

Circulação estuarina

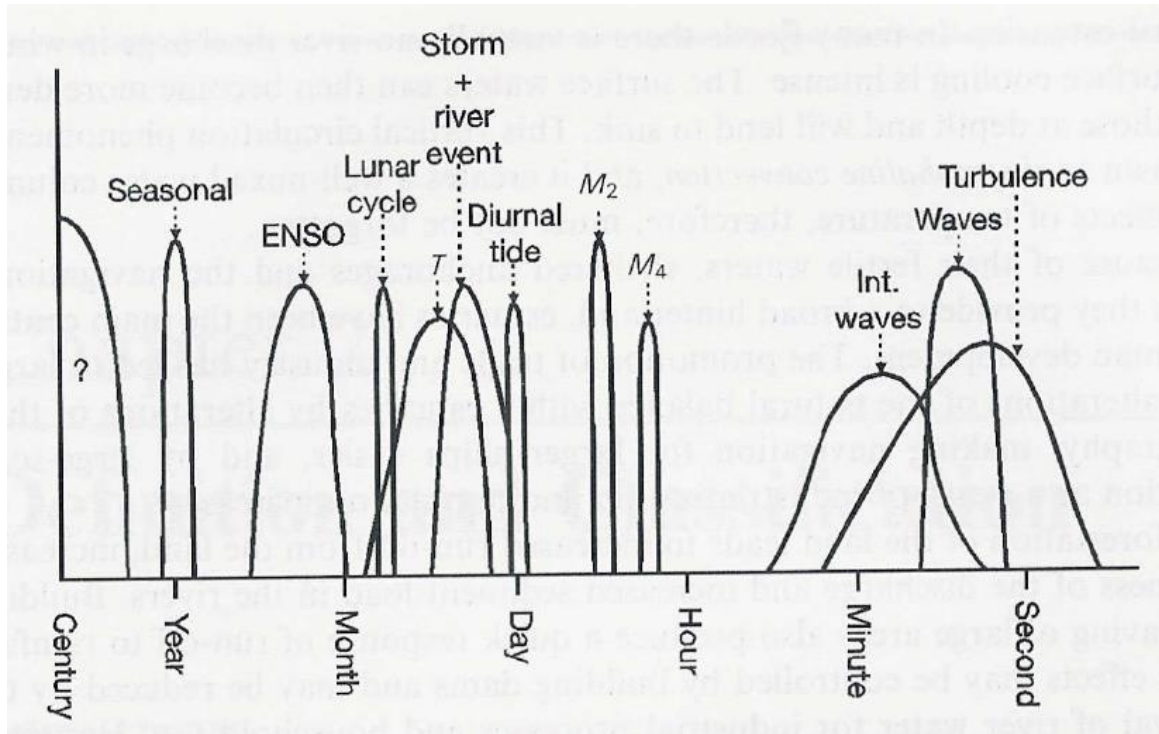
- Forçantes principais
- Efeito da maré
- Efeito do vento
- Efeito da descarga fluvial

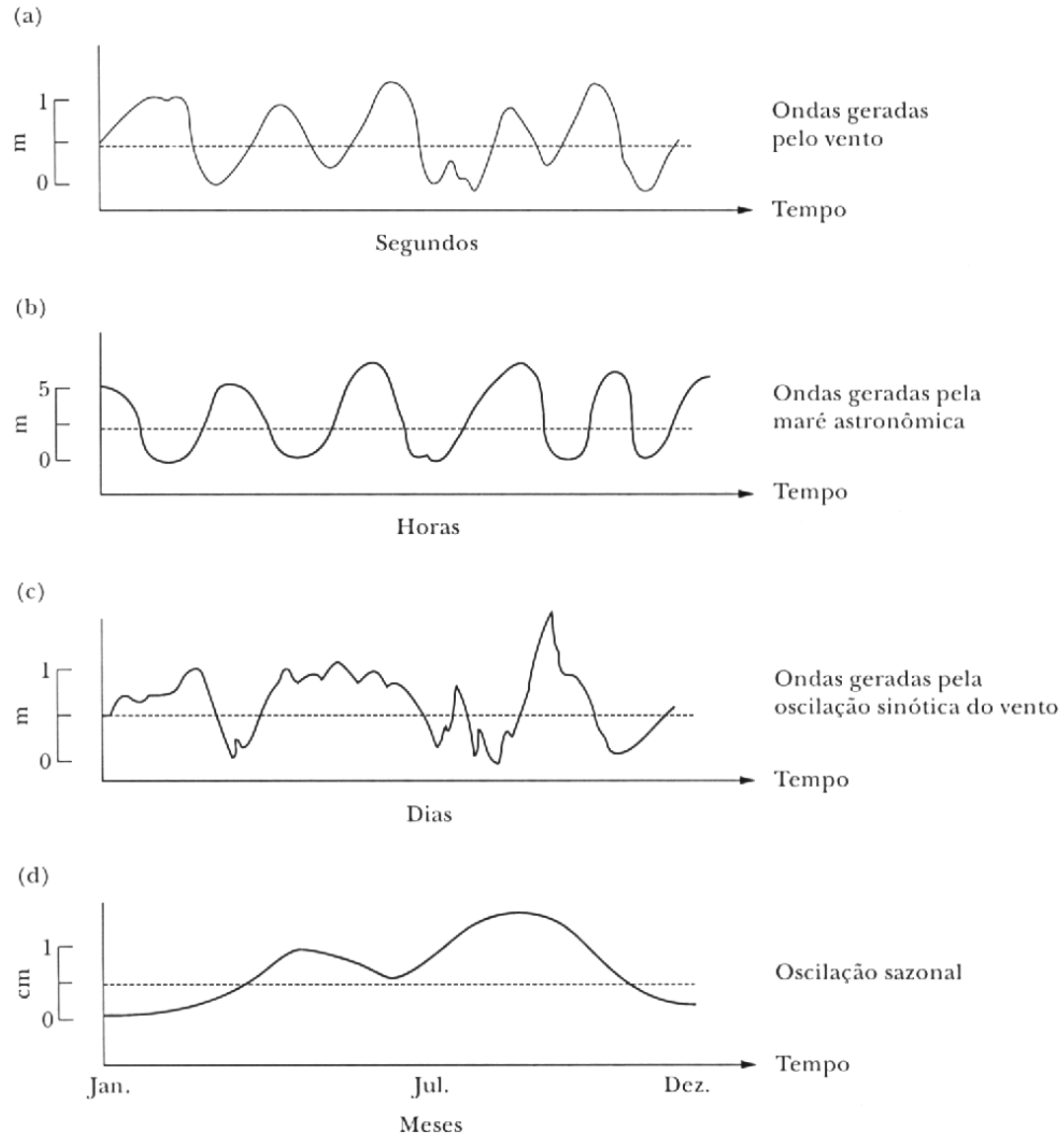
Forçantes principais

- Os processos de circulação e mistura em sistemas estuarinos são gerados por:
 - por variações do nível do mar
 - pela descarga de água doce
 - pelo gradiente longitudinal de salinidade
 - pela circulação da plataforma continental
 - pelo vento agindo sobre a superfície livre

