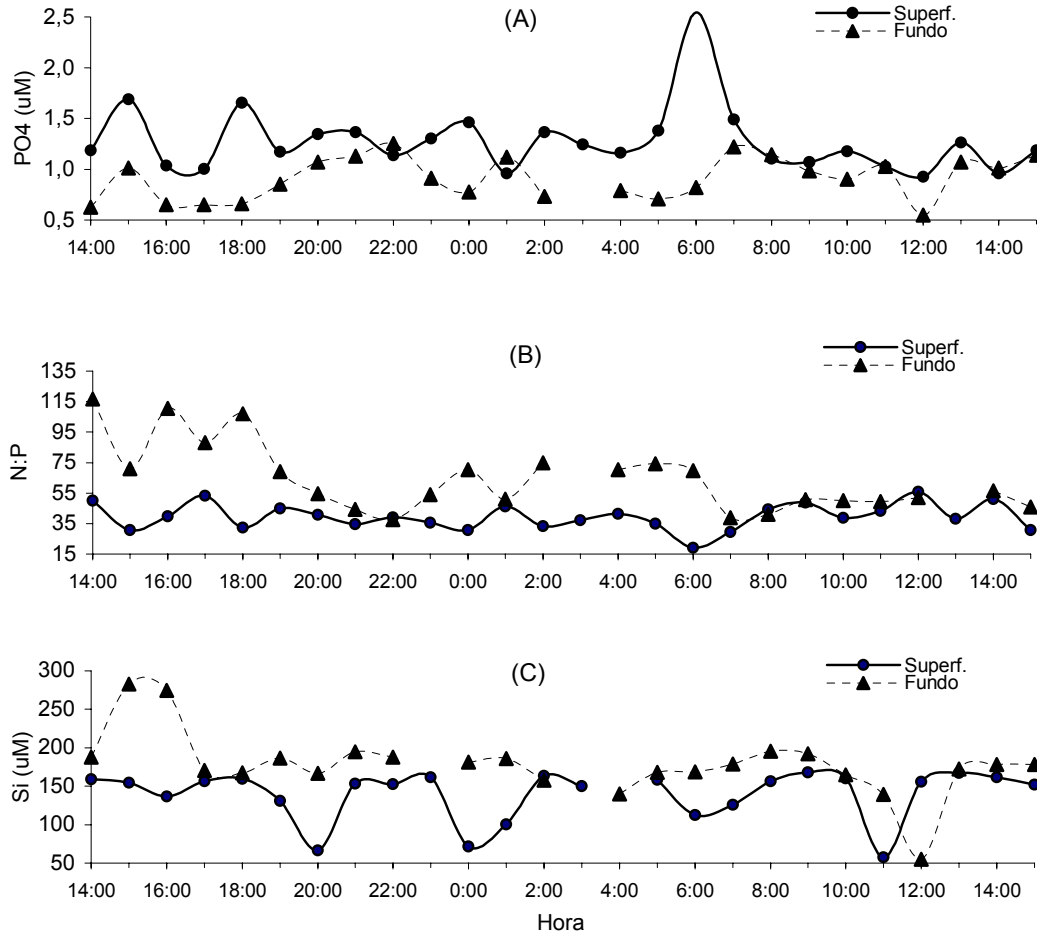


Figura 46: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Médio Estuário (ME) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açú em dezembro de 1999: (A) fosfato (PO₄³⁻), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).

4.4.3. Estação BE:

A estação usada para caracterizar o baixo estuário do Itajaí (BE) ao longo dos ciclos de maré está localizada próxima à desembocadura do estuário. Esta estação sofre influência direta da ação da maré e da mistura com a água salgada. Durante a campanha de amostragem os maiores valores de nível, correspondentes à preamar, foram registrados às 14:30 e às 03:00 hs, quando foram registrados valores de +0,47m e +0,51m, respectivamente. Já durante a baixamar, os menores níveis foram registrados às 20:30hs e às 07:30hs com valores de -0,48m e -0,30m. A variação do nível durante a campanha é mostrada na Figura 47 a.

A estação BE foi a única em que foram registradas, em determinadas situações, correntes com sentidos opostos em superfície e fundo. Na superfície a corrente apresentou média de $-32,5$ cm/s, variando entre -89 e 31 cm/s. No fundo a corrente apresentou média de $13,6$ cm/s, variando entre -32 e 42 cm/s. A variação da corrente, em superfície e fundo é mostrada na Figura 47b.

Para a estação BE a vazão variou entre -1127 e 556 m³/s, com média geral de -320 m³/s. Os picos de vazante foram registrados às 18:30 e às 06:00hs, durante um período de diminuição do nível d'água, correspondendo à diminuição do nível. A variação da vazão é mostrada na Figura 47c.

A estação do baixo estuário recebe grande influência da água marinha, particularmente em situações de baixa descarga fluvial. Durante a campanha de amostragem a estação apresentou estratificação ao longo de toda a campanha, com a presença de água salgada no fundo e água salobra na superfície, resultado da mistura da água de origem fluvial e marinha. Em superfície a salinidade média foi de $9,2$, variando entre $5,1$ e 20 . Já no fundo a média da salinidade foi de $33,5$ com mínimo e máximo respectivamente iguais a 32 e 36 . A variação da salinidade na estação BE é mostrada na Figura 47d.

O MPS apresentou baixa variabilidade na superfície, apresentando média de $10,3$ mg/l e valores mínimo e máximo de $8,6$ e $10,9$ mg/l, respectivamente (Figura 47e). No fundo, as concentrações foram bem maiores e variáveis. A média no fundo foi de $60,4$ mg/l, mas variando entre $13,4$ e 173 mg/l. As altas concentrações no fundo estão relacionadas ao efeito de ressuspensão provocado pela entrada da maré e pela dragagem do canal de Navegação do Porto Itajaí.

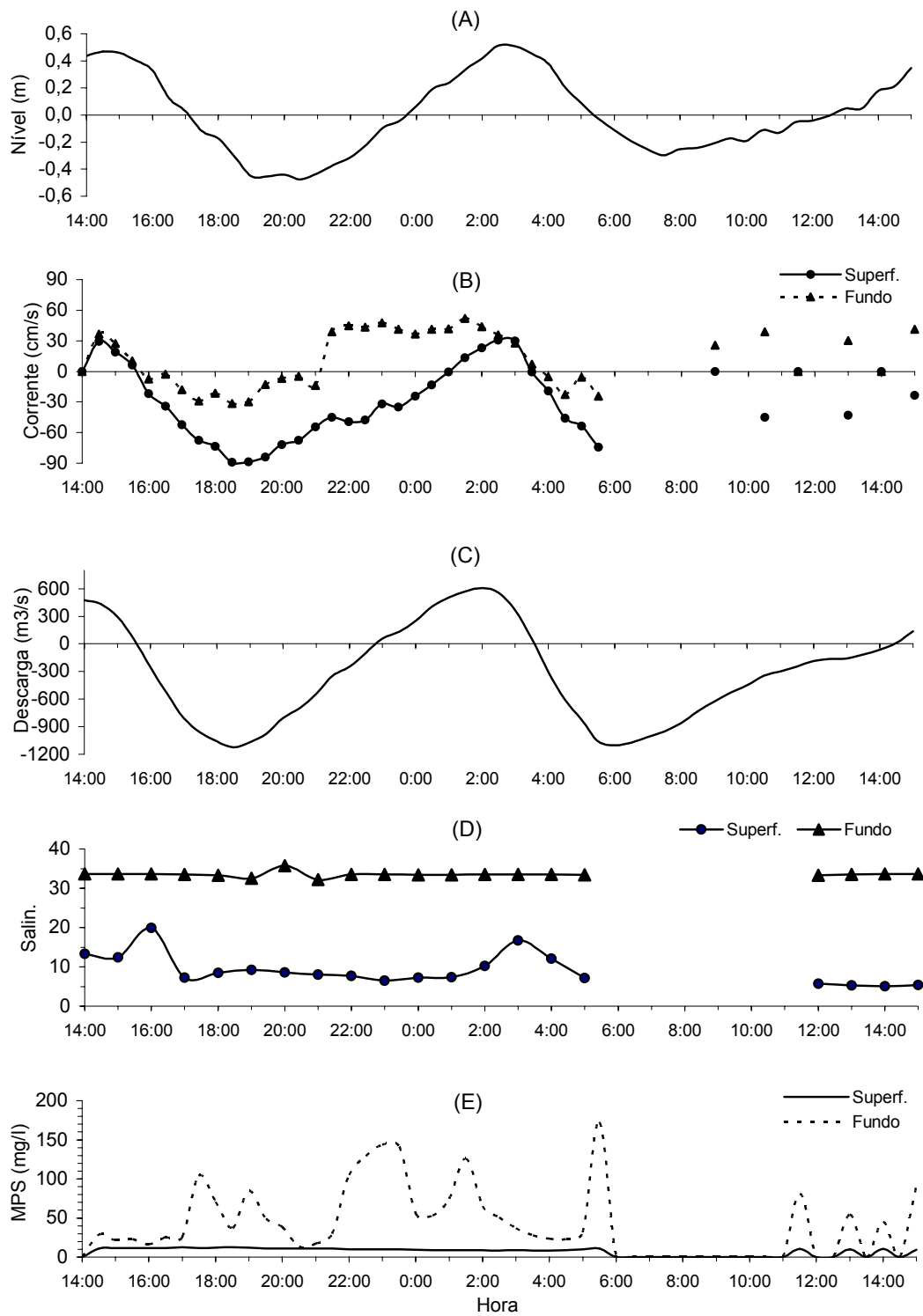


Figura 47:Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (BE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açú em dezembro de 1999: (A) nível, (B) correntes, (C) descarga, (D) salinidade e (E) MPS.

O NID na estação BE apresentou média, em superfície, de $62\mu\text{M}$, variando entre 46 e $85\mu\text{M}$. No fundo a média das concentrações de NID foi de $11\mu\text{M}$, com

mínimo e máximo de 6,4 e 21 μM , respectivamente. A estação do baixo estuário, mesmo com a grande influência marinha, foi a que apresentou a maior proporção de NH_4^+ sobre o NID. Em média, o NH_4^+ representou 55,5% do NID, seguido pelo NO_3^- (42,5%) e NO_2^- (2%). Ao fundo o NH_4^+ também representou a principal forma de NID, correspondendo a 64% de sua totalidade, seguido pelo NO_3^- (33%) e NO_2^- (3%). É importante notar que de forma geral, as concentrações de NO_3^- tenderam a diminuir na estação BE, em função da influência da água marinha, mais pobre em nutrientes. Entretanto, ao contrário do esperado em função da influência marinha, as concentrações de NH_4^+ aumentaram.

O padrão de variação do NID esteve relacionado às correntes em superfície e fundo na estação BE, que em algumas situações apresentaram sentidos contrários. A variação do NID ocorreu principalmente devido ao NH_4^+ , que tendeu a variar em função das correntes. Na superfície as concentrações de NH_4^+ tenderam a aumentar após a inversão da corrente, quando a água passou a entrar no estuário. Esta tendência foi observada entre 0:00 e 04:00hs. Já, ao fundo, a concentração tendeu a diminuir durante os períodos de corrente positiva (entrada de água). Foi o caso do período compreendido entre 22:00hs e 04:00hs, quando as concentrações de NID se tornaram menores, durante um período de entrada de água para o interior do estuário. As concentrações de NH_4^+ no fundo só voltaram a subir após nova inversão da maré, por volta das 04:00hs. A variação dos nutrientes nitrogenados na estação BE é mostrada na Figuras 48 a, b, c e d.

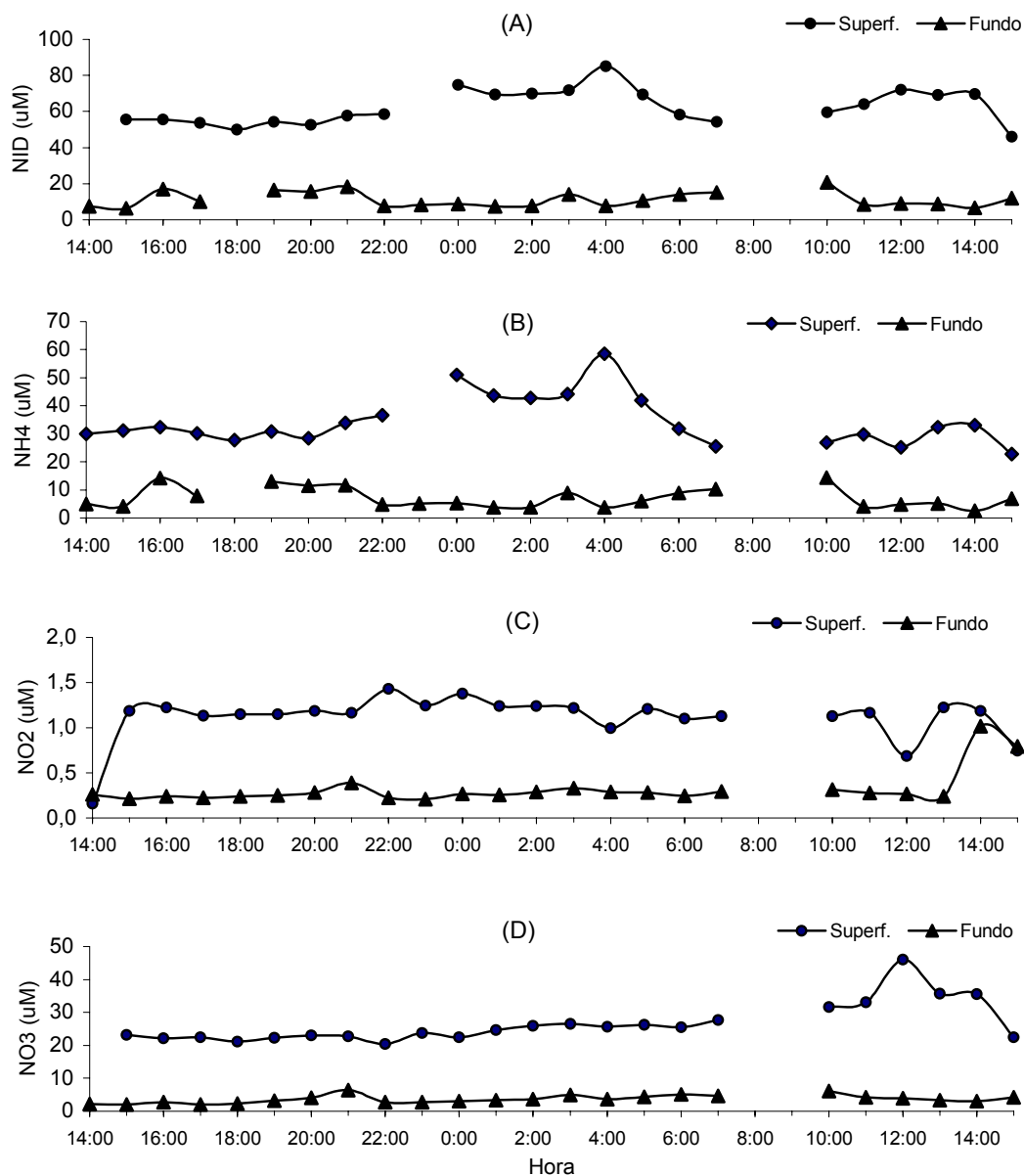


Figura 48:Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (BE) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açú em dezembro de 1999: (A) Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (NID), (B) Amônio (NH_4^+), (C) Nitrito (NO_2^-) e (D) Nitrato (NO_3^-).

O PO_4^{3-} na estação *BE* apresentou média de $0,9\mu\text{M}$ na superfície, variando entre $0,4$ e $2,0\mu\text{M}$. No fundo a média foi de $0,7\mu\text{M}$ com mínimo e máximo de $0,3$ e $1,2\mu\text{M}$, respectivamente. O padrão de variação do PO_4^{3-} foi similar ao NH_4^+ , principalmente no fundo, onde ele apresentou diminuição entre às 22:00 e 04:00hs (Figura 49 a).

A razão N:P entre os nutrientes mostrou nítida diferença entre superfície e fundo. Na superfície a média da razão foi de 75, variando entre 31 e 170. No fundo a razão foi menor, com média de 17 e mínimo e máximo respectivamente iguais a 3,5 e 32. A variação da razão N:P na estação *BE* é mostrada na Figura 49b.

O Si, assim como os demais nutrientes, também demonstrou concentrações diferenciadas entre superfície e fundo. Em superfície a média de Si foi de 141 μM , variando entre 100 e 220 μM . Já no fundo, com a influência da água marinha a média foi de 16 μM , variando entre 6,3 e 43 μM . Como o N e P, o Si tendeu a apresentar diminuição entre as 23:00 e 04:00hs no fundo. A variação do Si é mostrada na Figura 49c.