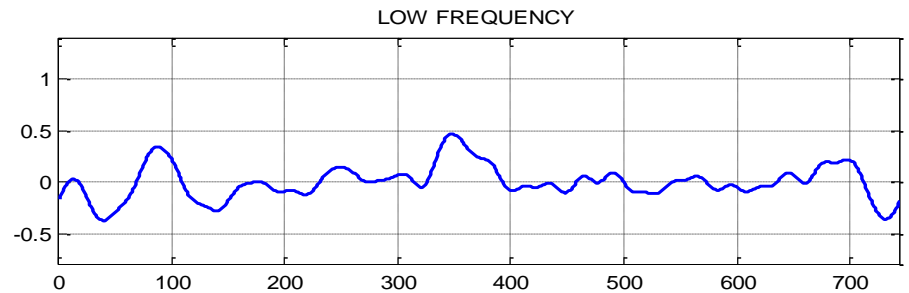
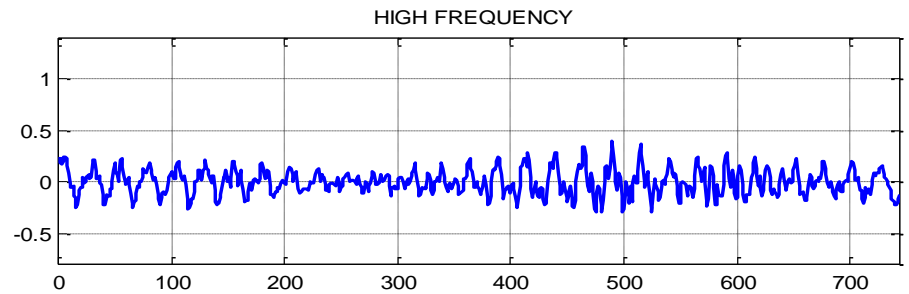
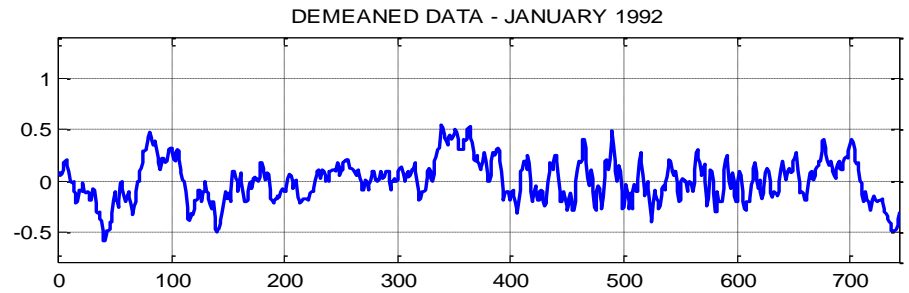
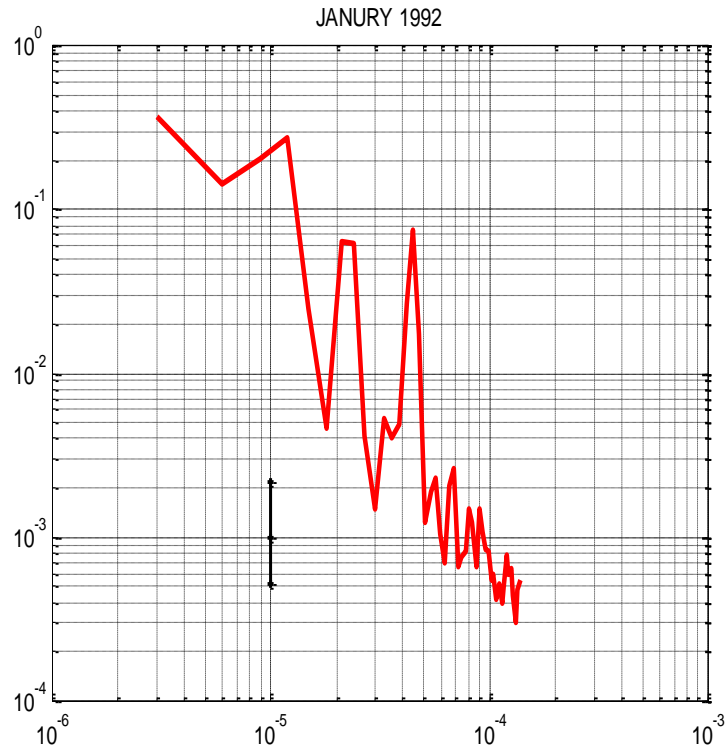
A escala de tempo de resposta deste estuário a essas forçantes é ampla e pode ser separada em movimentos nos domínios de **alta e baixa frequência**.