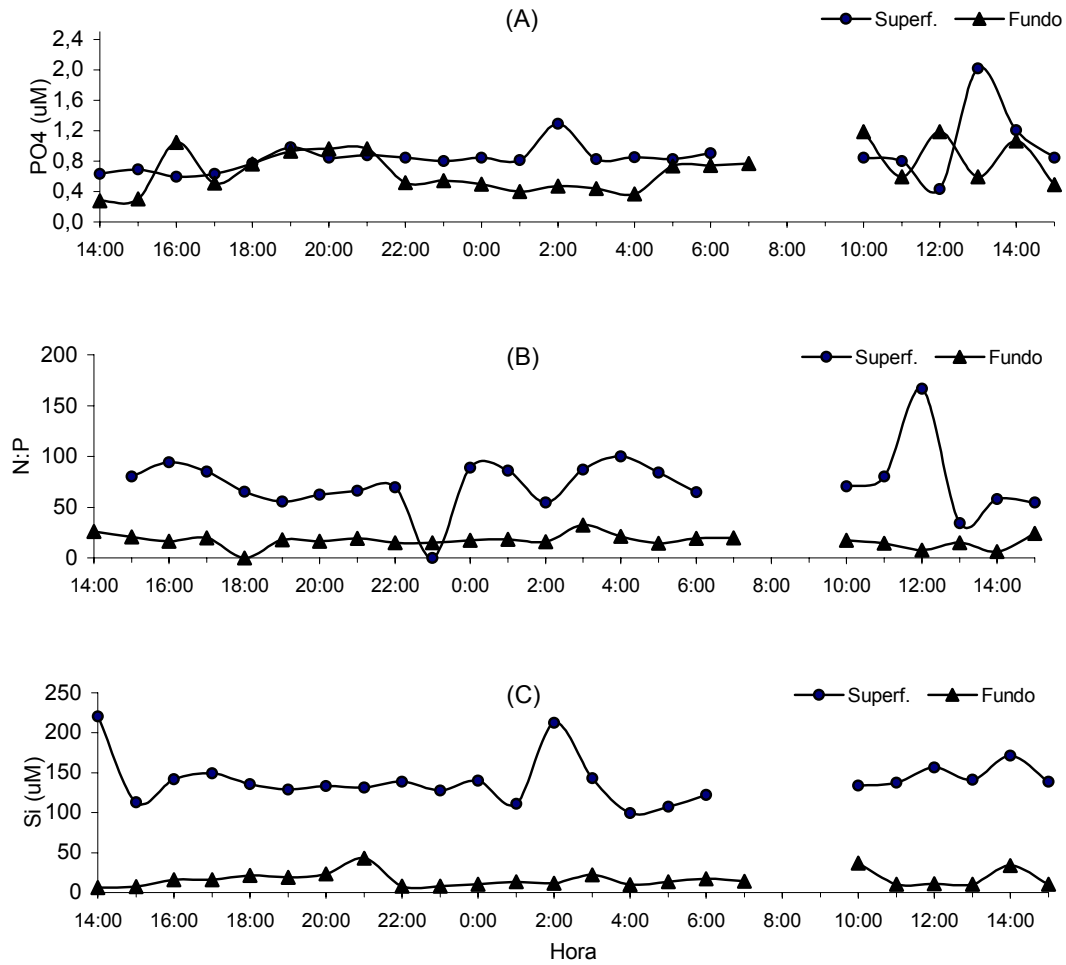


Figura 49: Variação ao longo do ciclo de maré na estação do Baixo Estuário (B.E.) em campanha realizada no estuário do Rio Itajaí-Açú em dezembro de 1999: (A) fósforo (PO_4^{3-}), (B) razão N:P, (C) silício dissolvido (Si).

5. DISCUSSÃO:

5.1. Variação espacial: Tendências Gerais

Inicialmente será feita uma discussão sobre as tendências gerais de variação das características do sistema e os fatores que determinaram esta variação. Para esta abordagem foram consideradas as médias gerais de cada estação amostral, com o intuito de fornecer um panorama geral das distribuições dos nutrientes e do conteúdo orgânico ao longo do estuário, desde sua extremidade fluvial, em Indaial, até a desembocadura, em Itajaí. Ao longo destes cerca de 94 km, o estuário, inicialmente com características fluviais, é influenciado pelo efeito da urbanização e agricultura. Já na desembocadura, além da influência antropogênica, também há o efeito da penetração da água do mar, o que modifica as características do ambiente fluvial.

A influência da água marinha sobre a distribuição de nutrientes e matéria orgânica em sistemas estuarinos e costeiros geralmente resulta em diminuição das concentrações destes compostos com o aumento da salinidade (GAGO *et al.*, 2005; PEREIRA FILHO *et al.*, 2001, 2002, SCHETTINI *et al.*, 2000; CABEÇADAS *et al.*, 1999; MORRIS *et al.*, 1995). Esta diminuição pode ser conservativa, devido à diluição (quando ela ocorre de forma linearmente proporcional ao aumento da salinidade) ou não conservativa (a diminuição não acompanha linearmente o aumento da salinidade). Este padrão de variação ocorre em função de que a origem destes compostos, natural ou antropogênica, está geralmente associada à bacia de drenagem. Entretanto este padrão pode ser modificado, se o aporte antropogênico for expressivo ao longo do gradiente de salinidade, em função das atividades desenvolvidas na região de entorno do corpo hídrico. O uso não passivo do solo (agricultura, urbanização) nas adjacências de corpos d'água resulta em aumentos das entradas de material particulado e dissolvido para o

sistema e, portanto, na diminuição da qualidade da água do corpo hídrico (BASNYAT *et al.*, 1999).

Com relação ao uso do solo na porção final da bacia de drenagem do Itajaí, embora a maior cobertura da área estudada ainda seja mata nativa, elas se concentram principalmente nas regiões mais elevadas da bacia (anexos 1 a 7). As principais atividades de influência antropogênica, potencialmente mais impactantes, como urbanização e agricultura, estão concentradas principalmente às margens do rio e estuário do Itajaí (anexos 1 a 7, Figura 4). Dentro das áreas urbanizadas destacam-se as regiões de Blumenau e Gaspar, na região do alto estuário e Itajaí e Navegantes, já na foz (Figuras 3).

O padrão de variação espacial das variáveis indicativas da qualidade da água refletiu a influência das atividades desenvolvidas no seu entorno, com destaque para a urbanização, além da influência marinha, na extremidade estuarina do sistema. O estuário do Itajaí é um sistema estratificado, do tipo cunha salina (SCHETTINI *et al.*, 1996), de modo que a penetração da água do mar ocorre pelo fundo, formando a cunha salina. Durante o período de estudo foi observada influência direta da água do mar até a estação #7, situada cerca de 17 km a montante da desembocadura, principalmente no fundo. Esta tendência está de acordo com SCHETTINI (2002b), segundo o qual a intrusão salina pode se estender até 30 km a montante da desembocadura. Na estação seguinte (estação #6), situada a 36 km da desembocadura, não foi observada influência da salinidade, com a presença de água de origem fluvial durante todo o estudo (Figura 7). Desta forma, uma primeira distinção pôde ser feita ao longo do sistema estudado, com as estações #0, #1, #2, #3, #5 e #6 apresentando apenas água fluvial e as estações #7 e #9 sofrendo efeito da mistura das águas de origem marinha e fluvial. É importante ressaltar que as estações correspondentes ao curso principal do estuário correspondem

às de número #1, #2, #3, #5, #6, #7 e #9. A estação #0 é uma estação fluvial amostrada apenas como estação de referência, como um ponto branco, para avaliar a qualidade da água em um local pouco impactado. A estação #8 corresponde ao principal tributário do estuário, o Rio Itajaí Mirim, que desemboca entre as estações #7 e #9 (Figura 3).

O resultado da análise de agrupamento efetuado sobre as médias espaciais de cada estação (Figura 22) evidenciou a compartimentação do sistema. A primeira tendência mostrada foi a separação da estação #0 de todas as demais. Esta tendência refletiu o grau de ocupação da região de entorno deste ambiente sobre as variáveis indicativas da qualidade de água. Situada em um local com pouca influência antropogênica, a estação #0 apresentou os melhores indicadores de qualidade de água de todas as estações, com os maiores valores de oxigênio dissolvido (Figura 9) e menores concentrações de nutrientes (Figuras 10, 11, 12, 14, 15), MPS (Figura 16) e compostos orgânicos (Figuras 17, 18, 19 e 20) de todo o estudo.

Em seguida a análise de agrupamento individualizou as estações que apresentaram características predominantemente fluviais, (#1, #2, #3, #5 e #6) daquelas com influência da salinidade (#7, #8 e #9). As estações fluviais foram marcadas pelas concentrações elevadas de fosfato e nitrato (Figuras 10 e 14). Considerando o ambiente fluvial, as estações #1 e #2, que corresponderam à extremidade do sistema (municípios de Indaial e Blumenau) foram separadas das estações #3, #5 e #6 (municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota). Entre estes compartimentos, encontra-se a o centro urbano de Blumenau, que é cortado pelo Rio Itajaí. Esta separação refletiu, portanto, a influência do município de Blumenau sobre a composição química da água. Neste segmento de rio foram observados aumentos nas concentrações de matéria orgânica, indicados pelo COP e DBO (Figuras 17 e 20) e de amônio e fosfato (Figuras 12 e 14), todos indicativos de entradas recentes de esgotos.

O município de Blumenau é um dos mais importantes e populosos municípios catarinenses, e como quase todo o estado, não apresenta sistema de coleta e tratamento de esgotos domésticos. Este aumento dos indicadores de matéria orgânica e amônio e fosfato refletiram esta precariedade. Além da influência dos esgotos, o escoamento superficial de áreas urbanas também mostra correlação com a deterioração da qualidade da água de rios e estuários (JENG *et al.*, 2005; CRABILL *et al.*, 1999). Foi observada também diminuição progressiva do oxigênio dissolvido (Figura 9) a partir da estação #3 até a desembocadura do estuário, o que é um indicativo do aumento de seu consumo para oxidar a matéria orgânica presente.

O grupo seguinte, formado pelas estações #3, #5 e #6 foi chamado de Alto Estuário, e corresponde à porção estuarina sem influência direta da salinidade. Este compartimento corresponde, além do município de Blumenau, aos municípios de Gaspar e Ilhota. Nestes dois últimos a agricultura se estende por uma grande área, com destaque para o cultivo de arroz irrigado, desenvolvido às margens do estuário e se estendendo até a porção rural do município de Itajaí. Esta região é marcada pela quase ausência da mata ciliar em praticamente toda sua extensão (RÖRIG, 2005), o que, em conjunto com a atividade agrícola, explicou o aumento do MPS observado na estação #6 (Figura 16).

As estações #7 e #9 e a estação #8 formaram o grupo que sofre influência da salinidade, correspondendo, respectivamente, ao Médio e Baixo Estuário do Itajaí e Rio Itajaí-Mirim (Figura 22). Esta região foi marcada pela diminuição do fosfato (Figura 14) e nitrato (Figura 10) e aumento do amônio (Figura 12) e nitrito (Figura 11). Este padrão de variação está associado ao efeito combinado do aumento da influência da água de origem marinha, com a aproximação da desembocadura, e à passagem do estuário pelas cidades de Itajaí e Navegantes. Também foi observado aumento de

clorofila-a na estação #9, correspondendo à desembocadura do estuário (Figura 21), única estação que apresentou valores significativos desta variável. O aumento da salinidade reflete o aumento da influência marinha no sistema, resultado da penetração da cunha salina. Como a água marinha apresenta concentrações baixas de nutrientes e matéria orgânica, se comparadas às águas fluviais, esta influência provoca diluição sobre as concentrações destas substâncias. Assim, com o aumento da salinidade é esperado que ocorra diminuição nas concentrações destas substâncias. De fato, para o nitrato e fosfato foi o que ocorreu. O nitrato representa a forma mais oxidada de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID). Ele é formado pela oxidação do amônio em nitrito e finalmente em nitrato, através da nitrificação (WADA & HATTORI, 2000). Sua presença na água é um indício de uma entrada não recente no sistema, estando associado provavelmente à drenagem continental e ao efeito de entradas difusas, através do escoamento superficial. Sua diminuição na extremidade estuarina pode, assim, ser explicada pela diluição pela água do mar.

A origem do fósforo está relacionada ao intemperismo da crosta terrestre, sendo carregado, na forma particulada e dissolvida, pelas águas fluviais (ASTON, 1980). Ele também pode ser originado pela entrada de esgotos domésticos e industriais e a partir de seu uso na agricultura. O aumento das entradas antropogênicas de fósforo resultam geralmente em aumento da fração inorgânica dissolvida, o fosfato (MEYBECK, 1982). Entretanto, estes aumentos podem ser mascarados pela interação do fosfato com o material particulado, em função da tendência de adsorção do fosfato, o que funciona como um mecanismo que “tampona” as concentrações de fosfato em águas superficiais (ASTON, 1980, SPENCER, 1975). Em regiões que apresentam baixa concentração de MPS, as concentrações de fosfato podem também ser influenciadas pela assimilação fitoplanctônica, resultando em concentrações reduzidas de fosfato

quando as concentrações de clorofila são elevadas (LEBO & SHARP, 1993). A diminuição do fosfato no médio e baixo estuário está relacionada, portanto, ao efeito combinado da diluição provocada pela entrada da água costeira no estuário associada ao efeito da assimilação fitoplanctônica no baixo estuário, única região que apresentou valores significativos de clorofila-a. Dados de produtividade primária do Baixo Estuário do Itajaí sugerem que o fosfato atua como fator limitante à produção biológica na região limite de influência da pluma estuarina e região costeira em situações de baixa descarga fluvial (PEREIRA FILHO *et al.*, submetido).

Apesar da diminuição de nitrato e fosfato, o amônio e nitrito apresentaram aumento nas proximidades da desembocadura do estuário, fato já relatado em estudo anterior (PEREIRA FILHO *et al.*, 2003). Estes aumentos refletem a influência da passagem pelos municípios de Itajaí e Navegantes e do Rio Itajaí Mirim sobre a composição química da água estuarina. Somadas, a população de ambos os municípios supera 200.000 habitantes. Nenhum deles apresenta sistema de coleta e tratamento de esgotos domésticos, resultando em uma grande carga de amônio no sistema. Além disso, as cidades de Itajaí e Navegantes representam o maior porto do Brasil em desembarque de pescado (GEP, 2001). Uma fração significativa deste pescado é processado nas indústrias situadas às margens do estuário, totalizando em torno de 66 indústrias cadastradas na região (GEP, 2001). O processamento de pescado resulta em uma liberação de água residuária que apresenta tipicamente elevadas concentrações de N, principalmente na forma de amônio (UNEP, 2001), além de fósforo e outros compostos orgânicos. Desta forma, o efeito da entrada da água marinha no estuário, que tende a reduzir as concentrações de amônio por diluição, é insuficiente para reduzir as concentrações deste nutriente no sistema, o que sugere que a carga de amônio e/ou de matéria orgânica que aporta no sistema seja bastante significativa. O aumento do nitrito

acompanhou o aumento do amônio, resultado da nitrificação no estuário. A variação das diferentes formas de NID resultou no aumento progressivo da influência do amônio sobre o NID (Figura 13) ao longo do estuário.

A variação do Si (H_4SiO_4) mostrou um comportamento singular. Tendo sua origem relacionada ao intemperismo da crosta, o Si, de forma geral, apresenta variação relacionada ao aumento do grau de exposição do solo. Entretanto, avaliando-se as médias por estação (Figura 15b), sua distribuição não demonstrou essa relação. As concentrações médias de Si se mostraram relativamente constantes ao longo do estuário, apesar do aumento da atividade agrícola na região de entorno das estações 5, 6 e 7. Aparentemente isso indicaria que ele não estaria sofrendo o efeito de processos biogeoquímicos que resultassem em seu aumento ou consumo. Entretanto se for considerada sua variação temporal (Figuras 15 a e b), observa-se que ele apresentou um comportamento complexo, não associado apenas ao grau de exposição do solo, mas também ao ciclo da principal atividade agrícola da região, a rizicultura. Assim, o comportamento do Si no estuário será abordado posteriormente, considerando sua variação temporal.

Merece destaque também o Rio Itajaí-Mirim (estação #8), cuja confluência com o estuário é localizada próxima à sua desembocadura (Figura 3). Este rio apresentou as condições químicas mais alteradas entre todas as estações avaliadas, o que é mostrado pelas maiores concentrações de nitrito, amônio, MPS, fósforo total e orgânico e DBO (Figuras 11b, 12b, 16b, 18b, 19b e 20b). Este tributário pode ser considerado uma outra fonte de influência negativa sobre a características do estuário do Itajaí. Estas alterações das características do Rio Itajaí Mirim está relacionada ao fato dele receber toda a influência do município de Brusque, outro importante centro urbano do estado e também por drenar extensas áreas agrícolas.

Esta tendência de variação foi corroborada pela análise em componentes principais realizada sobre os dados médios espaciais. A distribuição das variáveis ao longo do primeiro eixo (Figura 23) mostrou que associação entre as variáveis indicadoras da presença de matéria orgânica e material particulado (POT, POD, PT, COP, MPS e DBO), que se posicionaram na extremidade negativa do eixo. Também do lado negativo foram posicionados os nutrientes. Em oposição, na extremidade positiva, ficaram o oxigênio dissolvido e pH. Este primeiro eixo refletiu portanto a variação da qualidade da água do sistema. O segundo eixo mostrou, na extremidade positiva, a salinidade e pH, seguidos pelo nitrito, clorofila e amônio. Do lado oposto, ficaram o oxigênio dissolvido, o fosfato e o nitrato. O segundo eixo refletiu a influência da água marinha sobre o estuário em oposição com o ambiente fluvial.

A compreensão da distribuição das variáveis ficou mais clara quando foi analisada a distribuição das estações amostrais sobre o plano fatorial formado pelos eixos 1 e 2 (Figura 24). A estação #0, que apresentou as melhores condições de água do sistema, foi posicionada na extremidade positiva do eixo 1. Em oposição, na extremidade negativa, foi plotada a estação #8, o Rio Itajaí Mirim, que apresentou o pior conjunto de valores, com elevadas concentrações de nutrientes e matéria orgânica e baixos valores de oxigênio dissolvido. Entre estes 2 extremos, foram ordenadas as demais estações do estuário do Itajaí, refletindo a variação das condições limnológicas em função das atividades desenvolvidas na bacia. Neste contexto é importante notar que a estação #9F, que corresponde às amostras de fundo do baixo estuário se posicionou do lado positivo do eixo, mostrando a melhora nos indicadores em função da entrada da água do mar. O segundo eixo mostrou a separação das estações amostrais em função da salinidade. Na extremidade positiva, influenciadas pela salinidade e pH, foram posicionadas as estações do baixo e médio estuário e o Rio Itajaí Mirim. Na

extremidade oposta foram posicionadas as estações #1 e #2, que formaram o grupo Extremidade Fluvial, na análise de agrupamento, e as estações #3, #5 e #6, que correspondem ao Alto Estuário. Esta caracterização espacial mostrou um panorama geral do estuário do Rio Itajaí, a partir das médias das variáveis por estação de amostragem. Para uma análise mais aprofundada, é necessária uma abordagem que leve em consideração as alterações temporais das variáveis e as forçantes responsáveis por estas variações.

5.2. Variação Temporal:

As concentrações da matéria orgânica e de compostos biologicamente ativos, como os nutrientes, em rios e estuários, são influenciadas de maneira complexa por uma gama de processos biogeoquímicos. Estes processos podem estar relacionados diretamente ao corpo hídrico (adsorção, floculação, precipitação química, assimilação e regeneração biológica) ou ao seu entorno (intemperismo, uso do solo, precipitação pluviométrica, escoamento superficial, etc) e são diretamente influenciados pela descarga fluvial e mistura com água do mar. A interação destes processos determina os fluxos destes compostos ao longo dos sistemas fluviais e estuarinos. Como estes processos atuam de forma simultânea e variável no tempo e no espaço, a avaliação da importância de cada um deles na determinação das concentrações dos compostos é extremamente difícil.

A descarga fluvial é apontada como um dos fatores de grande importância no controle da hidrodinâmica e, portanto dos processos biogeoquímicos, em ambientes fluviais e estuarinos (BORSUK *et al.*, 2004; DAGG *et al.*, 2004; TAPPIN, 2002; MULLER-KARULIS, 1999; SCHETTINI *et al.*, 1998; DYER, 1997). A média histórica da descarga fluvial diária no Rio Itajaí, medida na estação de Indaial entre 1934 e 1998,

foi de 228 m³/s, com valores variando entre 17 e 5390 m³/s (SCHETTINI, 2002). A variabilidade na descarga fluvial é elevada e não existe um padrão sazonal claro referente aos picos de descarga. Períodos de baixa descarga são intercalados por pulsos de alta descarga, que ocorrem com mais frequência em fevereiro e outubro, mas com grande variabilidade inter-anual (SCHETTINI, 2002).

No presente estudo, a descarga foi marcadamente elevada entre setembro e dezembro de 2004. Neste período, dois grandes picos foram registrados, nos dias 14 de setembro e 25 de outubro de 2004, atingindo 1740 e 1940 m³/s, respectivamente (Figura 5). No restante do ano a descarga foi baixa, principalmente no início de 2004, entre janeiro e abril (Figura 5). Alguns picos menores também foram registrados em dezembro de 2003 e julho de 2004. A variação da descarga fluvial mostrou ser um importante determinante da variação temporal das características do sistema, em grande escala. Entretanto a resposta de cada variável à variação da descarga mostrou ser complexa, de modo que não foi encontrada uma correlação simples e direta entre descarga e as variáveis monitoradas. Este fato sugere que o funcionamento do sistema fluvial-estuarino está sujeito à interação de um conjunto de fatores que devem ser avaliados simultaneamente, para a compreensão do sistema.

De forma geral o aumento da descarga resultou em aumento do material particulado (MPS, PT e POT), nitrato e oxigênio dissolvido e diminuição da salinidade e nitrito. Foi o caso dos picos de descarga registrados em dezembro de 2003 e julho e outubro de 2004 (Figura 5). Também a duração dos períodos de aumento de descarga mostrou ser importante na variabilidade do sistema. Períodos prolongados de maior descarga, como o de setembro a dezembro de 2004, foram marcados pela diminuição progressiva do amônio e nitrito e por valores mais elevados de MPS, PT e POT.

Por outro lado, outras variáveis também se mostraram relacionadas ao aumento da descarga em determinadas situações. Assim, o grau de influência da descarga fluvial sobre o sistema foi variável, não estando relacionado apenas ao seu valor absoluto. Um exemplo foi o grande pico de descarga registrado em 16 de setembro de 2004 (Figura 5). Embora a descarga tenha atingido o segundo maior pico do período estudado ($1738 \text{ m}^3/\text{s}$) no dia anterior ao da amostragem, ela não foi marcada por um grande aumento no MPS como em outras situações. Entretanto foram observados aumentos do nitrato, silício e COP (Figuras 10 a e c e 17 a e c) e diminuição do fosfato e amônio (Figuras 12 e 15). Por outro lado, elevações menores da descarga, como os registrados em dezembro de 2003 e julho de 2004 resultaram em aumentos de PT e POT e MPS (não há dados de MPS para dezembro de 2003). Esta variedade na resposta do sistema à descarga fluvial sugere que outros fatores estão atuando na determinação desta variação, além da descarga. Uma hipótese seria a atuação diferenciada do aumento da descarga fluvial, resultado do aumento da pluviosidade, em períodos onde a atividade agrícola estivesse aumentando o grau de exposição do solo às margens do estuário. Esta associação poderia estar relacionada, por exemplo, ao ciclo do cultivo de arroz irrigado, principal atividade agrícola desenvolvida às margens do estuário. As análises multivariadas efetuadas, através da análise de agrupamento e ACP, auxiliaram na determinação desta variabilidade.

A análise de agrupamento dividiu o período amostral em dois grandes grupos (Figura 25), correspondendo, aproximadamente à primeira e segunda metade do período amostral. O primeiro agrupamento correspondeu, de forma geral, ao período de baixa descarga fluvial. No segundo agrupamento, a descarga foi mais elevada, particularmente de setembro a dezembro de 2004. Desta forma a descarga fluvial foi a principal forçante responsável por esta primeira grande tendência. A formação dos

subgrupos em cada um destes grandes períodos resultou da combinação da descarga fluvial e de sua influência sobre as variáveis do sistema em diferentes momentos do ano. Os subgrupos formados, numerados em ordem seqüencial (Tabela 7), são mostrados em conjunto com a variação da descarga fluvial (Figura 26).

As tendências mostradas pela análise de agrupamento foram corroboradas pela ACP e serão discutidas em função dos subgrupos formados, em cada situação. O eixo 1 refletiu a grande influência da descarga fluvial sobre a dinâmica do sistema, colocando em oposição o período de descarga mais elevada (grupo 4) contra o período mais seco, com maior influência da salinidade no estuário (grupo 2). Os grupos 1 e 3 apresentaram, de forma geral, amostras com descargas intermediárias e variáveis.

5.2.1. Período 1: Outubro/Novembro de 2003 e Agosto/Setembro de 2004

O período 1 foi o período mais peculiar dentro deste estudo. Ele foi formado por meses consecutivos, mas de anos distintos. As amostragens de outubro de 2003 foram agrupadas junto com as do final de agosto e início de setembro de 2004, além dos dias 12 e 19 de dezembro de 2003 e 08 de julho de 2004. Este período apresentou em geral, baixa descarga fluvial, mas com certa variabilidade, em função dos aumentos registrados nos dias 12 e 19 de dezembro e julho de 2004 (Figura 26).

As campanhas do período foram ordenadas no lado positivo do eixo 2 da ACP, mas mostrando certo “espalhamento” ao longo do eixo 1 (Figura 28). Esta distribuição mostra que o período tendeu a apresentar valores maiores das variáveis associadas positivamente ao eixo 2, como COP, MPS e fósforo. A distribuição das campanhas em relação ao eixo 1, por sua vez, mostra a influência da descarga fluvial sobre o período. Os aumentos de descarga resultaram no deslocamento das campanhas em direção à extremidade negativa do eixo 1, com aumento das variáveis situadas neste

quadrante, como o PT e MPS. Como as camanhas deste período apresentaram dispersão ao longo do eixo 1, a separação das mesmas das demais foi provocada pelo eixo 2. Entretanto, a contribuição de cada variável no lado positivo no eixo 2 foi pequena e variável, o que foi evidenciado pelas baixas coordenadas individuais das mesmas. Desta forma o que evidenciou claramente a formação deste grupo foi principalmente o silício, que ficou situado na extremidade negativa do eixo 2. Esta disposição mostra que o período foi marcado por concentrações reduzidas de silício. De fato, particularmente os meses de agosto/setembro de 2004 (Figura 15 a e c) mostraram as menores concentrações de todo o estudo.

O Si é um nutriente originado principalmente a partir do intemperismo da crosta. Considerando o uso agrícola do entorno do sistema fluvial-estuarino, o esperado era que o Si apresentasse associação com a descarga fluvial ou pelo menos com os demais nutrientes, como o nitrato e fosfato. A oposição do Si aos demais nutrientes e ao MPS foi, à primeira vista, incoerente. Entretanto, uma análise mais aprofundada no ciclo do cultivo do arroz irrigado, marcadamente a principal atividade agrícola da região do médio e baixo vale do Itajaí, ajuda a formulação de uma hipótese para explicar esta aparente incoerência.

Segundo dados da Empresa Agropecuária de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina (ICEPA, 2005), o ciclo do arroz dura em média 150 dias e tem início variável. Na região do médio e baixo vale do Itajaí, o início do ciclo ocorre entre junho e outubro, principalmente nos meses de julho e agosto. O início é marcado pelo preparo do solo, o que ocorre em solo seco. Ele consiste da aragem e aplainamento da terra, que fica totalmente exposta. A ocorrência de chuvas neste período resultaria em grande carreamento de sedimentos para o corpo hídrico, já que a área utilizada para o plantio é localizada às suas margens, onde a mata ciliar é praticamente inexistente. Em seguida,

no fim de julho e início de agosto, é iniciada a captação de água para saturação do solo. O volume de água utilizada para saturação do solo varia entre 1000 e 2000 m³/ha (ICEPA, 2005). O plantio, feito com semente pré-germinada, é realizado de agosto a novembro, quando também é feita a adubação com fertilizantes a base de N e P (Figura 50). Posteriormente os arrozais são drenados, em uma vazão aproximada entre 2 e 3 l/ha/s. Considerando a área usada para o cultivo de arroz na região do baixo vale do Itajaí (municípios de Gaspar, Ilhota, Itajaí, Luis Alves e Navegantes) de 8600 ha, esta descarga seria de 21,5 m³/s, um valor significativo para a descarga do rio Itajaí, se for considerado, por exemplo, o mínimo de descarga fluvial registrado ao longo deste estudo (48 m³/s). Posteriormente à drenagem, o fluxo de manutenção das culturas é de 1 l/ha/s (8,6 m³/s) com drenagens parciais antes do fim do ciclo, que termina entre dezembro e fevereiro. Além do efeito sobre a descarga fluvial e sobre as entradas de sedimentos e nutrientes, marcadamente N e P, o cultivo do arroz aparentemente provocou diminuição nas concentrações Si no estuário.

Estudos têm apontado o arroz como acumulador de Si, mostrando que sua concentração nas folhas da planta pode atingir valores superiores a 10% em massa, o que é muito superior a outros nutrientes como N e P (TAKAHASHI *et al.*, 1990; TAKAHASHI, 1995). As raízes assimilam o Si na forma de ácido silícico e a taxa de assimilação é mais rápida que a absorção de água, resultando em rápida diminuição nas concentrações de Si na água (OKUDA & TAKAHASHI, 1962 *apud* MA *et al.*, 2001). Desta forma, a hipótese é que o período 1 deste estudo, que apresentou como característica marcante os baixos valores de Si, foi individualizado em função da influência da rizicultura sobre o sistema, que se tornou evidente em função do período de baixa descarga fluvial. O eixo 2 da ordenação refletiria esta influência. As amostras individualizadas neste período seriam correspondentes ao início do ciclo do arroz

(outubro de 2003 e agosto/setembro de 2004), momento de maior crescimento e absorção de Si pelas plantas. Esta influência deixou de ser evidente a partir de meados de setembro em função do aumento da descarga fluvial, que passou a ser a forçante de maior importância a partir deste momento.

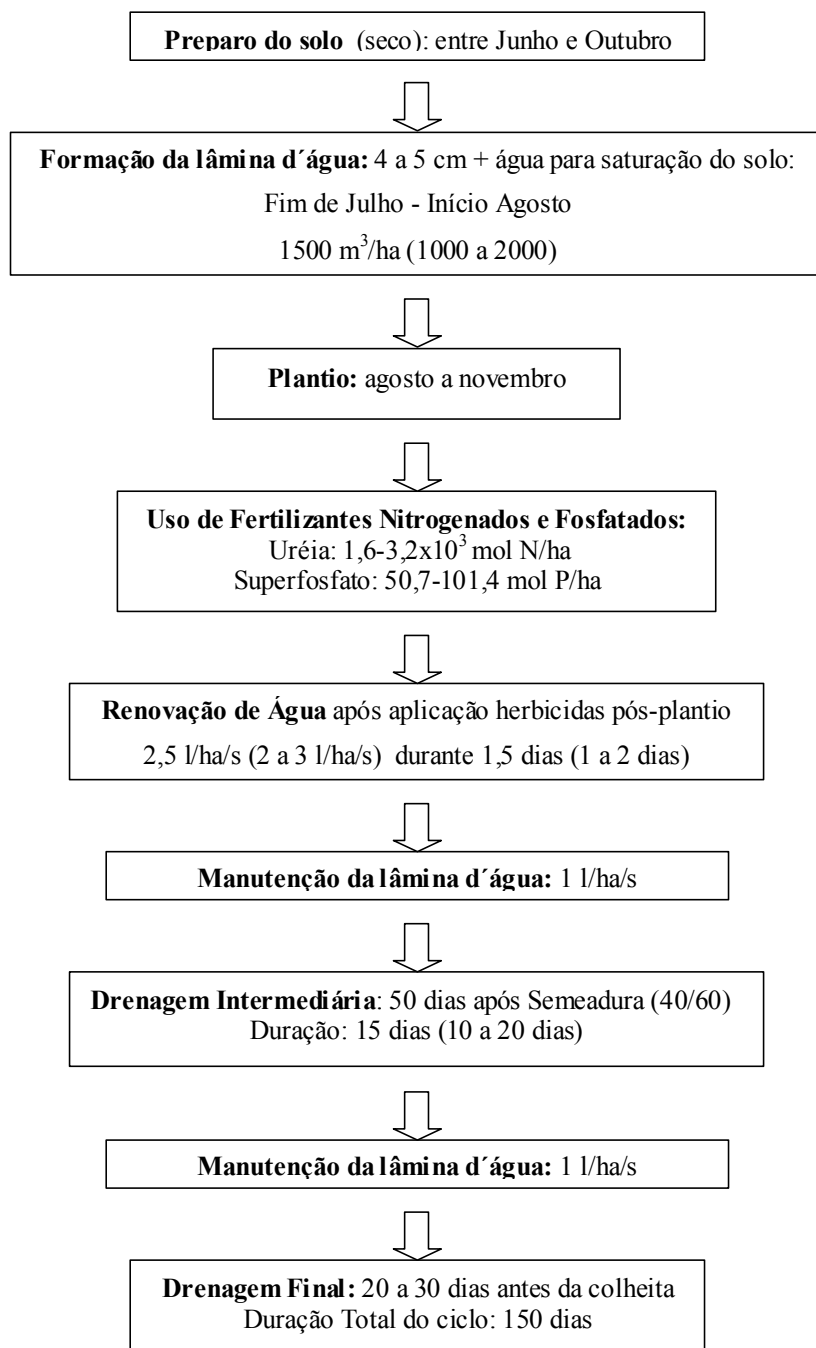


Figura 50: Fluxograma ilustrando ciclo de cultivo do arroz irrigado na região do médio e baixo vale do Itajaí, SC.

5.2.2. Período 2: Novembro de 2003 a Abril de 2004

Correspondendo ao período compreendido entre o final de novembro de 2003 e abril de 2004, ele foi caracterizado pela baixa descarga fluvial, que atingiu o valor mínimo de todo o estudo, em março de 2004 ($48 \text{ m}^3/\text{s}$), correspondendo também ao período mais quente do ano (Figura 6 a e c). As amostras deste período foram posicionadas, principalmente, na extremidade positiva do eixo 1 da ACP (Figura 28), influenciadas diretamente pela salinidade, nitrito e temperatura e inversamente pela descarga fluvial, PT e oxigênio dissolvido (Figura 27).

O eixo 1, como comentado anteriormente, refletiu a influência da descarga fluvial sobre o sistema. Como a descarga foi muito baixa no período, este foi o momento em que a extremidade estuarina sofreu a maior influência marinha, mostrada pelo aumento da salinidade, principalmente em março e abril (Figura 7 a e c). Outro fato marcante, e que também foi evidenciado pela ACP, foi a elevação significativa do nitrito no período, registrado principalmente na região do médio estuário (Figura 11 a). O nitrito pode ser formado pela nitrificação do amônio ou pela redução do nitrato. Como as bactérias responsáveis pela redução do nitrato são inibidas pela presença do oxigênio (WADA e HATTORI, 2000), a elevação do nitrito é um indicativo claro da nitrificação, muito intensa no período. Dois fatores em conjunto explicam a intensidade do processo: a elevação do tempo de residência da água no estuário, devido à baixa descarga, e a alta temperatura.