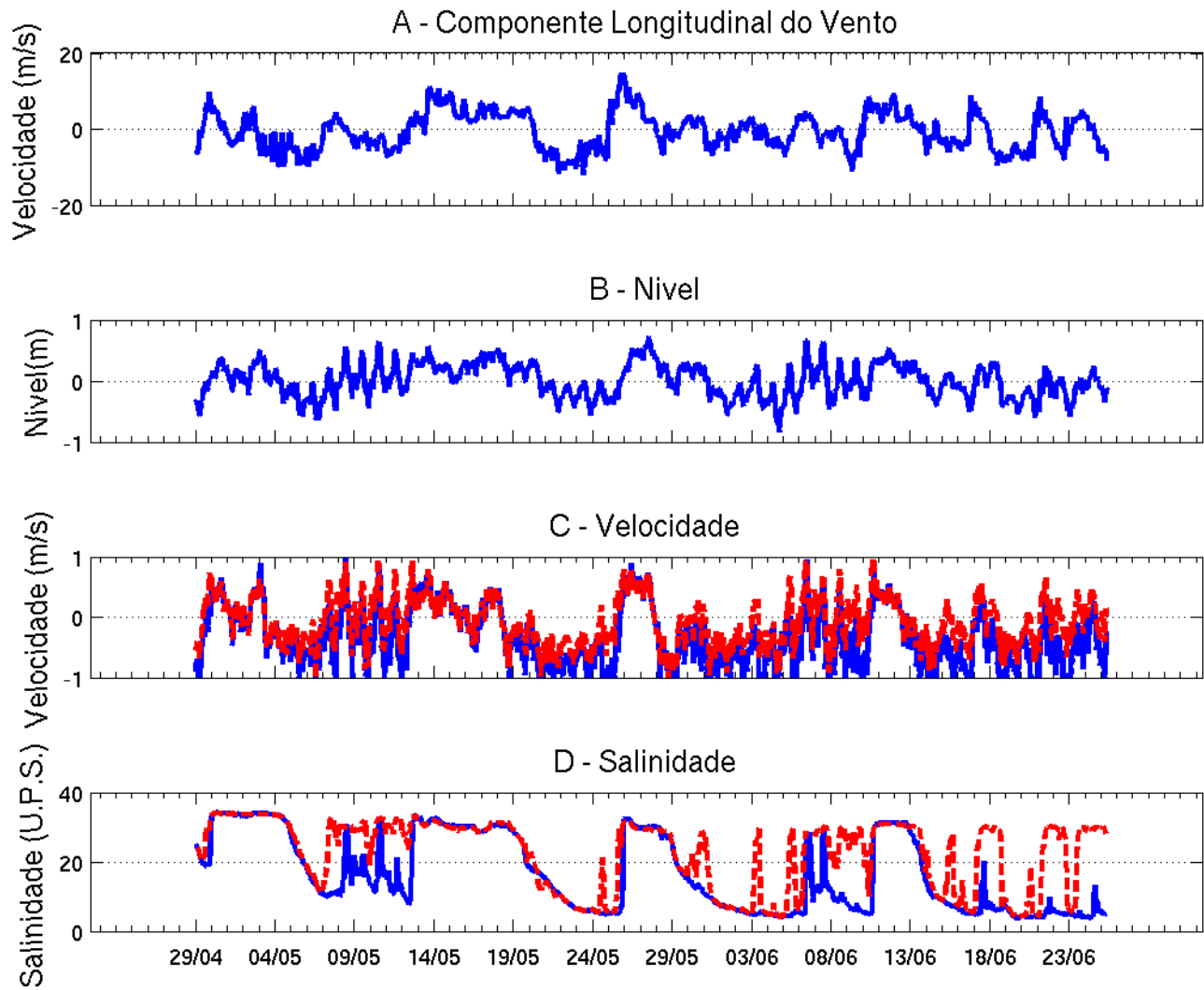
Escalas Temporais



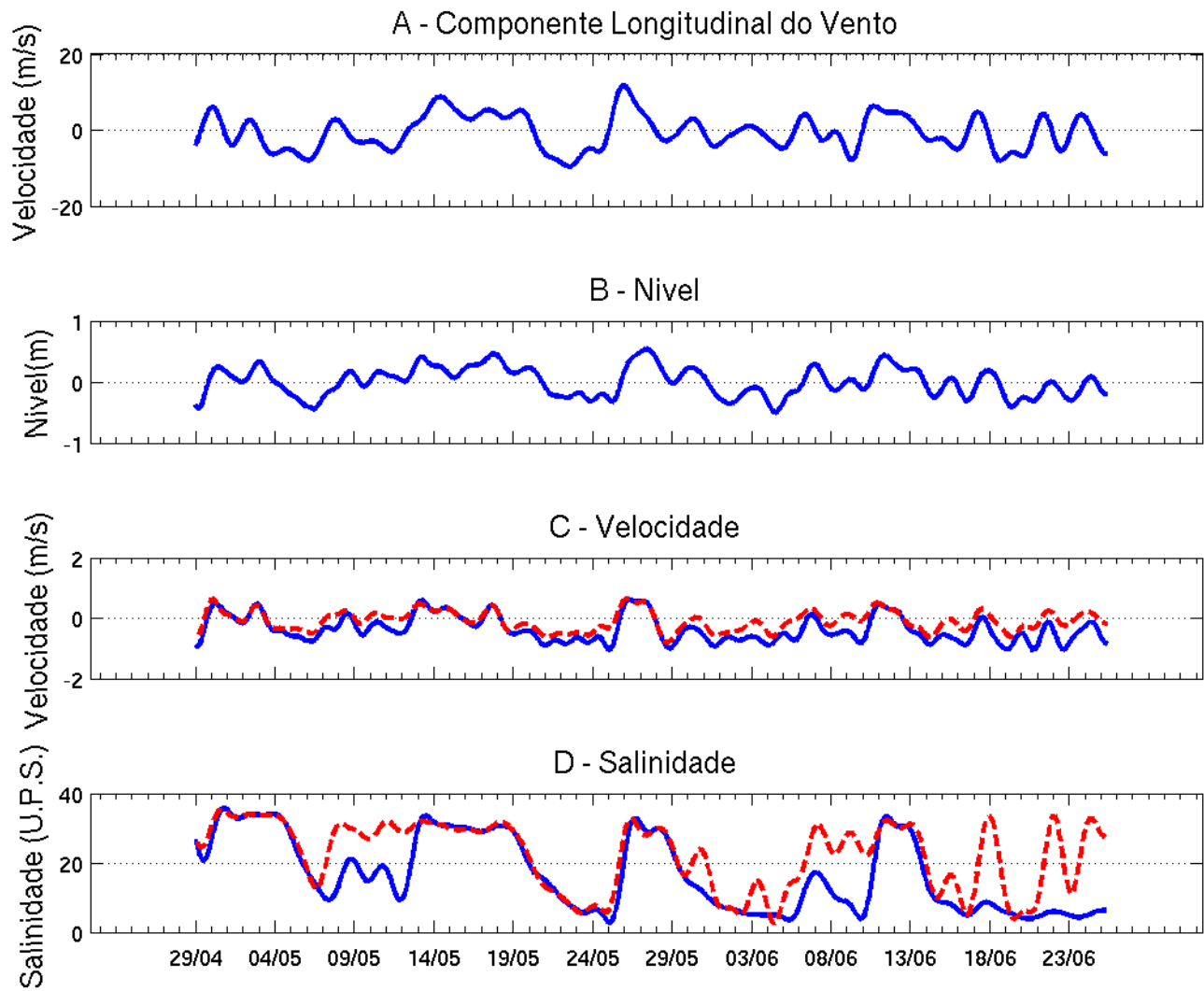


Escalas temporais

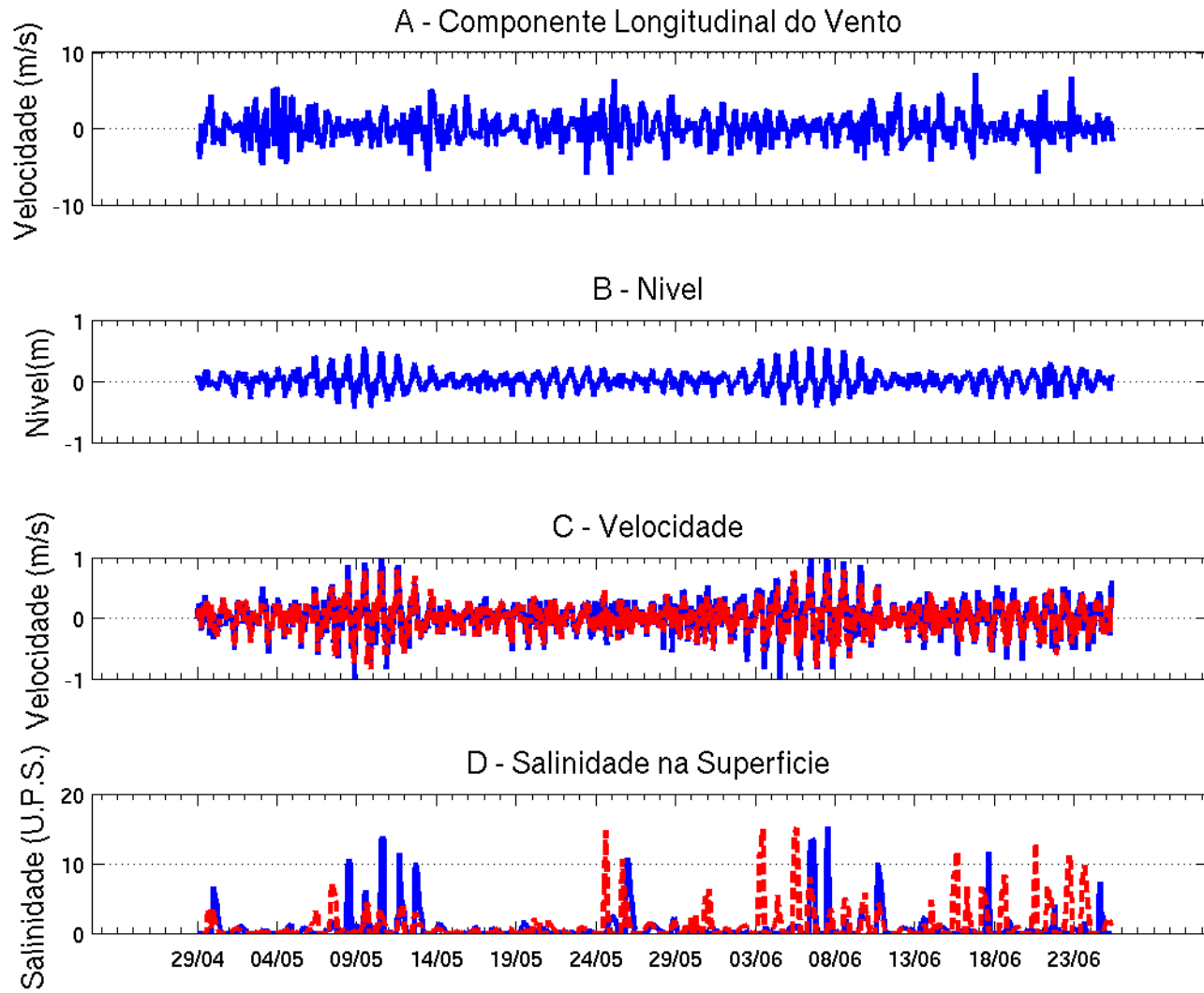


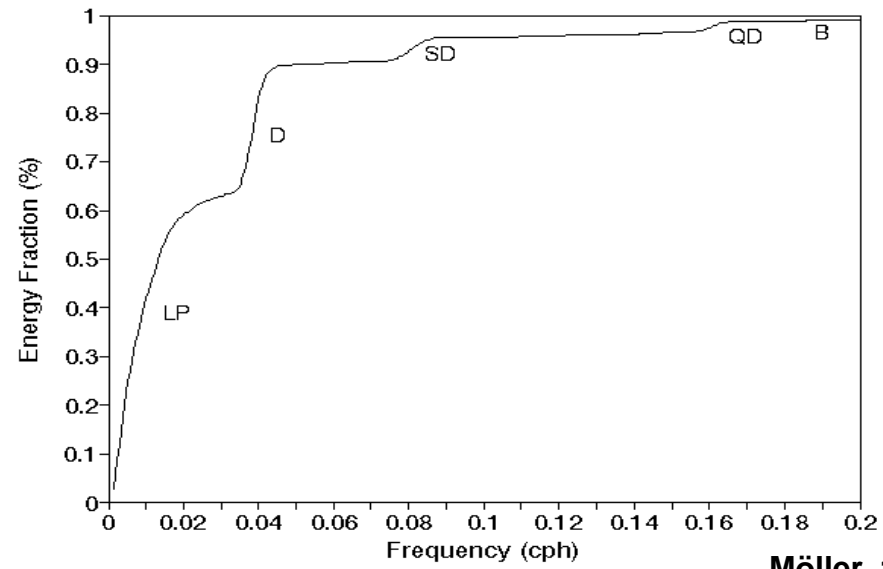
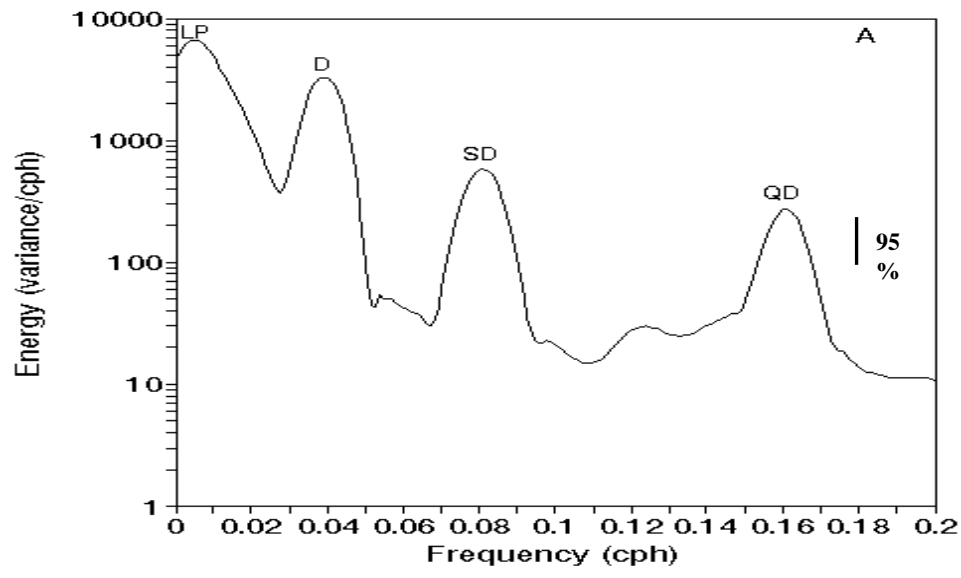


Vitta, 2006



Vitta, 2006





Möller, 1996

Escalas temporais

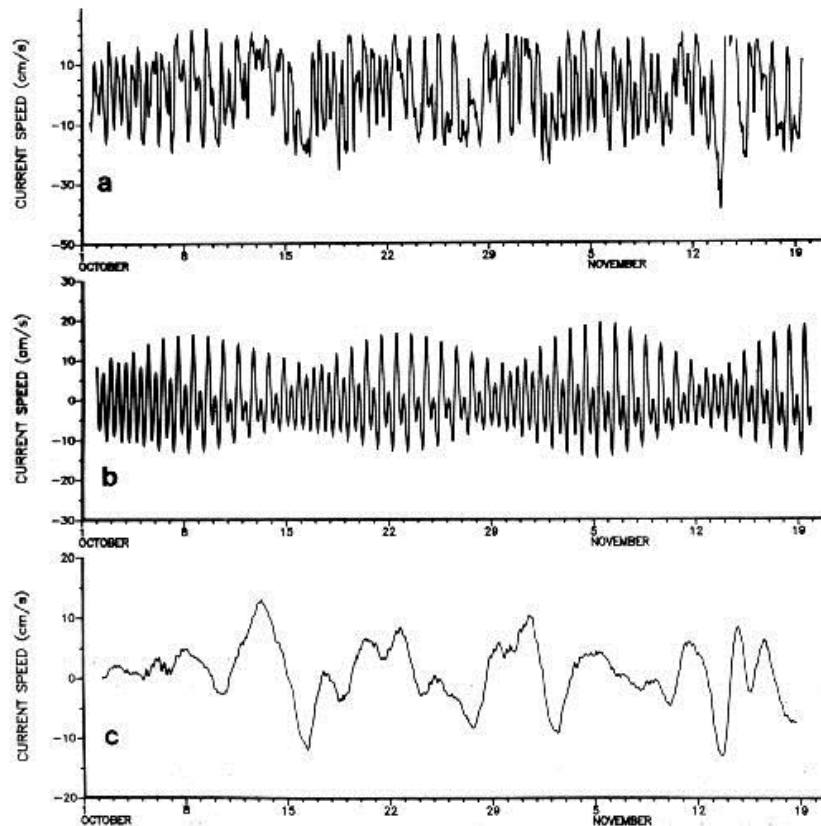


Fig. 4.3. Composite of (a) total, (b) tidal and (c) low frequency non tidal currents recorded in Florida's Indian River lagoon ($28^{\circ}03.3'N$, $80^{\circ}34.6'W$) approximately 23 km north of Sebastian Inlet, October 2 to November 19, 1983. Positive values indicate flow toward the north.

Variações do nível do mar

Descarga de água doce

Gradiente de pressão devido à distribuição de salinidade

Circulação da plataforma continental

Vento agindo diretamente sobre a superfície livre.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g \rho_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (\rho = \rho_0 (1 + \beta S))$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \beta \int_z^{\eta} \frac{\partial S}{\partial x} dz$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \beta \int_z^{\eta} \frac{\partial S}{\partial x} dz$$

Mostra que o efeito dinâmico de alta frequência gerado pela maré é independente da profundidade, ou seja, tem natureza **barotrópica** e sua intensidade é proporcional ao valor negativo da inclinação da superfície livre.

Mostra o efeito dinâmico de baixa frequência gerado pela distribuição longitudinal de salinidade é proporcional ao gradiente longitudinal de salinidade integrado entre a profundidade e a superfície livre. É chamado de componente **baroclínico**.

Gradiente de Pressão

➤ A primeira parcela da equação mostra que o efeito dinâmico de alta freqüência gerado pela maré é independente da profundidade, e sua intensidade é proporcional a inclinação da superfície livre.

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} > 0 \quad \text{Maré de enchente com fluxo estuário acima}$$

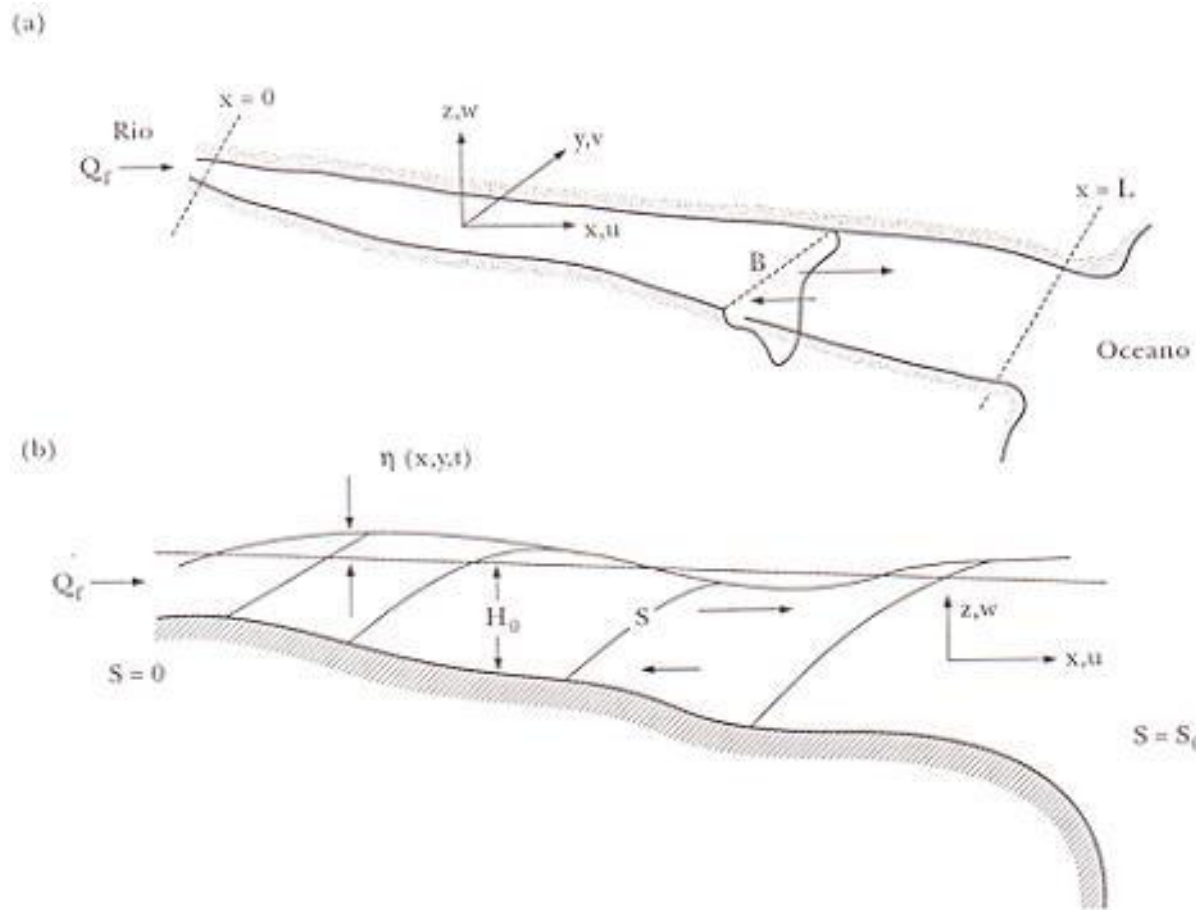
$$\frac{\partial \eta}{\partial x} < 0 \quad \text{Maré de vazante com fluxo estuário abaixo}$$