A baixa descarga fluvial resulta em um maior tempo de residência da água no estuário, diminuindo sua velocidade de saída. Esta velocidade menor, associada ao efeito da temperatura elevada, permitiu que a nitrificação ocorresse dentro do estuário de forma intensa. A nitrificação é iniciada com a oxidação do amônio em nitrito e depois em nitrato. Entretanto, o primeiro passo da nitrificação é mais lento, de modo

que o acúmulo de nitrito, com a presença de oxigênio, é um indicativo deste processo (WADA e HATTORI, 2000).

O período também foi marcado pelas baixas concentrações de oxigênio dissolvido (Figuras 6 a e b), as menores deste estudo, quando suas concentrações ficaram em torno de 3 mg/l. Esta diminuição do oxigênio dissolvido pode ser atribuída a um conjunto de fatores. Em primeiro lugar a redução da dinâmica do sistema, em função da diminuição do fluxo de água doce, dificulta as trocas do oxigênio com a atmosfera, devido à menor turbulência no sistema. Ela também aumenta o tempo de residência no estuário, o que permite que os processos de decomposição da matéria orgânica e a nitrificação sejam concentrados dentro da bacia estuarina. Além disso, a temperatura elevada do período também provoca diminuição da solubilidade do oxigênio dissolvido. Como as entradas antropogênicas não sofrem diminuição na mesma proporção que a descarga fluvial, o corpo aquático apresenta menor capacidade de dispersão e diluição das entradas orgânicas, que contribuem com a redução do oxigênio dissolvido. Esta evidência é reforçada pelos valores elevados de COP registrados entre março e abril ao longo de todo o estuário (Figuras 17 a e b) e pela elevação do amônio na extremidade estuarina (Figura 12 a).

O aumento do amônio na extremidade estuarina, apesar da influência do efeito de entrada da água marinha, reforça a hipótese da importância do aporte de matéria orgânica rica em nitrogênio a partir da indústria pesqueira em Itajaí e Navegantes, além da entrada de esgotos domésticos. Por outro lado, o nitrato e fosfato na mesma região mostraram concentrações menores (Figuras 10 a e 14 a), o que neste caso pode ser explicado pela diluição pela água marinha. Este padrão de variação mostra a origem diferente do amônio e nitrato, o primeiro associado à entradas no baixo

estuário e o nitrato à entradas mais antigas, associadas por exemplo ao escoamento superficial e à água fluvial.

Em síntese, o efeito combinado da baixa descarga fluvial por um longo período de tempo, associada à temperatura elevada e às entradas antropogênicas foi responsável pela diminuição do oxigênio dissolvido a níveis alarmantes. Esta situação pode ser um primeiro sinal do desenvolvimento de hipoxia no estuário. Os dois principais fatores que levam ao desenvolvimento de hipoxia são a estratificação da coluna d'água, o que isola a água de fundo das trocas com a atmosfera e a decomposição de matéria orgânica no fundo, o que reduz os níveis de oxigênio (DIAZ, 2001). Ambas as condições são comuns no médio e baixo estuário do Itajaí, em situação de baixa descarga, como as encontradas neste período. Eventos de hipoxias anuais de verão vêm sendo observados em vários ecossistemas ao longo do mundo, associados sempre à influência antropogênica e à diminuição da energia dos sistemas aquáticos (DIAZ, 2001). No caso do estuário do Itajaí-Açú, a constante atividade de dragagem do canal acesso ao porto de Itajaí também pode potencializar a hipoxia no sistema. A dragagem é feita por injeção de água, fazendo com que os sedimentos sejam ressuspensos e carregados pelo fluxo de água. Essa ressuspensão disponibiliza sedimentos reduzidos para a coluna d'água, o que representa uma diminuição adicional do oxigênio dissolvido da água.

5.2.3. Período 3: Maio a Agosto 2004

O período de maio a agosto correspondeu a um período de diminuição da temperatura, caracterizando o início do inverno (Figuras 6 a e c). Com isso, o período foi marcado também pelo aumento da entrada de frentes frias, resultando em aumento da pluviosidade e pequeno aumento da descarga fluvial (Figura 5) em relação ao

período anterior. Esta tendência se refletiu na distribuição das amostras em relação ao plano fatorial formado pelos eixos 1 e 2 da ACP (Figuras 27 e 28). Elas foram posicionadas, em relação ao eixo 1, em uma posição intermediária entre os grupos 2 e 4, representando assim, um período de transição do sistema de baixa (período 2) para alta descarga fluvial (período 4). Com relação ao eixo 2, elas ficaram na porção negativa, “puxadas” principalmente pelo silício.

O silício, que já vinha apresentando aumento progressivo desde de janeiro (Figuras 15 a e c), mostrou concentrações elevadas entre maio e junho. Esta variação do Si, com tendência à sazonalidade, é mais um indício da influência da rizicultura sobre as concentrações de silício no estuário do Itajaí. Como o final do ciclo da rizicultura ocorre por volta de janeiro, ele deixaria de influenciar diretamente as concentrações de Si no sistema, isto é, o silício deixa de ser removido pela rizicultura. Assim, as concentrações demonstraram aumento progressivo até a retomada do ciclo, a partir de julho e agosto, como já foi discutido anteriormente.

Outra tendência observada neste período foi o aumento do oxigênio (Figura 9 a). A diminuição da temperatura e o aumento da descarga, ainda que pequenas, ajudam a explicar o aumento do oxigênio no período, que não atingiu valores tão baixos como no período anterior (Figura 9 a). Da mesma forma, o nitrito também demonstrou diminuição progressiva das concentrações até o período seguinte (Figura 11 a e c), e os grandes picos de nitrito no médio estuário não foram mais registrados.

Também foram marcantes os aumentos de MPS, COP, PT e POT e DBO (Figuras 16, 17, 18, 19 e 20), registrados em meados de julho, o que coincidiu com os picos de descarga, quando ela atingiu valores de até 800 m³/s. Foi surpreendente o grande aumento registrado, principalmente de material particulado, o que não foi observado em outras situações, mesmo com elevações superiores de descarga. Este

aumento pode ser explicado em função de ter coincidido com a época de preparo do solo para a agricultura, o que aumenta a exposição do solo, que fica vulnerável à lixiviação pelas chuvas.

Em resumo, este período foi marcado pela transição do sistema, passando de um momento de descarga fluvial muito baixa e, portanto de baixas concentrações de oxigênio, para um momento de maior dinâmica que será discutido em seguida. Também mostrou aumento progressivo do silício, resultado do período de entressafra do arroz na região.

5.2.4. Período 4: Setembro a Dezembro de 2004

O período 4 foi marcado pelo grande aumento da descarga fluvial, o que ocorreu a partir de 15 de setembro, quando foi registrada uma das maiores descargas do estudo, superior a 1500 m³/s. A grande mudança no regime de descarga fluvial provocou grandes mudanças do sistema. Avaliando-se a ACP, observa-se que as amostras incluídas neste grupo se situaram no quadrante negativo, formado pelos eixos 1 e 2 (Figura 27 e 28), estando associadas diretamente à descarga fluvial, oxigênio dissolvido e fósforo total. Embora as amostragens realizadas logo após os picos de descarga tenham sido excluídas dos grupos formados, elas serão discutidas em conjunto, por representarem o início da mudança do sistema.

Os meses de agosto e setembro foram marcados pela diminuição progressiva do Si e aumentos do fósforo, o que foi atribuído ao início do ciclo do arroz, como foi discutido no grupo 1. Entretanto, com a grande descarga registrada em 15 de setembro, a influência da rizicultura sobre o estuário foi sobrepujada pelo efeito da descarga. A consequência imediata foi a grande elevação do nitrato (Figuras 10 a e 10 c), fósforo (Figuras 14 a e 14 c) e COP (Figuras 17 a e c). Surpreendentemente não foi

observado aumento significativo do MPS, como o observado em julho, provavelmente em função da menor exposição do solo usado na agricultura.

Ao longo do período, com as descargas elevadas, o estuário mostrou menor influência da água do mar, o que é mostrado pela diminuição da salinidade na extremidade estuarina (Figuras 7 a e c). Com o menor tempo de residência na bacia estuarina e aumento da hidrodinâmica, o oxigênio dissolvido mostrou aumento em todo o estuário (Figuras 9 a e c). Pelo mesmo motivo, o nitrito e amônio tenderam a diminuir (Figuras 11 e 12) até o final de dezembro, mostrando o efeito da dispersão e diluição do sistema e a conseqüente diminuição relativa da importância das entradas antropogênicas. Por outro lado, o nitrato e silício mostraram valores mais elevados no período, (Figuras 10 e 15), sugerindo que estes nutrientes estão associados ao aumento do escoamento superficial. No caso do silício, esta relação só se tornou evidente neste período em função dos altos valores da descarga fluvial, cujo efeito foi superior à sua remoção pela rizicultura, como foi proposto anteriormente.

Em suma, o período mostrou que os pulsos de descarga fluvial funcionam como um mecanismo que “lava” o estuário, modificando o funcionamento do mesmo e dispersando e diluindo os compostos de origem antropogênica. Estes pulsos também tendem a aumentar o material particulado, e este aumento pode ser muito mais significativo se os picos de descarga ocorrerem em períodos de preparação do solo para uso agrícola.

5.3. Balanço de Massa:

Inicialmente foi feito o cálculo do balanço de Si para o período 1, que correspondeu ao período sob maior influência do cultivo do arroz irrigado. Este cálculo foi feito com o intuito de avaliar a influência da rizicultura sobre os fluxos de Si, que foi

evidenciada anteriormente. Entretanto os balanços de N e P, relacionados ao ciclo da matéria orgânica foram calculados para os períodos extremos de descarga fluvial.

Para avaliar a importância das principais vias de entrada e remoção de nutrientes e matéria orgânica no estuário, foram determinados os fluxos de fosfato e nitrogênio inorgânico dissolvido entre os compartimentos definidos através da análise de agrupamento. Os fluxos foram calculados para os períodos extremos do estudo, o período de baixa descarga e o período de maior descarga. A partir da determinação dos fluxos, foi estabelecido um balanço de massa para os nutrientes com o objetivo de compreender o papel do estuário na sua ciclagem.

5.3.1. Período 1: Balanço de Si durante o ciclo da rizicultura

O período 1 foi marcado pela descarga fluvial variável, apresentando uma média de 170 m³/s. Este valor foi relativamente alto em função de alguns picos de descarga que foram incluídos neste grupo pela análise de agrupamento. O balanço foi simplificado e não foram incluídas estimativas das entradas devido ao escoamento superficial, como foi feito para os demais nutrientes.

A partir do balanço de água e sal para o período (Figura 29), foram obtidos os tempos de residência da água em superfície e fundo, de 14,7 e 49,6 horas, respectivamente. O balanço de Si (Figura 30) mostrou, de forma geral, aumento não conservativo (ΔSi) em todos os compartimentos do estuário, com exceção da camada superficial da região do médio estuário. Como já foi mencionado o Si é um dos principais constituintes da crosta terrestre e ele está geralmente associado ao intemperismo e lixiviação do solo. Assim, o aumento das entradas de Si é esperado com o aumento da exposição do solo e, portanto de seu intemperismo. No caso do estuário do Itajaí, em função da agricultura, a maior exposição ocorre na região do alto e médio

estuário. Entretanto foi na camada superficial do alto estuário o único compartimento que apresentou diminuição não conservativa de Si no período 1. Esta diminuição, equivalente a $-18 \text{ mmol Si.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, é mais uma evidência da influência da rizicultura sobre a água estuarina. Como a captação e devolução da água do estuário ocorrem na superfície, ela é a camada mais afetada por esta atividade. O aumento nos demais compartimentos pode ser atribuído ao efeito do intemperismo e escoamento superficial, além da interação com o sedimento. Entretanto a importância destes processos não foi contabilizada.

5.3.2. Período 2: Baixa Descarga

Com a descarga fluvial média de $97 \text{ m}^3/\text{s}$, o estuário apresentou os maiores tempos de residência da água neste período. Os tempos de residência, considerando todo o estuário foram de 23 horas para a camada superficial e de 65 horas para a camada de fundo (Figura 31). Estes tempos de residência estão um pouco superiores aos calculados por Zaleski & Schettini (2002), de 15 horas para a camada superficial e 50 para a camada de fundo. Essa diferença está relacionada à menor descarga fluvial do presente estudo. Os tempos de residência calculados, embora obtidos através de estratégias amostrais diferentes e em situações diferentes, foram bastante próximos, o que é um bom indicativo da confiabilidade do modelo utilizado. Os tempos de residência foram calculados considerando todo o médio e baixo estuário. Considerando-os separadamente, os tempos de residência do alto estuário para superfície e fundo seriam de, respectivamente 19 e 93 horas, o que mostra um aumento significativo, principalmente no fundo.

O balanço de água (Figura 31) mostrou que a descarga fluvial foi a principal via de entrada de água para o sistema. Entretanto no período de baixa

descarga, a entrada de água salgada para o sistema mostrou uma importância significativa, correspondendo a 54% do fluxo de água para o sistema. A influência da entrada da água marinha foi nítida no baixo e médio estuário nestas condições.

5.3.2.1. Fosfato:

O fluxo de fosfato através da descarga fluvial foi a principal via de entrada para o médio e baixo estuário (Tabela 9, Figura 32). Entretanto, particularmente no período de baixa descarga, as entradas antropogênicas foram elevadas, principalmente as entradas devido ao esgoto doméstico. No médio estuário, elas corresponderam a 30% do fosfato trazido pela descarga fluvial. Estas entradas foram ainda mais intensas no baixo estuário, em função dos centros urbanos de Itajaí e Navegantes. Mesmo com a influência do esgoto e escoamento superficial, as concentrações de fosfato na superfície do médio e baixo estuário foram menores que a do alto estuário. Esta diminuição poderia ser ocasionada pela diluição pela entrada da água salgada, o que não foi o caso. Assim, considerando os principais fluxos de fosfato para o médio e baixo estuário, o balanço correspondeu a uma diminuição não conservativa de fosfato de -14 mmol/d e -11 mmol/d, para o médio e baixo estuário, respectivamente (Figura 32). Esta diminuição poderia ser o resultado da assimilação fitoplanctônica, resultado da produção primária no sistema. Entretanto, em função da alta turbidez, as concentrações de clorofila registradas no médio estuário no período foram, de forma geral, baixas, inferiores a 2,0µg/l. Dados de produtividade primária no estuário mostram que ela é muito baixa, particularmente na região interna do estuário (PEREIRA FILHO *et al.*, submetido), de modo que a assimilação pelo fitoplâncton é, provavelmente, insignificante. Outra hipótese seria a remoção geoquímica, em função da interação do fosfato com o material em suspensão através da adsorção. A remoção por adsorção pode

ser muito importante em estuários onde a concentração de MPS é elevada e tem sido classicamente mencionada como um dos principais processos em estuários que apresentam alta turbidez (DAGG *et al.*, 2004, FOX *et al.*, 1986, MORRIS *et al.*, 1981). A remoção ocorre principalmente na região de baixa salinidade devido às elevadas concentrações de MPS e ao aumento do pH (LEBO & SHARP, 1992, FROELICH, 1988).

Comparando o médio e baixo estuário, observa-se que a diminuição mais significativa ocorreu no alto estuário, em função de sua maior dimensão. Entretanto, considerando-se o fluxo não conservativo por volume, verifica-se que valores maiores foram registrados no baixo estuário. Esta tendência pode ser explicada pelo consumo biológico, que no baixo estuário pode ser significativo, principalmente no período de baixa descarga. Assim, além da adsorção, a assimilação fitoplanctônica pode representar uma remoção extra de fósforo na extremidade estuarina do sistema. As concentrações de clorofila no baixo estuário, foram as maiores de todo o estuário, principalmente no período de baixa descarga. A importância de cada processo na remoção de fósforo é de difícil determinação, mas considerando a alta concentração de MPS, alta turbidez e as concentrações de clorofila, a adsorção é provavelmente o principal processo.

Em síntese o estuário no período de baixa descarga fluvial, mesmo com as incertezas envolvidas na determinação dos balanços, mostrou ser um importante sumidouro de fósforo. O estuário exportou para a região costeira aproximadamente $16,5 \times 10^6$ mmol P.d⁻¹. Considerando o balanço entre todos os fluxos de fósforo no médio e baixo estuário, pela drenagem continental, pelo aporte antropogênico ou através da intrusão da água do mar, aproximadamente 55% foram removidos do sistema. Este comportamento mostra a importância do sistema estuarino no controle das quantidades de fósforo exportadas para a região costeira.

5.3.2.2. Nitrogênio Inorgânico Dissolvido:

A ciclagem do nitrogênio em estuários é dependente de vários processos que resultam em seu consumo ou produção, além da interconversão das diversas formas de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID). O consumo de amônio, nitrito e nitrato pode ocorrer simultaneamente ao fosfato através do consumo fitoplanctônico. Na ausência do consumo competitivo pela assimilação fitoplanctônica, ocorre a nitrificação. A nitrificação bacteriana resulta em consumo de amônio, o qual é transformado em nitrito. Por outro lado, o amônio pode ser produzido, diretamente no sistema, em função dos processos de mineralização da matéria orgânica no estuário. Quando ocorre aumento no pH, parte do amônio pode passar para a forma não ionizada (NH_3), muito volátil e ser transferida para a atmosfera. O nitrito, formado pela oxidação do amônio, pode ser também oxidado até nitrato, o que corresponde ao segundo passo da nitrificação. Em condições de hipoxia, o nitrato pode ser reduzido a nitrito e a amônio. Em ambientes com elevada carga de matéria orgânica, o nitrato pode ser reduzido a nitrito e então a nitrogênio molecular (N_2) através da denitrificação, sendo então perdido para a atmosfera. O N também pode entrar no sistema através da fixação do N_2 por cianobactérias. Todos os processos podem ocorrer simultaneamente, de forma dinâmica, de modo que é difícil determinar exatamente a importância de cada um, avaliando-se apenas as concentrações dos compostos nitrogenados. Entretanto, a avaliação dos fluxos não conservativos das principais formas de NID pode dar indícios dos processos que estão ocorrendo ao longo do sistema estuarino.

Os balanços de amônio mostraram, em geral, aumentos não conservativos em todos os compartimentos do estuário, com exceção da camada superficial do médio estuário (Figura 33), que apresentou remoção. Como a assimilação fitoplanctônica no

alto estuário é provavelmente pouco expressiva, a remoção do amônio está relacionada ao processo de nitrificação. Berounsky & Nixon (1990) demonstraram que a nitrificação é muito sensível à temperatura, aumentando de forma exponencial com a mesma. Eles encontraram taxas de nitrificação, durante o verão, no estuário do Rio Providence (Narragansett Bay) de até $10 \text{ mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, na sua porção superior. No caso do médio estuário do Itajaí, a variação não conservativa de amônio, na superfície, foi de $-5,5 \text{ mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, podendo portanto, ser atribuída a nitrificação. As altas temperaturas e altas concentrações de nitrito do período apóiam esta evidência. Entretanto, o valor exato das taxas de nitrificação não pode ser determinado, já que a variação inclui também a formação do amônio através da mineralização da matéria orgânica, que pode estar subestimando parte da nitrificação.

Os demais compartimentos do estuário apresentaram aumento de amônio. Estes aumentos foram mais significativos no baixo estuário, onde o fluxo não conservativo foi de $7,0 \text{ mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ na superfície e de $16,7 \text{ mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ no fundo. Este aumento está provavelmente subestimado, pois quantidades variáveis foram nitrificadas dentro do estuário. Os aumentos de amônio, apesar da nitrificação, e até da assimilação fitoplanctônica na superfície do baixo estuário, sugerem que o metabolismo do sistema apresenta um balanço heterotrófico. Esta tendência pode ser decorrente da grande entrada de matéria orgânica no baixo estuário. As indústrias de processamento de pescado, por exemplo, além do lançamento de seus efluentes no estuário (o que foi estimado e contabilizado nos balanços) lançam também quantidades variáveis de resíduos sólidos diretamente no ambiente. Parte deste aporte externo de matéria orgânica, em função da baixa descarga, é mineralizado no estuário, resultando na produção interna de amônio. A matéria orgânica particulada lançada no estuário tende a sedimentar, o que aumenta a produção de amônio no fundo. Além disso, como no fundo

não há luz, a assimilação fitoplanctônica não remove o amônio por assimilação. As baixas concentrações de oxigênio neste período, as menores de todo o estudo, apóiam esta idéia.

Outro fator a ser considerado é a atividade de dragagem para manutenção do canal de navegação do Porto de Itajaí, realizada continuamente no baixo estuário. A dragagem é efetuada por injeção de água no fundo, provocando ressuspensão dos sedimentos depositados, podendo potencialmente disponibilizar o conteúdo da água intersticial, normalmente rica em amônio e contribuindo com o aumento de amônio no fundo.

Considerando todas as entradas de amônio contabilizadas, o estuário exportou para a zona costeira aproximadamente 556×10^6 mmol de NH_4^+ /d no período de baixa descarga fluvial, ou o equivalente a 123% de todas as entradas de amônio contabilizadas (Tabela 9: fluxo de nutrientes no período 2). Este valor elevado pode estar ligado às incertezas nas estimativas de entradas externas de amônio. No cálculo do balanço foram incluídas estimativas das entradas de amônio em função do esgoto doméstico e das indústrias pesqueiras. No caso específico das indústrias pesqueiras, a estimativa foi feita considerando a estatística de desembarque total de pescado e processamento de pescado. Como as espécies de pescado podem variar e o processamento também, em função das espécies capturadas, a estimativa pode não ter sido suficientemente acurada. Entretanto, mesmo considerando as incertezas, o excesso bastante significativo de amônio sugere que o estuário apresentou um balanço heterotrófico no período.

O balanço de nitrito (Figura 34) mostrou um aumento não-conservativo em todos os compartimentos do estuário, no período de baixa descarga. Este aumento evidencia a nitrificação no estuário, bastante intensa no período em função da

temperatura elevada e maior tempo de residência, como já foi discutido. As maiores variações ocorreram em superfície, no médio e no baixo estuário, com valores de 0,8 e 1,6 $\text{mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, respectivamente (Figura 11). Estas diferenças estão relacionadas provavelmente às diferenças de oxigênio em cada camada. As baixas concentrações de oxigênio dissolvido, particularmente no fundo, podem inibir a nitrificação. As menores concentrações de oxigênio de todo o estudo foram registradas neste período, na camada de fundo. No médio estuário por exemplo, embora a concentração média de oxigênio tenha sido de aproximadamente 4,0 mg/l, em algumas situações as concentrações chegaram a 2,0 mg/l no momento da amostragem, podendo ter atingido níveis mais críticos em ocasiões específicas.

O balanço entre todas as entradas e saídas de nitrito no estuário, resultou num fluxo líquido de nitrito para a zona costeira de aproximadamente 42×10^6 mmol/d de NO_2^- (Tabela 9: fluxos de nutrientes período 2), ou o equivalente a 188 % de todas as entradas para o sistema.

O balanço de nitrato mostrou aumentos nas camadas de fundo e diminuição na superfície do baixo e médio estuário (Figura 35). Considerando o aumento de nitrito em todos os compartimentos e todas as evidências da elevada nitrificação no período, era esperado que também ocorresse aumento de nitrato. Entretanto este aumento só foi registrado, de forma significativa, na camada de fundo do baixo estuário, o que mostra ser coerente com as concentrações de oxigênio nesta camada, geralmente as maiores de todo o estuário no período, estimulando a nitrificação. Por outro lado a diminuição do nitrato nos demais compartimentos foi inesperada. Considerando que o consumo pelo fitoplâncton é pouco importante, a diminuição poderia ser ocasionada pela redução bacteriana, via respiração do nitrato ou denitrificação. Estes processos ocorrem em estuários sujeitos a elevada carga orgânica.

Entretanto eles geralmente são restritos aos sedimentos, pois eles são inibidos pela presença de oxigênio dissolvido (WADA & HATTORI, 2000). As concentrações de oxigênio do período foram baixas, mas em nenhum momento foi registrada anoxia.

Durante o período de baixa descarga, o estuário mostrou um fluxo de nitrato para a região costeira de aproximadamente 560×10^6 mmol/d de NO_3^- (Tabela 9: fluxos de nutrientes, período 2) cerca de 95% do total que o sistema recebeu.

5.3.3. Período de Descarga Elevada:

O período 4, correspondendo aos meses de setembro a dezembro de 2004, foi caracterizado pela descarga fluvial mais elevada, ficando em torno de $228 \text{ m}^3/\text{s}$, um aumento de 240 % se comparado com o período 1. O período foi marcado por picos isolados de descarga, que foram excluídos dos balanços. Os tempos de residência hidráulica para o período foram de aproximadamente 12 horas para a camada superficial e 58 horas para a camada de fundo. Com a maior descarga o estuário apresentou diminuição significativa da salinidade, de modo que as maiores misturas ocorreram no baixo estuário (Figura 36).

5.3.3.1. Fosfato

O principal fluxo de fosfato para o estuário foi devido à descarga fluvial, que representou 57% de todas as entradas. Mais uma vez, o esgoto doméstico mereceu destaque. Ele representou 11% das entradas no alto estuário e em torno de 25% no baixo. Como no período 1, o fosfato apresentou remoção no estuário, com exceção da camada de fundo do baixo estuário, onde ocorreu ligeiro aumento (Figura 37). As

maiores remoções ocorreram no baixo estuário, onde houve maior interação entre a água continental e marinha.

No período 4, o estuário apresentou um transporte líquido para a zona costeira de $27 \times 10^6 \text{ mmol/d PO}_4^{3-}$. Considerando todas as entradas para o médio e baixo estuário, aproximadamente 53% do fosfato foram removidos no sistema. Novamente o efeito de remoção do fosfato está associado provavelmente à adsorção, como discutido anteriormente. Como a adsorção é mais intensa na região de baixa salinidade, ela se tornou mais significativa no baixo estuário, onde ocorreu a maior influência da salinidade neste período. O alto estuário praticamente não apresentou salinidade neste período.

5.3.3.2. Nitrogênio:

No período de descarga elevada foram observados, de forma geral, aumentos significativos de amônio, com exceção da camada de fundo do médio estuário. Os maiores fluxos não conservativos foram novamente registrados no baixo estuário, com o máximo de $15,5 \text{ mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ na superfície, região que recebe maior aporte de resíduo orgânico pela ação antropogênica (Figura 33). O estuário apresentou transporte líquido para a zona costeira de aproximadamente $760 \times 10^6 \text{ mmol/d de NH}_4^+$ neste período. Este transporte corresponde a 130% de todas as entradas no período, ficando muito próximo ao período de baixa descarga. Em síntese, apesar da maior descarga, o estuário também apresentou um balanço metabólico heterotrófico neste período.

O balanço do nitrito (Figura 34) mostrou que, no período de descarga mais elevada, os fluxos de nitrito foram muito menores que no período de baixa vazão, de forma geral muito pouco significativos. De fato, as próprias concentrações de nitrito no

período foram muito inferiores ao período 1, o que também apóia esta idéia. O transporte líquido de nitrito para a zona costeira foi de $10,5 \times 10^6$ mmol/d de NO_2^- , o que corresponde a cerca de 90% de todas as entradas para o estuário.

Os fluxos de nitrato mostraram aumento no fundo e diminuição na camada superficial, em ambos os compartimentos do estuário. A diminuição do nitrato na superfície poderia estar relacionada à época do cultivo do arroz irrigado, onde ocorre captação da região do médio e alto estuário para a manutenção das culturas. Já os aumentos no fundo poderiam ser atribuídos à nitrificação, como também já foi mencionado. Na região do médio estuário o aumento de $4.0 \text{ mmol.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ está dentro das taxas que podem ser justificadas pela nitrificação. No entanto, na região do baixo estuário a variação não conservativa foi muito elevada e não pode ser explicada apenas pela nitrificação, de modo que a origem destes fluxos fica não resolvida. A influência dos picos de descarga no período 4 pode ser a origem do problema, fazendo com que o estuário estivesse passando por mudanças, após a “lavagem” pela alta descarga fluvial registrada antes e até durante este período. Assim, o período de alta descarga fluvial, poderia estar sofrendo o efeito das mudanças provocadas pelos pulsos de descarga, de modo que ele não representa uma condição de “steady-stae”. Neste caso, os balanços calculados para o período devem ser tratados com cuidado, já que o modelo proposto pelo *Loicz* pressupõe esta condição para ser utilizado.

6.4. Variação Intra-mareal:

6.4.1 Estação AE

A influência da variação da maré sobre a dinâmica de nutrientes mostrou que cada nutriente apresentou comportamento diferenciado ao longo do ciclo de maré em cada estação. Em geral, o silício e o amônio foram os nutrientes que apresentaram maior variação associada com o ciclo de maré, mas com variabilidade em função da estação amostrada.

A estação do alto estuário (*AE*) não mostrou influência direta da água marinha, resultando em ausência de salinidade durante todo o ciclo de maré. Apesar disso, alguns nutrientes mostraram variação que pode estar relacionada ao efeito do acúmulo de água doce no sistema, em função da maré. Esta influência resultou na inversão da descarga na estação *AE*, o que ocorreu no início do estudo, até às 15:30 e novamente entre às 0:00 e às 04:00hs, resultando na elevação do nível no período (Figuras 41 a e b).

O amônio mostrou as maiores concentrações nos períodos de menor influência da maré, durante os picos de descarga (Figura 41b e 42b), como os registrados entre 18:00 e 22:00hs (Figura 42b). Em seguida, com a diminuição da descarga e posterior inversão da mesma, as concentrações tenderam a diminuir, com os menores valores registrados durante ou logo após os períodos de inversão. A provável explicação seria o efeito das entradas orgânicas, principalmente de esgoto doméstico, originadas dos centros urbanos situados a montante desta estação (Gaspar e Blumenau). Nos momentos de maior descarga e menor nível, o efeito destas entradas seria mais perceptível, mostrando a influência da ocupação a montante da estação. Já nos períodos de elevação da maré, resultando na inversão da descarga, a influência maior seria das regiões a jusante da estação *AE*, uma região marcadamente rural, que sofre um aporte menor de matéria orgânica.

As concentrações de silício foram as que apresentaram maior variabilidade na estação *AE*, com um C.V. de 27% (Tabela 11). Seu padrão de variação foi similar ao do amônio, com tendência à diminuição nos períodos de inversão da descarga, como observado entre as 22:00 e 02:00 hs (Figura 3c), no primeiro ciclo de maré. Mesmo comportamento foi observado no ciclo seguinte. Esta variação está provavelmente relacionada ao efeito da rizicultura (principal atividade agrícola da região a jusante da estação *AE*) sobre o Si, como já discutido. A elevação da maré aumentaria a influência desta região sobre a estação de amostragem, resultando nesta diminuição. Entretanto, a diminuição do silício não coincidiu exatamente com o período de inversão da descarga, o que poderia ser atribuído ao efeito localizado da rizicultura. Considerando que a amostragem não foi feita no período de maior plantio do arroz, fase de maior influência sobre o sistema, que ocorre principalmente em agosto e setembro, a influência estaria restrita à região próxima à estação *AE*, de modo que a diminuição da descarga, resultante do efeito da onda de maré, realçaria esta influência. Para os demais nutrientes a variação, aparentemente não esteve relacionada ao efeito da maré.

6.4.2 Estação *ME*

A estação do Médio Estuário (*ME*), além do efeito da maré sobre o nível d'água, sofreu influência direta da água marinha. Esta influência foi nítida no fundo, mostrando o efeito da penetração da cunha salina, evidente entre as 14:00 e 19:00 hs no primeiro ciclo de maré e entre às 0:00 e 06:00hs no segundo (Figura 44c). O aumento da salinidade ocorreu logo após a inversão da descarga fluvial, quando foi observada entrada de água do oceano para o estuário (Figura 44b). A variação da salinidade mostra o efeito da mistura da água do mar com a de origem fluvial dentro do estuário,

resultando em uma salinidade máxima, no fundo, em torno de 10. Na superfície a salinidade mostrou pouca variação.

Para os nutrientes, novamente o amônio demonstrou um padrão de variação que esteve associado ao efeito da maré, mas de forma contrária ao observado na estação *AE*. As concentrações de amônio na estação *ME* aumentaram com a elevação da maré (Figura 45b). Como a salinidade, este efeito mostrou a influência principalmente no fundo, que apresentou aumento da concentração com o aumento da salinidade, após os períodos de inversão do fluxo, quando foi registrada entrada de água para o sistema. Este aumento concomitante com a entrada de água salgada no fundo, sugere que o amônio foi trazido pelo fundo, resultado do efeito de entrada da cunha salina. Entretanto, estudos realizados em outros estuários da região (PEREIRA FILHO *et al.*, 2001, SCHETTINI *et al.*, 2000) têm mostrado uma relação inversa, com diminuição de nutrientes com o aumento da salinidade, resultado da maior influência da água do mar, mais pobre em nutrientes. No caso da estação *ME*, o aumento observado está associado provavelmente à influência dos municípios de Itajaí e Navegantes, cujos centros urbanos e industriais estão localizados a jusante da estação *ME*, assim como o Rio Itajaí Mirim. O aumento do amônio com a elevação de nível e aumento da salinidade mostra que a água marinha, além de sofrer mistura com a água fluvial dentro estuário, recebe o aporte antropogênico dos municípios citados. O aporte contínuo de amônio e resíduos das indústrias de pesca e do esgoto doméstico aumenta as concentrações deste nutriente à medida que a água penetra no sistema. As maiores concentrações estiveram associadas a salinidades intermediárias, entre 5,0 e 15, sugerindo que as entradas estão ocorrendo durante a mistura das águas de origem continental e marinha, dentro do estuário. Por outro lado, as concentrações de amônio da estação *BE*, cuja salinidade foi sempre alta, em torno de 34, foram sempre reduzidas,

o que reforça esta hipótese. Além das entradas antropogênicas, outro fator importante que pode também contribuir com a elevação de amônio no fundo, com a elevação da maré, é a dragagem realizada na região do baixo estuário. Esta dragagem ressuspende o material de fundo, disponibilizando amônio para a camada de fundo.

A variação do nitrito, embora menos evidente, mostrou comportamento similar ao amônio, evidenciando o efeito da nitrificação no estuário, como já discutido. O nitrato e fosfato, não mostraram variação evidente, que possam ser relacionadas ao ciclo de maré. O Si também não apresentou variação claramente associada ao ciclo de maré, mas foram observadas concentrações ao fundo geralmente maiores que à superfície, o que parece surpreendente. A explicação para esta discrepância poderia novamente ser atribuída à influência da rizicultura sobre a composição química da água fluvial. Assim, em superfície, as concentrações seriam menores, justamente por representarem principalmente as águas que atravessaram a região agrícola da bacia, com grande influência da rizicultura, como mencionado.