➤ A segunda parcela da equação mostra que o efeito dinâmico de baixa freqüência gerado pela distribuição longitudinal de salinidade é proporcional ao gradiente longitudinal de salinidade integrado entre a profundidade e a superfície livre.

$$\frac{\partial S}{\partial x} > 0 \quad \text{A salinidade aumenta estuário abaixo e este componente gera movimentos estuário acima}$$

Equação do movimento

- Força de Coriolis
 - $2\Omega \sin\theta u(v)$
- Forças de fricção devidas a efeito da turbulência – fricção do vento, atrito de fundo
 - $Ax\theta^2 u/\theta x^2$
- Equilíbrios
 - Geostrófico
 - Ekman

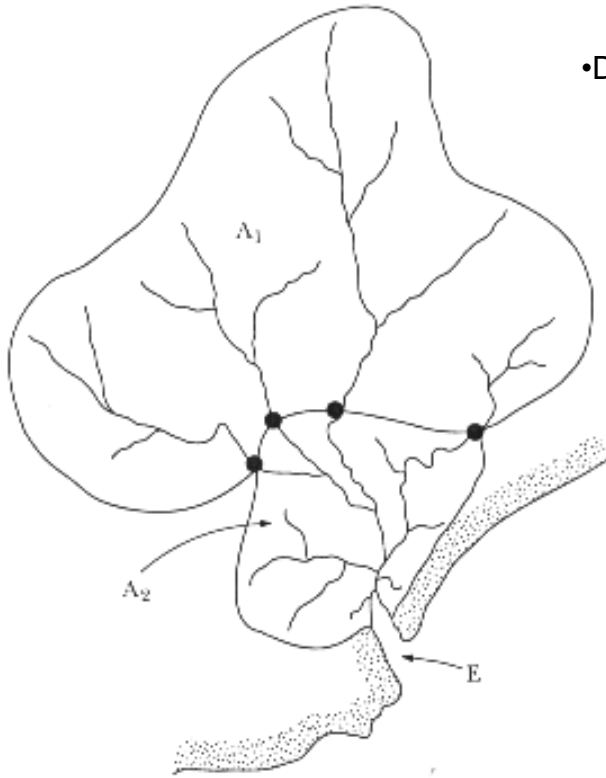


(a) Perfil esquemático e (b) seção longitudinal de um estuário. Oxyz é o referencial e u, v, w os componentes de velocidade. $S, \eta(x,y,t), H_0(x,y)$ e B denotam a salinidade, co-oscilação de maré, a profundidade e a largura do estuário. Figura em Miranda et al (2002)

Efeito da descarga fluvial

- Determinação do fluxo de rio:
- A) curva chave – relação entre nível e descarga – vantagens e problemas
 - áreas não medidas
- B) método Medeiros e Kjerfve (1993)

- Diagrama esquemático da bacia de drenagem de um estuário. A área total da bacia é $A_1 + A_2$. Figura em Miranda et al. (2002)



$$Q^* = \sum_i q_i$$

$$c = \frac{A_1 + A_2}{A_1}$$

$$Q_f = cQ^*$$

Quando não existem estações limimétricas na bacia de drenagem do estuário (ou qualquer outro ambiente marinho), essa quantidade física pode ser estimada indiretamente por meio de equações semi-empíricas. Por definição, a taxa de escoamento superficial (Δf) é a parcela da *taxa de precipitação* (P) que, escoando da bacia de drenagem para os rios, irá alimentar o sistema estuarino. Essas quantidades são expressas em altura por unidade de tempo ($L T^{-1}$).

A fração adimensional ($\Delta f/P$) pode ser calculada empiricamente com a clássica equação estabelecida pelo pesquisador Schreiber em 1904:

$$\frac{\Delta f}{P} = \exp\left(\frac{-E_v}{P}\right)$$

E_v e *P* indicam taxas médias anuais da evapo-transpiração potencial e da precipitação

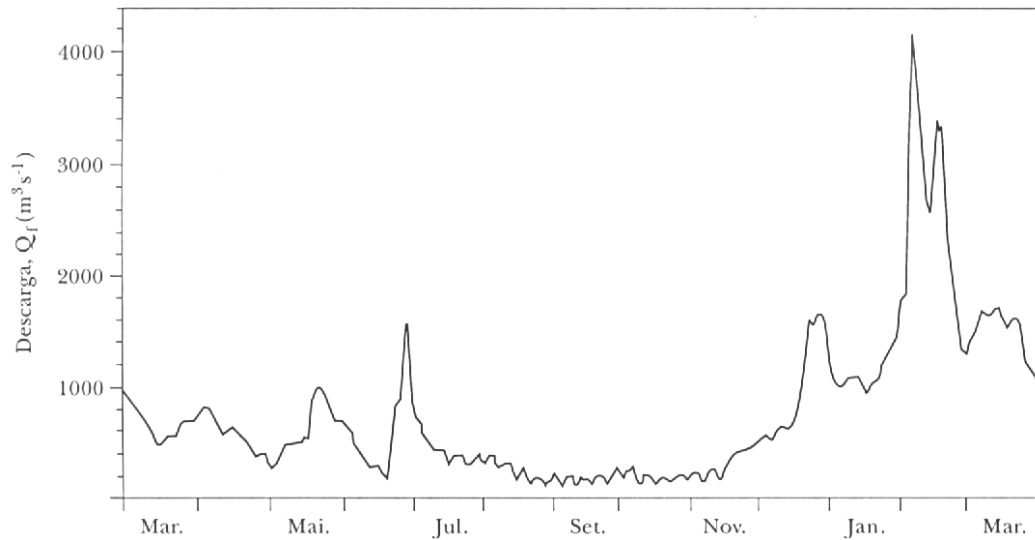
•A razão de escoamento superficial decresce exponencialmente entre os valores extremos de:

$$\frac{\Delta f}{P} = 0 \quad \text{quando} \quad E_v \gg P$$

$$\frac{\Delta f}{P} = 1 \quad \text{quando} \quad E_v \ll P$$

$$E_v = 1,2 \times 10^9 \exp\left(-\frac{4,62 \times 10^3}{T}\right)$$

$$Q_f = \frac{\Delta f}{P} P A_T = \Delta f A_T$$



Variabilidade temporal da descarga fluvial na Winyah Bay, EUA. Q_f foi estimada pela somatória das descargas diárias nas sub-bacias de drenagem dos principais afluentes, extrapolados até a cabeceira do estuário através do fator de correção.