6.4.3 Estação BE

A estação *BE* foi a que sofreu mais diretamente a influência da água marinha, mostrando, no fundo, salinidade elevada (34) e constante ao longo de toda a campanha de amostragem. Na superfície a salinidade variou pouco, entre 5 e 10, com pequeno aumento nos momentos de nível elevado. Em função da influência constante da água marinha no fundo, os nutrientes em média apresentaram concentrações baixas ao longo de todo o ciclo de maré. Apesar disso, mesmo com a salinidade constante no fundo, as concentrações de todos os nutrientes mostraram diminuição com aumento do nível d'água, resultado da entrada de água marinha. Assim, as menores concentrações de todos os nutrientes foram observadas entre as 22:00 e 04:00hs, período marcado pelo nível elevado e descarga positiva, representando entrada de água do mar no estuário,

com a conseqüente diminuição da influência fluvial e antropogênica sobre as concentrações dos nutrientes.

Na superfície, a variação foi diferente da observada no fundo, particularmente para o amônio. Este nutriente apresentou aumento nos períodos de elevação do nível. Nestes momentos houve entrada de água do mar pelo fundo, mas na superfície isso ocorreu apenas durante um breve intervalo de tempo, entre 02:00 e 03:00hs. Assim, embora durante a maior parte da enchente, a água estar entrando pelo fundo, em superfície ocorria saída de água salobra, resultante da mistura dentro do estuário. Com a entrada da água marinha, mais densa, a água estuarina da superfície ficou restrita apenas a uma fina camada superficial. Esta camada superficial de espessura restrita, sofreu mais diretamente o efeito das entradas externas dentro do estuário, de modo que as concentrações se tornaram maiores. Para os demais nutrientes as concentrações, em superfície, não mostraram uma variação nitidamente associada ao efeito da maré.

Em síntese, a variação dos nutrientes ao longo do ciclo de maré foi diferenciada para cada estação de amostragem, em função da maior ou menor influência marinha e das entradas externas. O amônio foi o nutriente que mostrou mais nitidamente o efeito da maré e sua influência sobre a circulação estuarina e, portanto, sobre as entradas externas.

De forma geral, avaliando-se as concentrações médias dos nutrientes, por estação de amostragem, observou-se que ocorreu na superfície aumento progressivo do amônio do alto em direção ao baixo estuário, refletindo o aumento da importância das entradas externas. Esta tendência ficou bem evidenciada na curva de diluição do amônio, na qual as concentrações são plotadas contra a salinidade (Figura 51). As concentrações de amônio nas extremidades fluvial e estuarina apresentaram valores

mais baixos do que as águas resultantes da mistura dentro do estuário. As maiores concentrações foram registradas na superfície, em uma salinidade entre 5 e 15, entre as estações *ME* e *BE.*, onde está localizada a maior parte das indústrias de processamento de pescado.

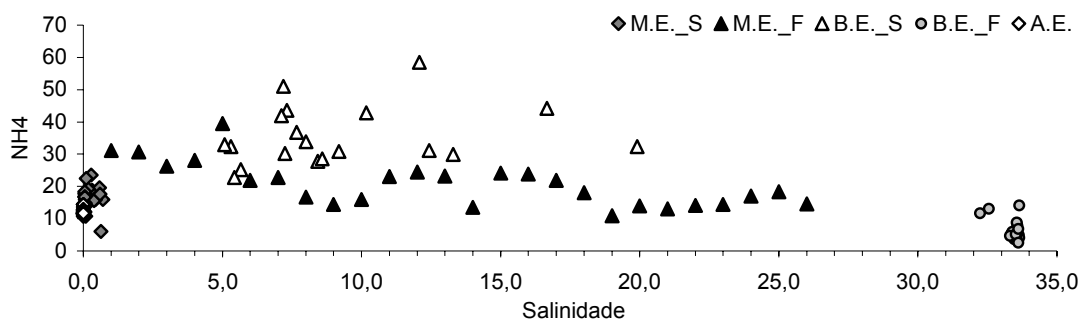


Figura 51: Diagrama de dispersão de amônio, incluindo dados de todas as estações da amostradas durante o ciclo de maré.

O nitrito tendeu a variar de forma similar ao amônio, resultado provavelmente da nitrificação. O nitrato apresentou leve aumento no médio estuário e diminuição no baixo estuário, resultado da influência marinha. O fosfato diminuiu em direção ao baixo estuário, sugerindo sua associação ao MPS. O silício apresentou comportamento singular, com aumento nas amostras de fundo do médio estuário e posterior diminuição no baixo.

Em síntese, a variação dos nutrientes mostrou relação com o ciclo de maré, aumentando ou diminuindo suas concentrações em função do aumento ou diminuição da influência das regiões de entorno, a montante ou a jusante de cada estação. Apesar de apresentar variação ao longo do ciclo de maré, ela foi muito inferior à variação registrada em outros estuários da região, como o do Rio Camboriú (PEREIRA FILHO *et al.*, 2001, 2002) e Rio Tavares (SCHETTINI *et al.*, 2000). O compartimento do estuário que apresentou a maior variabilidade foi a camada de fundo da estação *BE*, por sofrer mais diretamente a influência marinha. Nesta estação, com exceção do nitrito, os

coeficientes de variação de todos os nutrientes foram bem inferiores aos registrados no Rio Camboriú, por exemplo.

Apesar de ter sido realizado em uma ocasião diferente e com uma estratégia amostral diferente, as tendências gerais observadas durante as amostragens dentro dos ciclos de maré foram as mesmas registradas durante o monitoramento efetuado entre 2003 e 2004, nesse mesmo ambiente.

6. CONCLUSÕES:

- A variação espacial das variáveis avaliadas mostrou a influência dos centros urbanos de Blumenau e Itajaí, com aumentos significativos dos indicadores de matéria orgânica e o efeito da dispersão/diluição provocada pela entrada da água marinha na extremidade estuarina.
- A variabilidade temporal das características do sistema fluvial-estuarino mostrou ser resultado da interação do efeito provocado pelo balanço da descarga fluvial e influência marinha e pela atividade agrícola, com destaque para o ciclo da rizicultura. Embora a descarga fluvial tenha sido um importante fator responsável pela flutuação das variáveis monitoradas, seu efeito direto mostrou ser complexo, sendo função da interação do aumento da descarga e da exposição do solo, que varia ao longo do ano em função do ciclo de utilização do solo pela rizicultura, a principal atividade agrícola da região de entorno do estuário.
- O estuário apresentou diminuição de Si na região do alto e médio estuário. Esta diminuição provavelmente sofreu influência do ciclo do cultivo do arroz irrigado. Nesse caso foi atribuída à remoção do Si pela atividade de rizicultura, que é mais pronunciada entre julho e janeiro.
- O estuário mostrou ser um importante “sumidouro” de fósforo, removendo em torno de 50% do fósforo que entra no sistema. O principal processo responsável por esta remoção foi a adsorção ao material particulado em suspensão.
- O efeito da remoção de fósforo pelo estuário pode ser o responsável pela tendência de grande diminuição da produtividade primária e biomassa fitoplanctônica que ocorre no limite externo da pluma do Rio Itajaí, na região costeira, o que vem sendo observado em estudos anteriores (SCHETTINI *et al.*,

1998, RÖRIG *et al.*, 2003) e que mostrou ser limitada pelo fosfato (PEREIRA FILHO *et al.*, submetido) .

- O balanço de massa mostrou aumento não conservativo de amônio nas regiões do médio e baixo estuário, sugerindo ser um ambiente dominado por processos de mineralização de matéria orgânica. O aumento de amônio também foi evidenciado pela variação intra-mareal. As curvas de diluição mostraram que os aumentos ocorreram em salinidades entre 5 e 15, durante a mistura da água marinha e fluvial.
- Apesar do efeito de diluição e dispersão provocada pela entrada da água marinha, em períodos prolongados de baixa descarga fluvial e temperatura elevada, as concentrações de oxigênio dissolvido mostraram níveis preocupantes, no médio e baixo estuário. Nestas condições o efeito combinado da mineralização da matéria orgânica no fundo, da nitrificação e do elevado tempo de residência, principalmente no fundo, resultaram em concentrações de oxigênio no fundo próximas a 2 mg/l, mostrando que o estuário apresenta os primeiros sinais de hipoxia.
- Os pulsos intermitentes de alta descarga fluvial inicialmente provocam aumento do MPS, PT e principalmente Si e nitrato. Entretanto, após o impacto inicial, as concentrações de fosfato, amônio e dos indicadores de matéria orgânica tendem a diminuir e os níveis de oxigênio dissolvido a aumentar em todo o estuário, funcionando como um mecanismo que “lava “ o sistema periodicamente. Este mecanismo é importante no controle do desenvolvimento da hipoxia no médio e baixo estuário.

7. LITERATURA CITADA:

APHA-AWWA-WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 17th Ed.. Washington, DC: American Public and Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, 1998.

ASTON, S.R. Nutrients, Dissolved Gases and General Biogeochemistry in Estuaries. In: OLAUSSON, E. & CATO, I. (Eds.). **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**. New York: John Wiley & Sons Ltd. Ed., 1980. p.233-262.

BASNYAT, P. et al. Relationships Between Landscape Characteristics and Nonpoint Source Pollution Inputs to Coastal Estuaries. **Environmental Management**, v. 23, n. 4, p.539-549. 1999.

BEUKEMA, J.J. Changes in Composition of Bottom Fauna of a Tidal-Flat Area During a Period of Eutrophication. **Marine Biology**, v.111, p. 293-301. 1991.

BEROUSNKY, V.M. & NIXON, S.W. Temperature and the Annual Cycle of Nitrification in Waters of Narragansett Bay. **Limnology and Oceanography**, v.35, n.7, p.1610-1617. 1990.

BILLEN, G. et al. A Nitrogen budget of the Scheldt hydrographical Basin. **Netherlands Journal of the Sea Research**, n.19, p. 223-230. 1985.

BISHOP, P.L. **Marine Pollution and its Control**. New York: McGraw-Hill. 1983. 358p.

BORSUK, M.E.; STOW, C.A. & RECKHOW, K.H. Confounding Effect of Flow on Estuarine Response to Nitrogen Loading. **Journal of Environmental Engineering**, v.130, n.6, p. 605-614. 2004.

CABEÇADAS, G., NOGUEIRA, M & BROGUEIRA, M.J. Nutrient Dynamics and Productivity in Three European Estuaries. **Marine Pollution Bulletin**, v.38, n.12, p. 1092-1096. 1999.

CARMOUZE, J.P. O metabolismo dos ecossistemas aquáticos. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1994. 254p.

CARMOUZE, J.P. & VASCONCELOS, P. The Eutrophication of the Lagoon of Saquarema, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. suppl., p. 851-859. 1992.

CARNEIRO, M.E. R. et al. A Biomassa de *Chara hornemannii* em Relação ao Comportamento Físico-Químico da Lagoa de Piratininga (RJ). **An. Acad. bras. Ci.**, v. 66, n.2, p.213-222. 1994.

CEDERWALL, H. & ELMGREN, R. Biomass Increase of Benthic Macrofauna Demonstrates Eutrophication of the Baltic Sea. **Ophelia**, v. suppl, n. 1, p. 287-304. 1980.

CLARKE, R.M. & WARWICK, R.M. **Change in Marine Communities: an Approach to Statistical Analysis and Interpretation**. 2nd Ed. Plymouth: PRIMER-E, Ltd. 2001.

CRABILL, C. et al. The Impact of Sediment Fecal Coliforms Reservoirs on Seasonal Water Quality in Oak Creek, Arizona. **Water Research**, v.33, p. 2163-2171. 1999.

DAGG, M. et al. Transformation of Dissolved Materials on Continental Shelves Influenced by Large Rivers: Plume Processes. **Continental Shelf Research**, v.24, p. 833-858. 2004.

DIAZ, R.J. Overview of Hypoxia Around the World. **Journal of Environmental Quality**, v.30, n.2. 2001.

DIONNE, J.C. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. **Zeitschr f. Geomorph.**, v.7, n.1, p.36-44. 1963.

DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**. New York: John Wiley & Sons. 1997. 195p.

ELLIOT, M. & MCLUSKY, D. The need for definitions en understanding estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.55, p.815-827. 2002.

FAIRBRIDGE, R.W. The Estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E. & CATO, I. (EDS.). **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**. New York: John Wiley & Sons, 1980. p. 1-35.

FOX, L.E., SAGER, S.L. & WOFSY, S.C. The Chemical Control of Soluble Phosphorus in the Amazon Estuary. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.50, p.783-794. 1986.

FRANCO, M. A. R. O Caso do Vale do Itajaí. In: Franco, M.A.R. (Ed.) **Planejamento Ambiental para a Cidade Sustentável**. São Paulo: Annablume Editora. 2001. p.191-249.

FROELICH, P.N. Kinetic Control of Dissolved Phosphate in Natural Rivers and Estuaries: A Primer on the Phosphate Buffer Mechanism. **Limnology and Oceanography**, v.33, p. 649-668. 1988.

GAGO, J., et al. Continental Inputs of C, N, P and Si Species to the Ría de Vigo (NW Spain). **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v.65, p.74-82. 2005.

GEP. **Ações Prioritárias ao Desenvolvimento da Pesca e Aqüicultura no Sul do Brasil**. Relatório Final, Volume IV. (Convênio Ministério da Agricultura e do Abastecimento – Univali). 2001.

GORDON, D. C. et al. LOICZ Biochemical Modelling Guidelines. **LOICZ Reports and Studies**, n. 5, 1996.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004). Cidades@ - O Brasil município por Município. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Acesso em Julho de 2004.

ICEPA - Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2003-2004. Florianópolis: ICEPA – Secretaria de Estado da Agricultura e Política Rural. 2005. 377p.

INNAMORATI, M. & GIOVANARDI, F. Interrelationships between Phytoplankton Biomass and Nutrients in the Eutrophicated Areas of the North-Western Adriatic Sea. In: VOLLENWEIDER, R.A., MARCHETTI, R. & VIVIANI, R. (Eds). **Marine Coastal Eutrophication**. Elsevier. 1990. p. 235-250.

JENG, H.A.C. et al.. Impact of Urban Stormwater Runoff on Estuarine Environmental Quality. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.63, p.513-526. 2005.

KALNEJAIS, L., MCMAHON, K. & ROBB, M. Budgets for Australian Estuarine Systems: Swan Canning Estuary, Western Australia. In: SMITH, S.V. & CROSSLAND, C.J. (Eds.). **Australasian Estuarine Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes. LOICZ Reports & Studies**, v.12, p 74-90. 1999.

KIMOR, B. The Impact of Eutrophication on Phytoplankton Composition in Coastal Marine Ecosystems. In: VOLLENWEIDER, R.A. MARCHETTI, R. & VIVIANI, R. (Eds.). **Marine Coastal Eutrophication**. Elsevier. 1990. p. 871-878.

LEBO, M.E. & SHARP, J.H. Distribution of Phosphorus Along the Delaware, an Urbanized Coastal Plain Estuary. **Estuaries**, v.16, n.2, p. 290-301. 1993.

LUDWIG, J.A. & REYNOLDS, J.F. **Statistical Ecology: a Primer on Methods and Computing**. New York: John Wiley & Sons. 1998. 339p.

MA, J.F. et al. Role of Root Hairs and Lateral Roots in Silicon Uptake by Rice. **Plant Physiology**, v.127, p. 1773-1780. 2001.

MEYBECK, M. Carbon, Nitrogen and Phosphorus Transport by World Rivers. **American Journal of Science**, v.282, p.401-450. 1982.

MORRIS, A.W., BALE, A.J. & HOWLAND, R.J.M. Nutrient Distributions in an Estuary: Evidence of Chemical Precipitation of Dissolved Silicate and Phosphate. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.12, p.205-216. 1981.

MORRIS, A.W. et al. The Estuary Plume Zone: Source or Sink for Land-derived Nutrient Discharges. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.40, p. 387-402. 1995.

MULLER-KARULIS, B. Transformations of Riverine Nutrients in the Daugava River Plume (Gulf of Riga). **Journal of Marine Science**, v.56, n.Supll., p. 180-186. 1999.

NIENCHESKI, L.F. & WINDOM, H.L. Nutrient flux and budget in Patos Lagoon Estuary. **The Science of Total Environment**, v.149, p. 53-60. 1994.

- NIXON, S.W. Nutrient Dynamics, Primary Production and Fisheries Yields of Lagoons. **Oceanologica Acta.**, v. Suppl., p. 357-371. 1982.
- NIXON, S.W. Quantifying the Relationship Between Nitrogen Input and the Productivity of Marine Ecosystems. In: **Proceedings of the Advanced Marine Technical Conference**, v.5, p. 57-83. 1992.
- NIXON S.W. et al. The fate of Nitrogen and Phosphorus at the Land-sea Margin of the North Atlantic Ocean. **Biogeochemistry**, v.35, p.141-180. 1996.
- NIXON, S.W. et al. Nutrients and the Productivity of Estuarine and Coastal Marine Ecosystems. **Journal of Limnology Society of South Africa**, v.12, p. 43-71. 1986.
- O'HIGGINS, T.G. & WILSON, J.G. Impact of the River Liffey Discharge on Nutrient and Chlorophyll Concentrations in the Liffey Estuary and Dublin Bay (Irish Sea). **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v.64, p.323-334. 2005.
- OKUDA, A. & TAKAHASHI, E. Studies on the Physiological Role of Silicon in Crop Plants: 8. Some Specific Behavior of Rice Plants in Silicic Acid Uptake. **Journal of Science Soil and Manure Jp**, v.33, p. 453-221. 1962.
- PARSONS, T.R.; MAITA, Y. & LALLI, C.M. **A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis**. Oxford: Pergamon Press. 1989. 173p.
- PARKER, C.A. & O'REILLY, J.E. Oxygen Depletion in Long Island Sound: a Historical Perspective. **Estuaries**, v.14, p. 248-265. 1991.
- PENNOCK, J.R.; SHARP, J.H. & SCHROEDER, W.W. What Controls the Expression of Estuarine Eutrophication? Case Studies of Nutrient Enrichment in the Delaware Bay and Mobile Bay Estuaries, USA. In: DYER, K.R. & ORTH, R.J. (Eds.). **Changes in fluxes in estuaries: Implications from science to management**. New York:Olsen & Olsen, p.139-146. 1994.
- PEREIRA FILHO, J. et al. Intratidal variation and net transport of dissolved inorganic nutrients, POC and chlorophyll-a in the Camboriú River Estuary, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.53, p.249-257. 2001.
- PEREIRA FILHO, J. et al. Estuário do Rio Camboriú-SC: variação intramareal e transporte residual de nutrientes, COP e clorofila-a em condições de quadratura e sizígia. **Notas Técnicas da Facimar**, v.6, p.137-151. 2002.
- PEREIRA FILHO, J., SPILLERE, L.C. & SCHETTINI, C.A.F. Dinâmica de Nutrientes na Região Portuária do Estuário do Rio Itajaí-Açu. **Atlantica**, v.25, n.1, p.11-20. 2003.
- PEREIRA FILHO, J. et al.. Production and Decomposition Processes in the Low Itajaí Estuary, SC, Brazil, under Low River Discharge Conditions. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, Submetido.