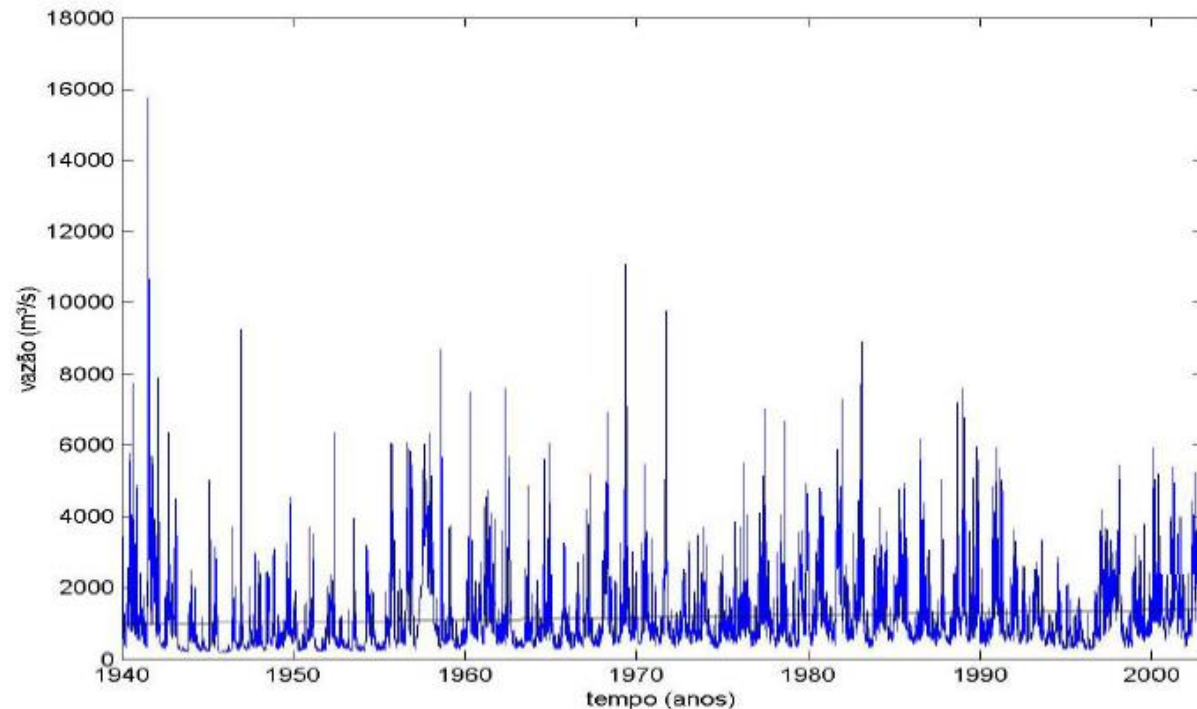


Figura 2.3. Série temporal de descarga fluvial da soma das contribuições dos rios Jacuí e Taquari e sua respectiva média e tendência linear. As medidas são realizadas de 01/1940 a 12/2002.

Efeito da descarga fluvial

- Aparece sob duas formas:
 - Baroclínica – gradiente de densidade – circulação gravitacional
 - Barotrópica – desnível entre o estuário e a zona costeira adjacente – por vezes difícil de avaliar
- As escalas temporais envolvidas são:
 - Sazonal
 - Interanual
 - “Alta frequência” – passagem de frentes – Chesapeake Bay, L. Patos

Efeito da descarga fluvial

- Conseqüências
- Baroclínica:
 - Estratificação vertical
 - Gradiente longitudinal de salinidade

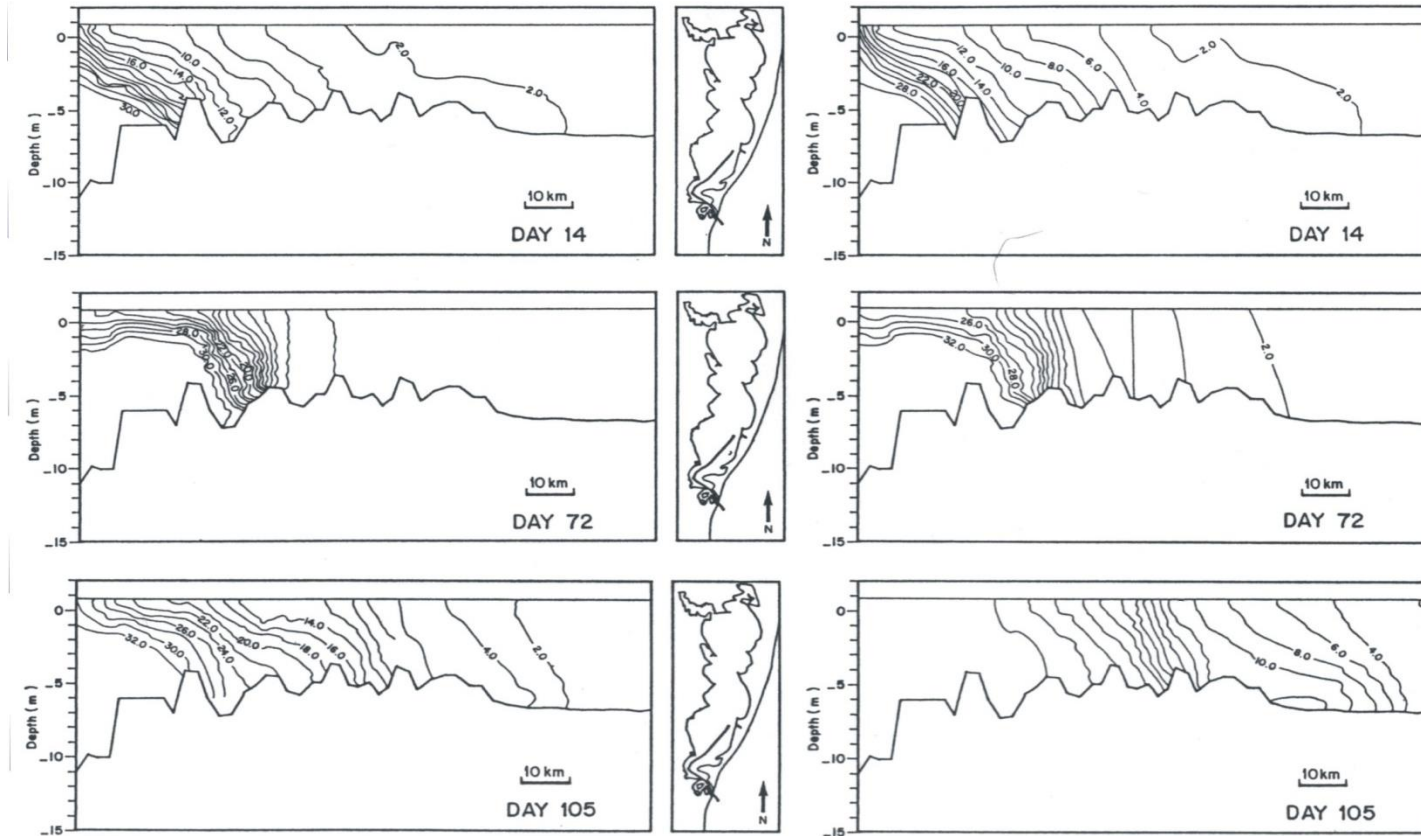
Barotrópica

Posição da cunha salina

- Balanço hídrico – descarga, precipitação e evaporação (Mehta, 1990)