PIELOU, E.C. **The Interpretation of Ecological Data: a Primer on Classification and Ordination**. New York: John Wiley & Sons. 1984. 263 p.

PNUD – (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento). **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Versão 1.0.0. Brasília, 2003. Software disponível em <<http://www.pnud.org.br/atlas>> Ambiente operacional. Acesso em julho de 2006.

PRITCHARD, D. Observations of circulation in coastal plain estuaries. In: LAUFF, G. (Ed.), **Estuaries, American Association for the Advancement of Science**. Publ. N° 83, Washington, D.C., p. 37-44. 1967.

REVILLA, M. et al. Microplankton Metabolism Along a Trophic Gradient in a Shallow-Temperate Estuary. **Estuaries**, v.25, n.1, p.6-18. 2002.

RIBEIRO, C.H.A. **Uma Análise da Qualidade de Água da Baía de Guanabara entre 1980 e 1993**. 1996. 137p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental), UFF, Niterói, RJ, 1996.

RÖRIG, L.R. **Usos Múltiplos e Qualidade das Águas da Bacia do Baixo Itajaí-Açu, SC: Elementos para Um Gerenciamento Integrado**. 2005. 295p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais), UFScar, São Carlos, SP, 2005.

ROWE, G.T. Seasonal hypoxia in the bottom water of the Mississippi River Delta. **Journal of Environmental Quality**, v.30, p. 281-290. 2001.

SANDERS, R., KLEIN, C. & JICKELLS, T. Biogeochemical Nutrient Cycling in the Upper Great Ouse Estuary, Norfolk, U. K. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 44, p.543-555. 1997.

SANTA CATARINA. Secretaria do Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: Diagnóstico Geral**. Florianópolis. 1997. CD Rom

SCHETTINI, C.A.F.; CARVALHO, J.L.B. & JABOR, P. Comparative Hydrology and Suspended Matter Distribution of Four Estuaries in Santa Catarina State – Southern Brazil. In: Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries, **Proceedings**. p.29-32. 1996.

SCHETTINI, C. A. F. et al. Oceanographic and Ecological Processes Aspects of Itajaí-açu River Plume During a High Discharge Period. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.70, p.325-374. 1998.

SCHETTINI, C.A.F, PEREIRA FILHO, J. & SPILLERE, L.C. Caracterização Oceanográfica e Biogeoquímica dos Estuários dos Rio Tavares e Defuntos, Reserva Extrativista de Pirajubaé, Florianópolis, SC. **Notas Técnicas da Facimar**, v.4, p.11-28. 2000.

SCHETTINI, C.A.F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, n.1, p.123-142. 2002.

SCHETTINI, C.A.F. Near bed Sediment Transport in the Itajaí-Açu River Estuary Southern Brazil. In: WINTERWERP, J.C. & KRANENBURG, C.S. **Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment**. Amsterdam: Elsevier, 2002b. p 499-512.

SCHETTINI, C.A.F. **Avaliação da Intrusão Salina do Canal-Mirim**. Relatório 1: Distribuição Sinóptica da Salinidade. Relatório. 52 p. 2005.

SCHETTINI, C.A.F et al. Synoptic Hydrography of a Highly Stratified Estuary. **Ocean Dynamics**. 2006.

SCHUELER, T. Controlling **Urban Runoff: a Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs**. Metropolitan Washington Council of Governments. Washington, DC. 1987.

SIMPSON, J. H. , GONG, W.K. & ONG, J. E. The Determination of the Net fluxes From a Mangrove Estuary System. **Estuaries**, v. 1, p. 103-109. 1997.

SMITH, S.V. & HOLLIGAUGH, J.T. Coastal Metabolism and the Oceanic Carbon Balance. **Review of Geophysics**, v.31, p.75-89. 1993.

SOPPA, M.A. **Monitoramento dos Nutrientes Inorgânicos no Baixo Curso do Rio Itajaí-Açú**. 2004. 83p. Monografia (Conclusão de Curso: Oceanografia), Univali, Itajaí, SC, 2004.

SPENCER, C.P. The Micronutrient elements. In: RILEY, J. P. & SKIRROW, G. (Eds.). **Chemical Oceanography**. Vol.3. New York: Academic Press, 1975. p.245-299.

STAVER, L.W. , STAVER, K. W. STEVENSON, J. C. Nutrient Inputs to the Choptank River Estuary: Implications for Watershed Management. **Estuaries**, v.19 n. 2B, p. 342-358. 1996.

STRICKLAND, J.D. & PARSONS, T.R. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin, 2nd. edition, 1972. 311p.

TAKAHASHI, E., MA, J.F., MIYAKE, Y. The Possibility of Silicon as an Essential Element for Higher Plants. **Comments Agric Food Chem**, p.299-122. 1990.

TAKAHASHI, E. Uptake Mode and Physiological Functions of Silica. **Science of Rice Plant**, v.2, p. 58-71. 1995.

TAPPIN, A.D. An Examination of the Fluxes of Nitrogen and Phosphorus in Temperate and Tropical Estuaries: Current Estimates and Uncertainties. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.55, p.885-901. 2002.

UNEP (United Nations Environment Program), Overview of Fish Processing. In: UNEP (Ed.). **Cleaner Production and Assesment in Fish Processing**. UNEP-Earthprint Ed. 2001. 99p.

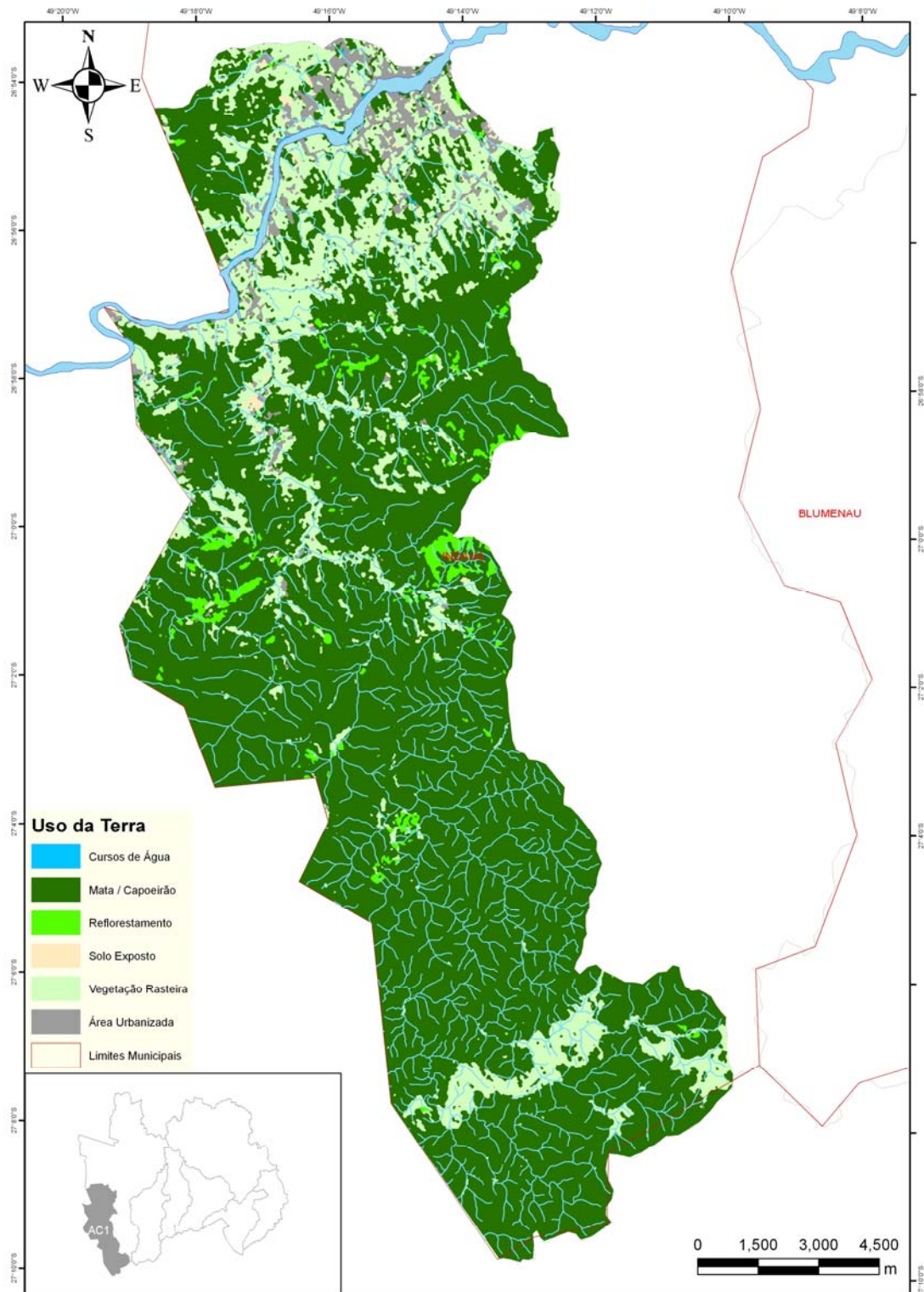
VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: Segrac Ed., 243 p. 1996.

WADA, E. & HATTORI, A. **Nitrogen in the sea: forms, abundances and rate processes**. Boca Raton, Florida: CRC Press. 208p.. 2000.

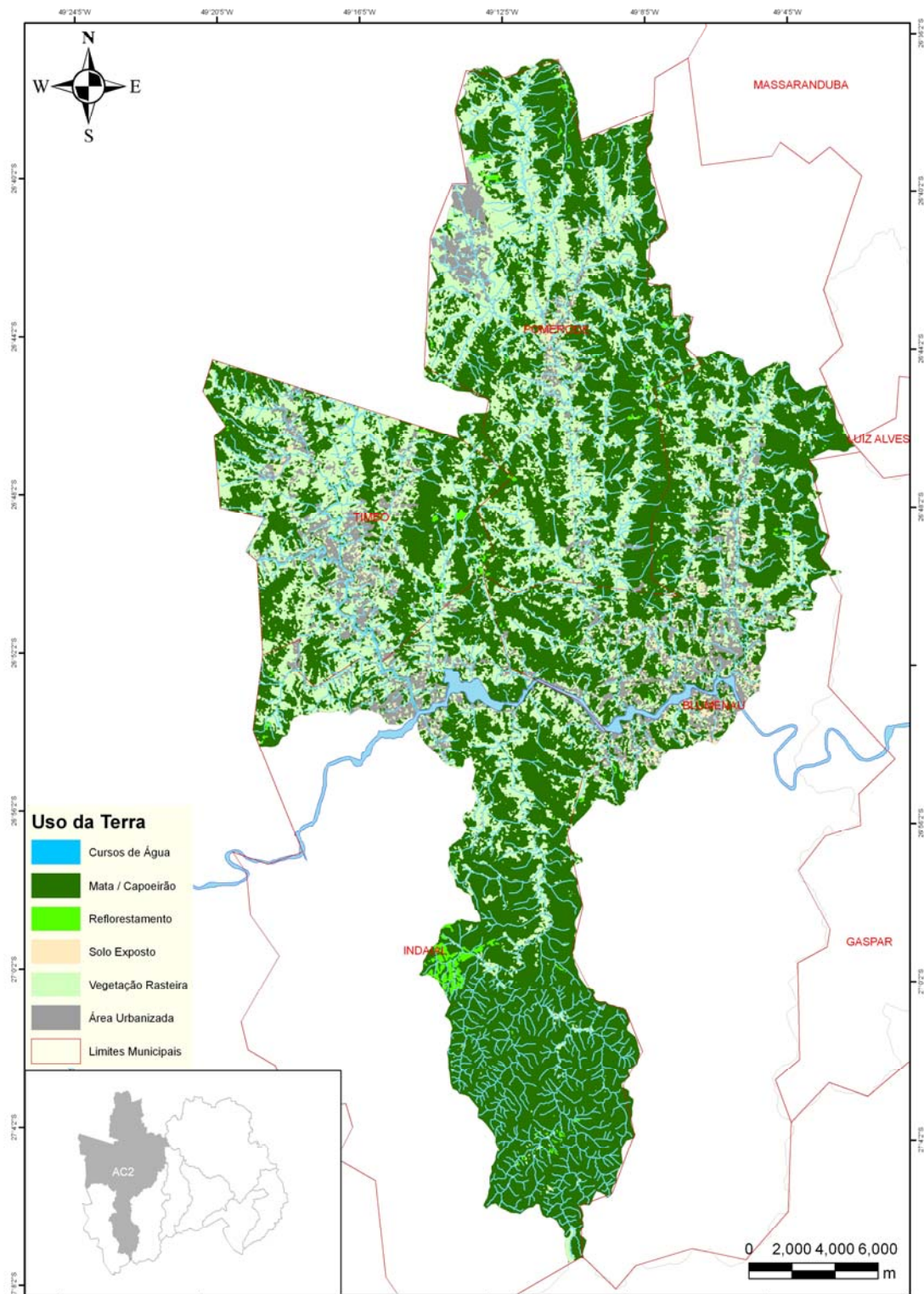
ZALESKI, A.R. & SCHETTINI, C.A.F. Estimação do Tempo de Trânsito das Águas do Rio Itajaí-Açu. **Notas Técnicas da Facimar**, v.7, p. 63-72. 2002.

8. ANEXOS:

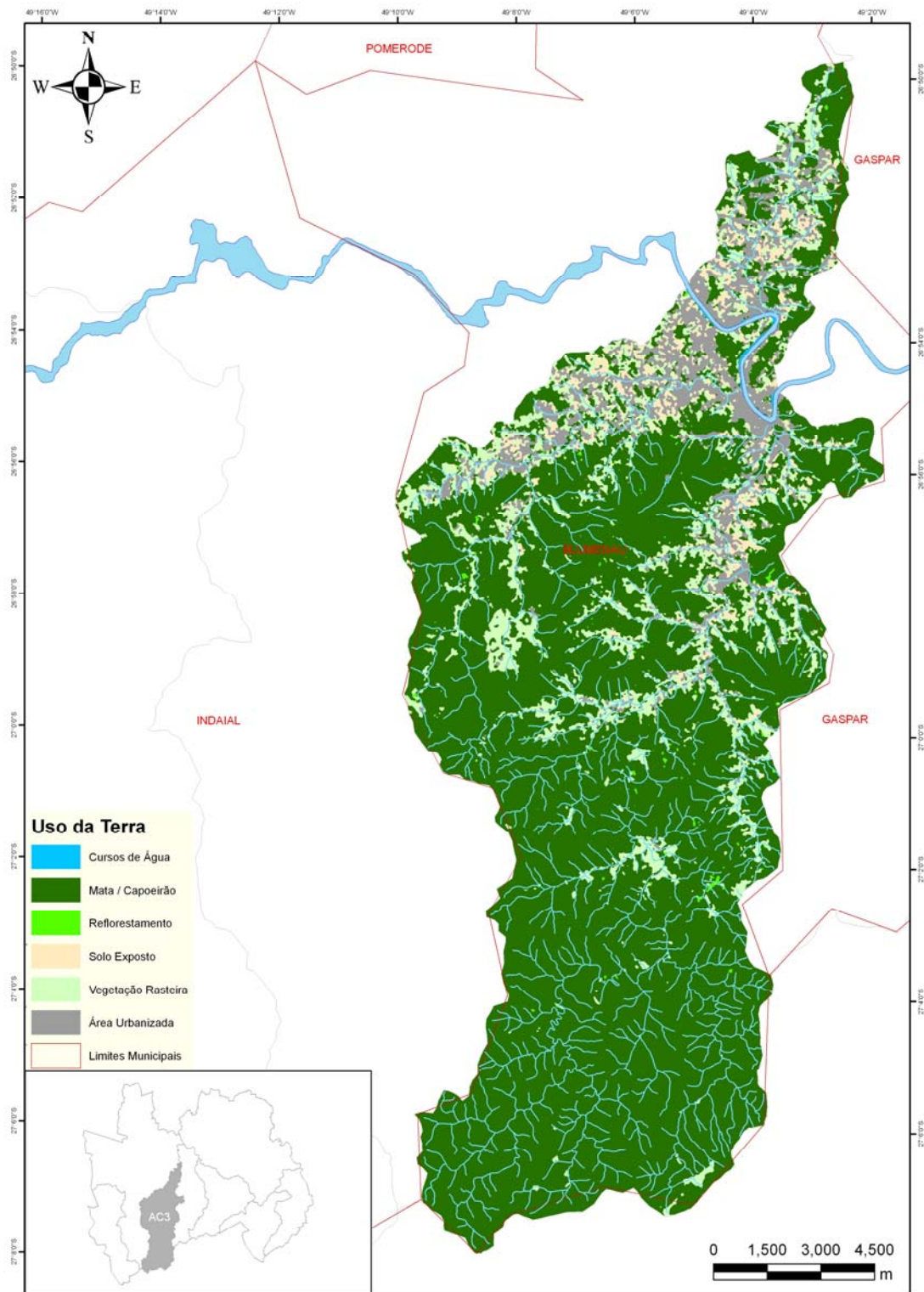
Anexo 1: Área de Contribuição da estação #1.