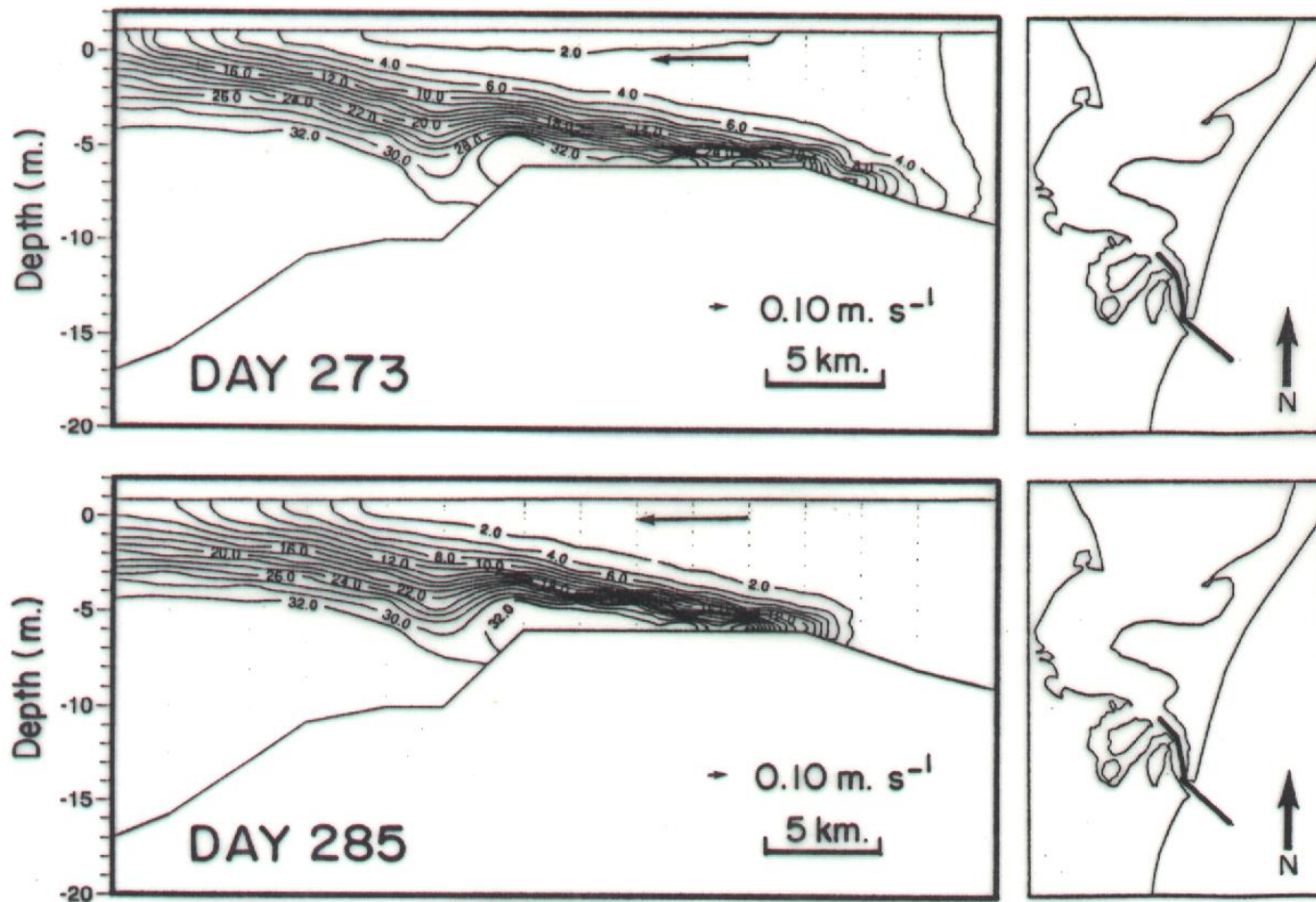
Efeito da descarga fluvial

Experimentos com (esq.) e sem efeito do rio



Möller (1996)

Efeito do rio – alta descarga ($Q > 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$)



Möller (1996)

Efeito da descarga fluvial no estuário de Tavy (Uncles et al., 2011)

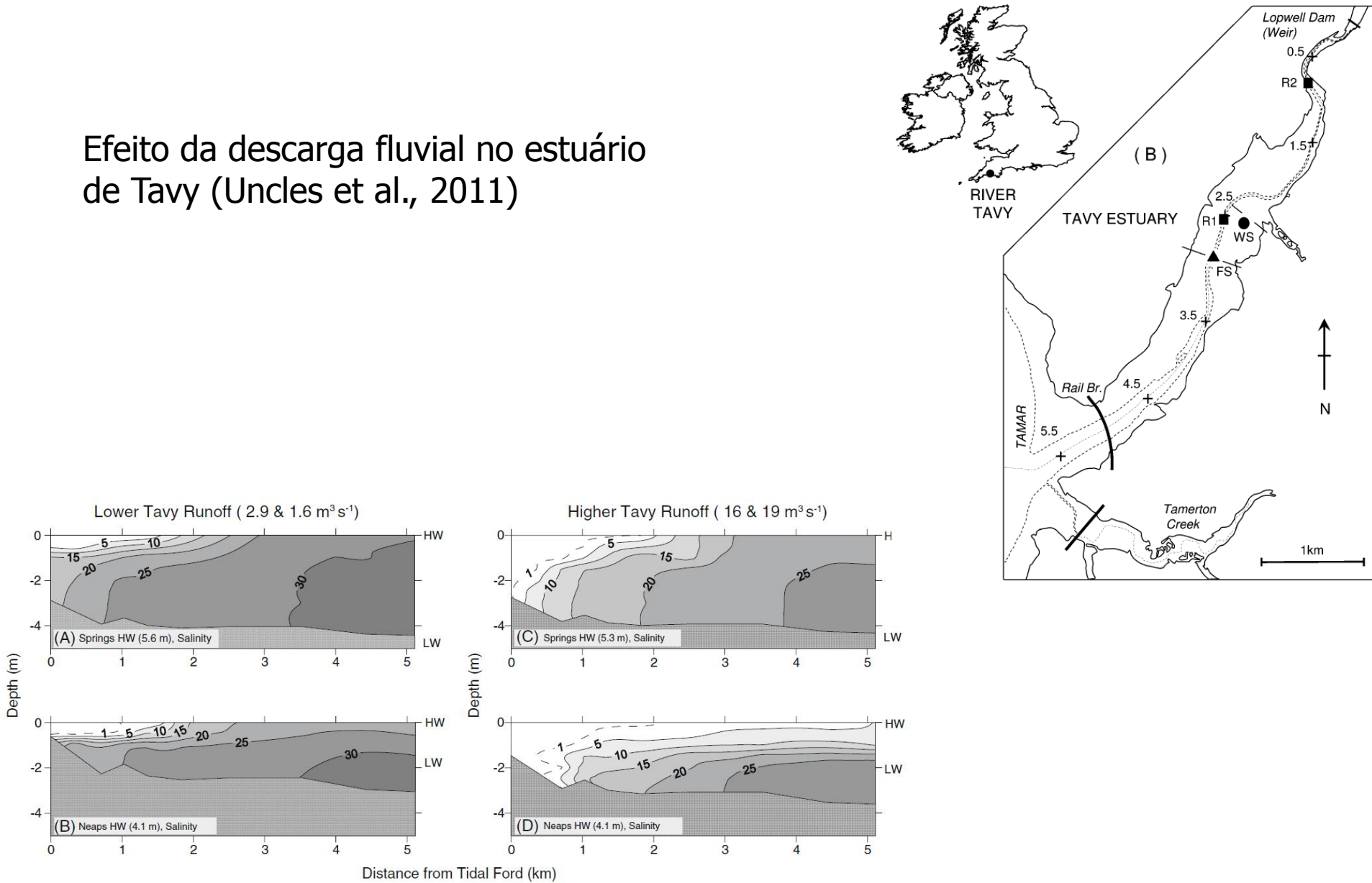
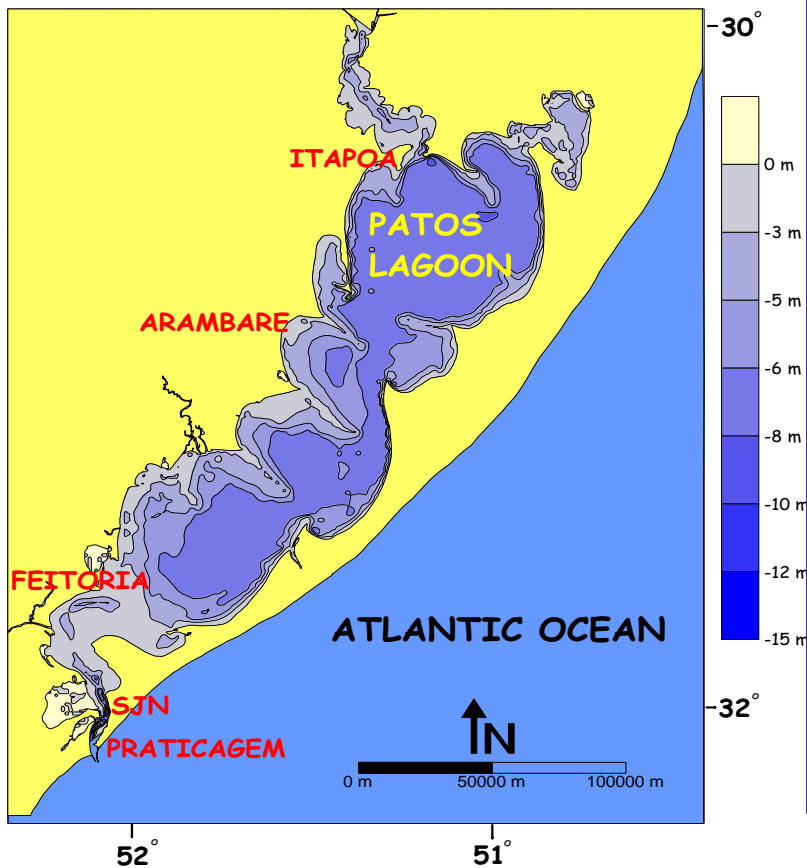