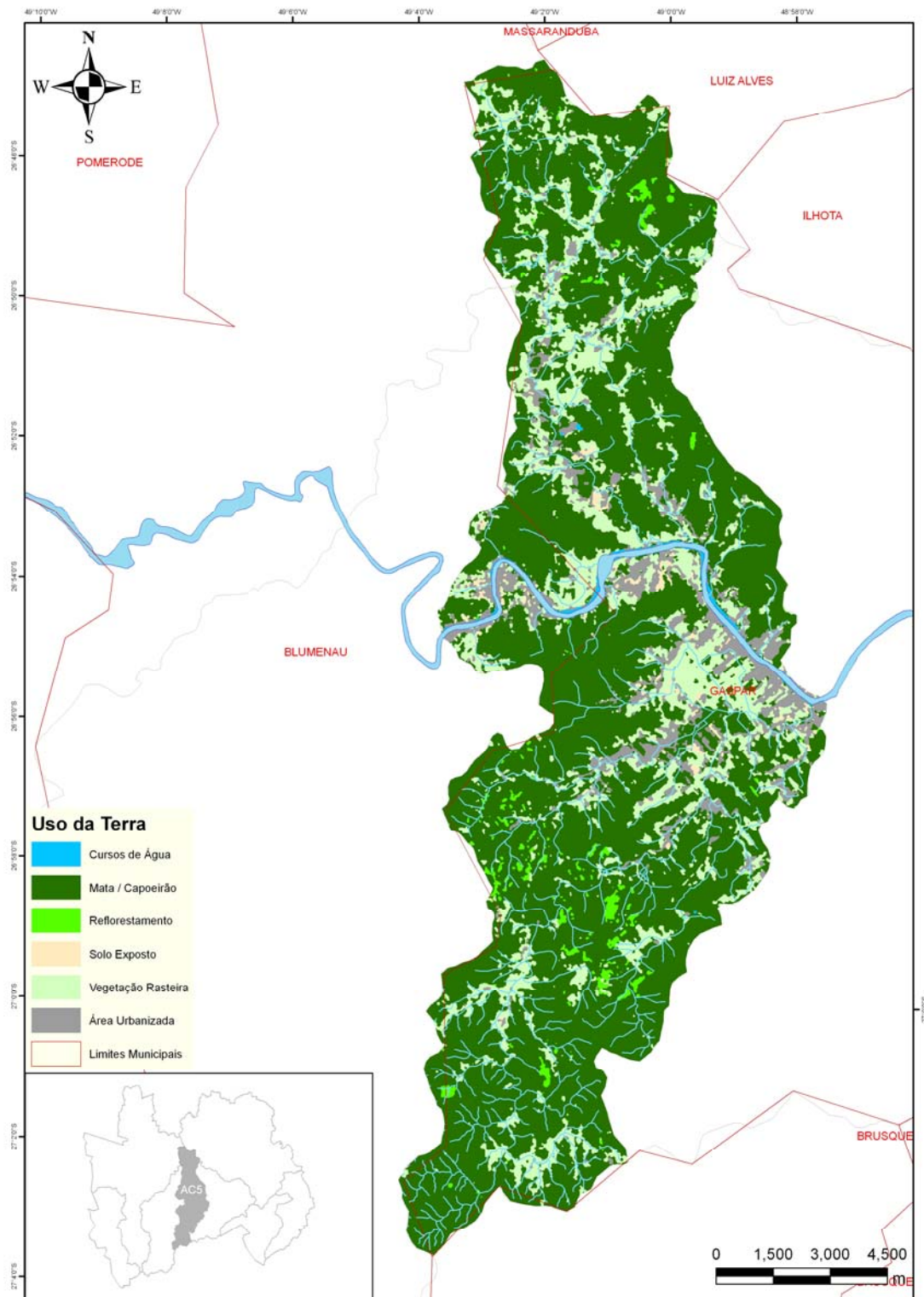
Anexo 2: Área de Contribuição da estação #2.



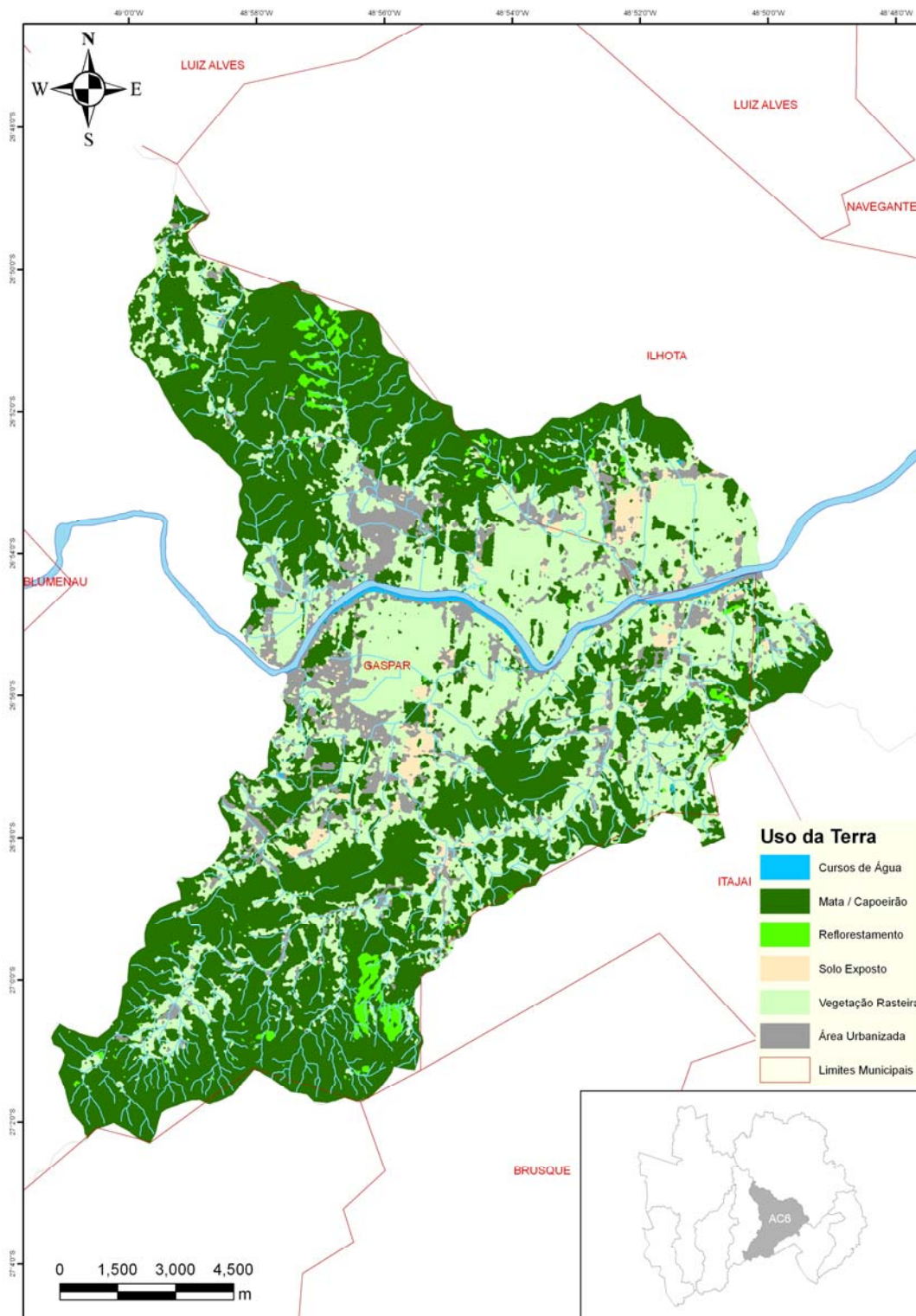
Anexo 3: Área de Contribuição da estação #3.



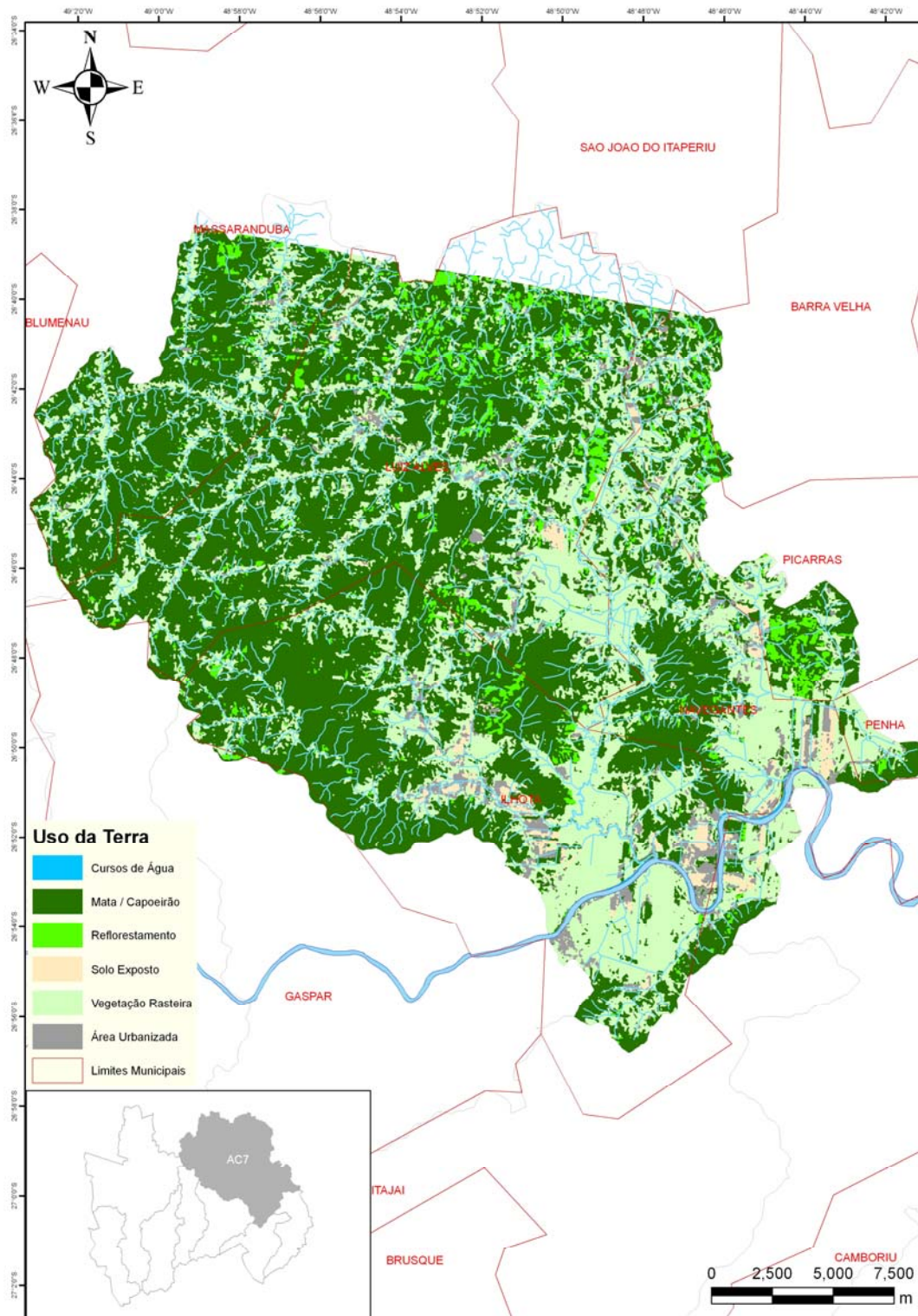
Anexo 4: Área de Contribuição da estação #5.



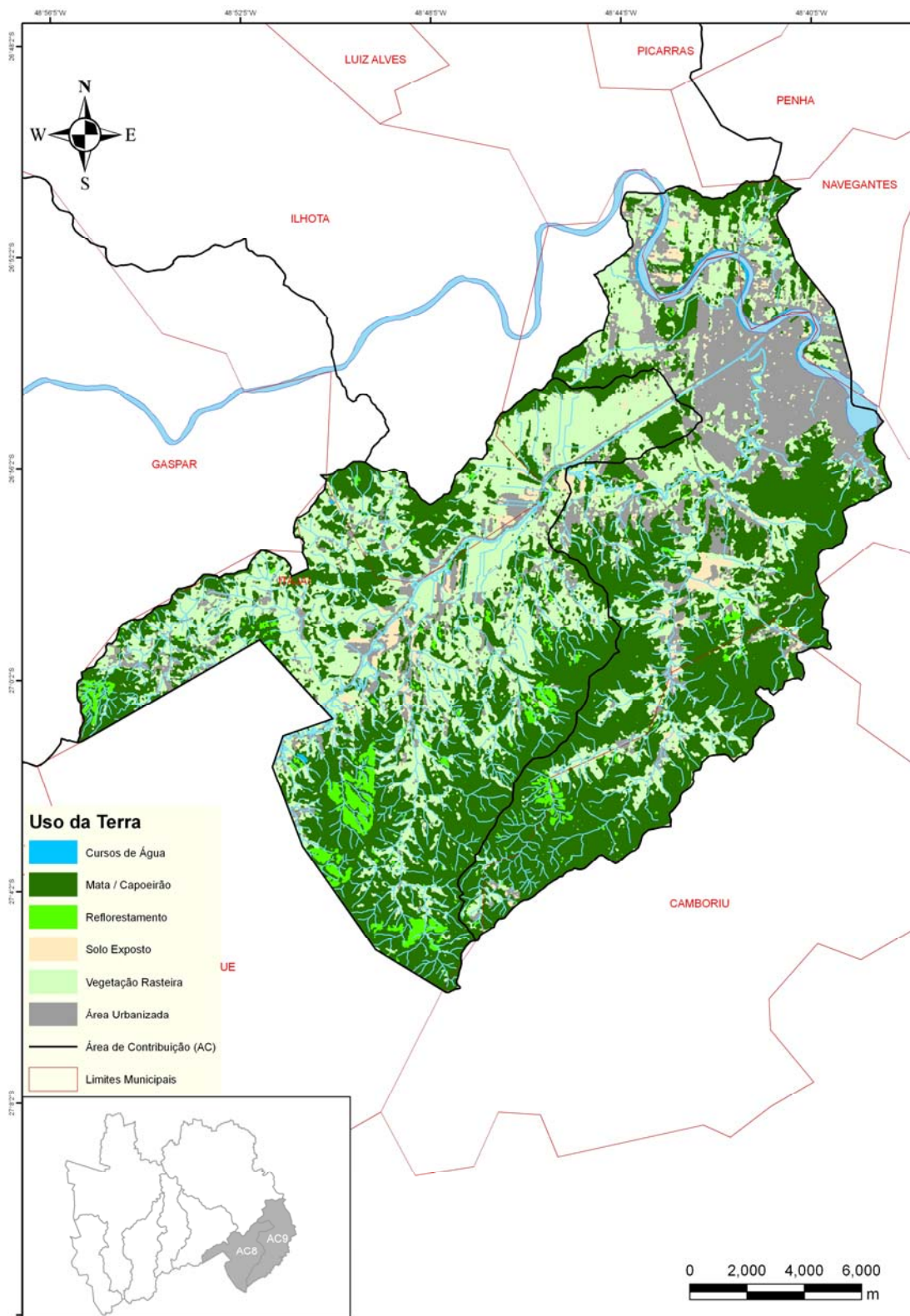
Anexo 5: Área de Contribuição da estação #6.



Anexo 6: Área de Contribuição da estação #7.



Anexo 7: Área de Contribuição da estações #8 e #9.



Anexo 8: Códigos das campanhas de amostragem usados nas análises multivariadas (variação temporal).

Código	Data	Código	Data
1	17/10/2003	29	3/6/2004
2	24/10/2003	30	17/6/2004
3	31/10/2003	31	24/6/2004
4	7/11/2003	32	1/7/2004
5	14/11/2003	33	8/7/2004
6	21/11/2003	34	15/7/2004
7	28/11/2003	35	22/7/2004
8	4/12/2003	36	29/7/2004
9	12/12/2003	37	5/8/2004
10	19/12/2003	38	12/8/2004
11	6/1/2004	39	19/8/2004
12	23/1/2004	40	26/8/2004
13	30/1/2004	41	2/9/2004
14	6/2/2004	42	9/9/2004
15	13/2/2004	43	16/9/2004
16	27/2/2004	44	23/9/2004
17	5/3/2004	45	30/9/2004
18	12/3/2004	46	7/10/2004
19	19/3/2004	47	14/10/2004
20	26/3/2004	48	21/10/2004
21	1/4/2004	49	28/10/2004
22	15/4/2004	50	4/11/2004
23	22/4/2004	51	11/11/2004
24	29/4/2004	52	18/11/2004
25	6/5/2004	53	25/11/2004
26	13/5/2004	54	2/12/2004
27	20/5/2004	55	9/12/2004
28	27/5/2004	56	16/12/2004