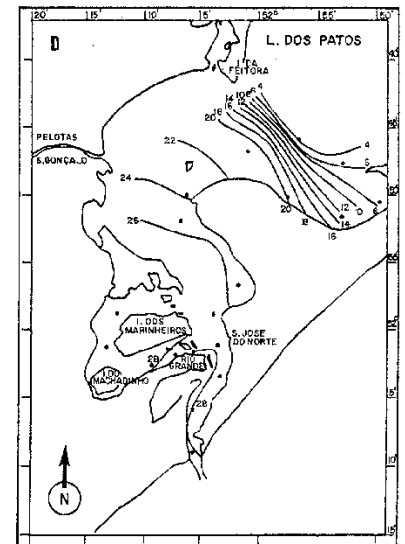
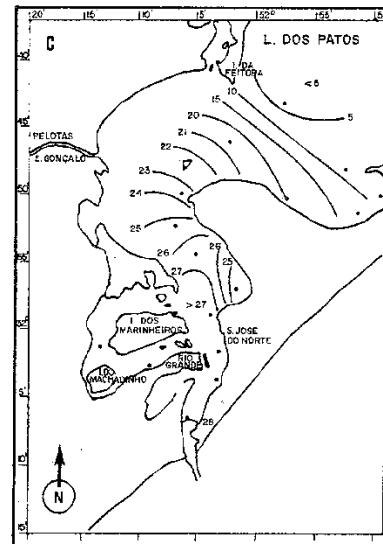
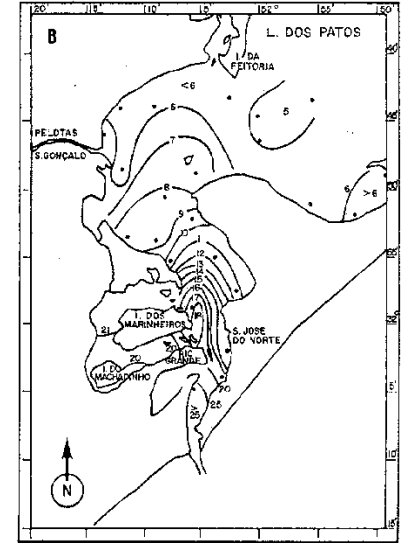
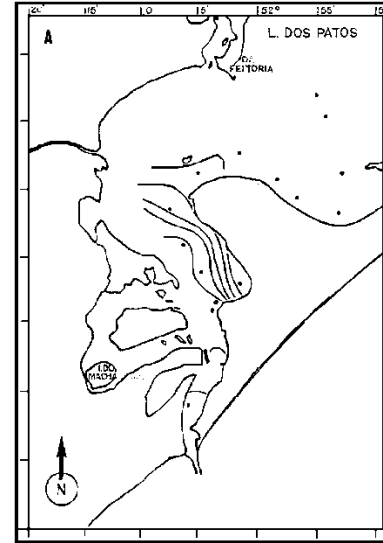
Fig. 3 Salinity distributions from longitudinal and vertical surveys of the Tavy Estuary, undertaken between the tidal ford and the rail bridge close to HW of spring tides (a, c) and neap tides (b, d) and at higher (c, d) and lower (a, b) freshwater runoff

Estudo de caso: variabilidade dos processos de circulação e suas conseqüências na Lagoa dos Patos



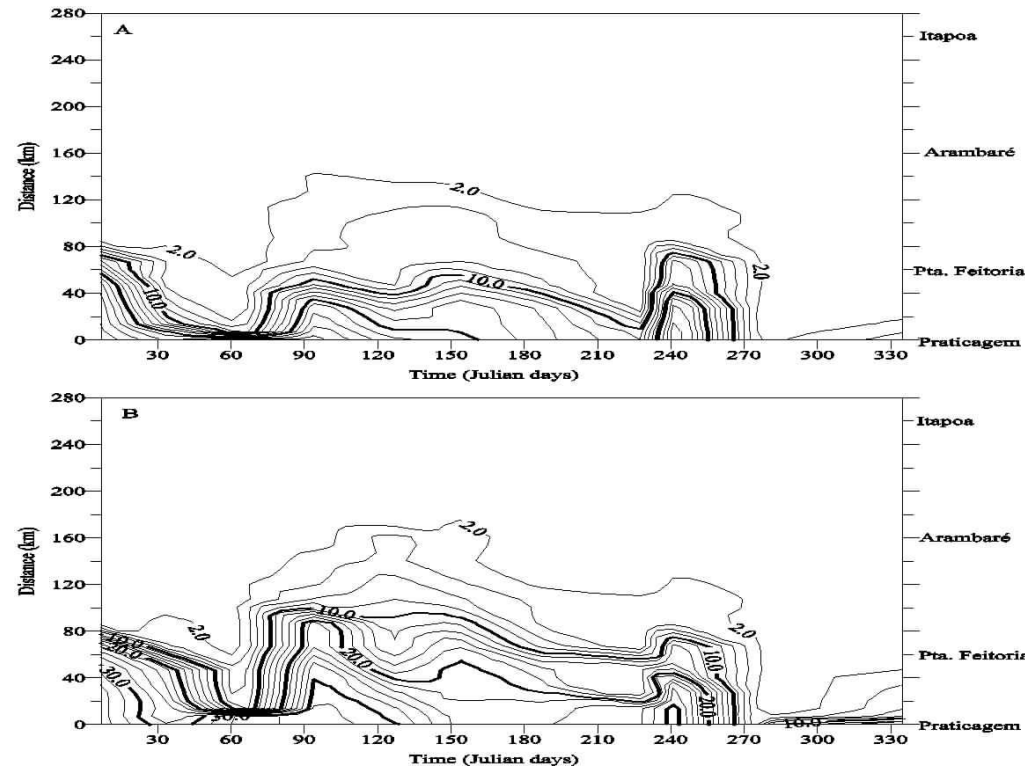
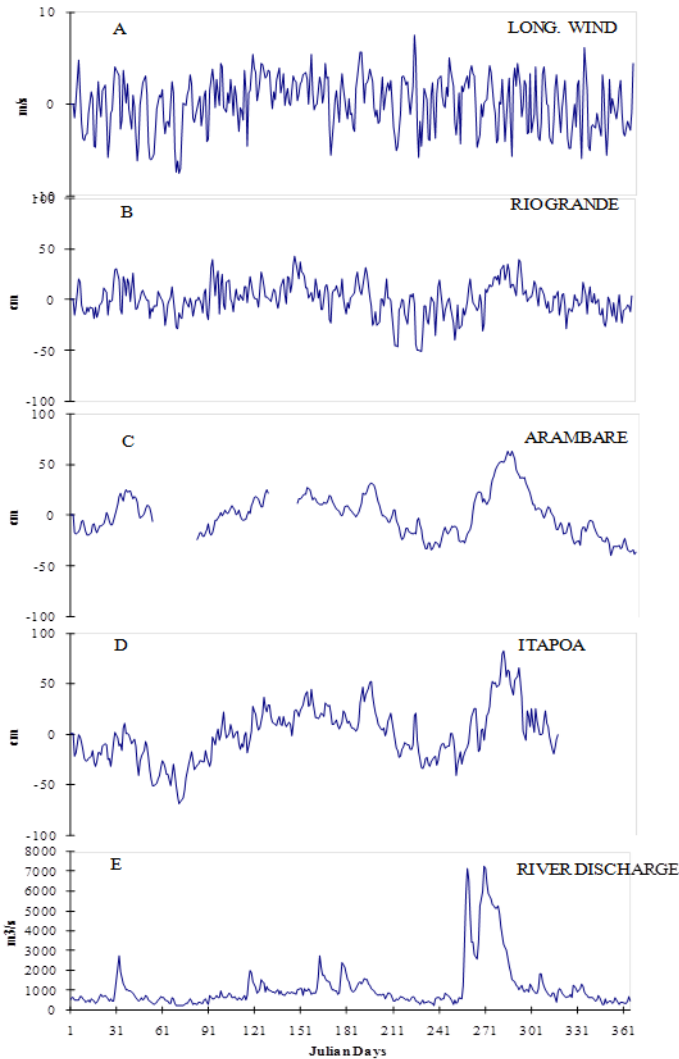
- Comprimento 250 km
- Largura média 40 km
- Profundidade média 5 m
- Área 10.360 km²
- Morfologia complicada
- Descarga média 2.400 m³s⁻¹
- Estuário de micromaré
- Altura média 0.47 m
- Regime de ventos: NE / SW
- Conectada ao oceano por um estreito canal

A área estuarina



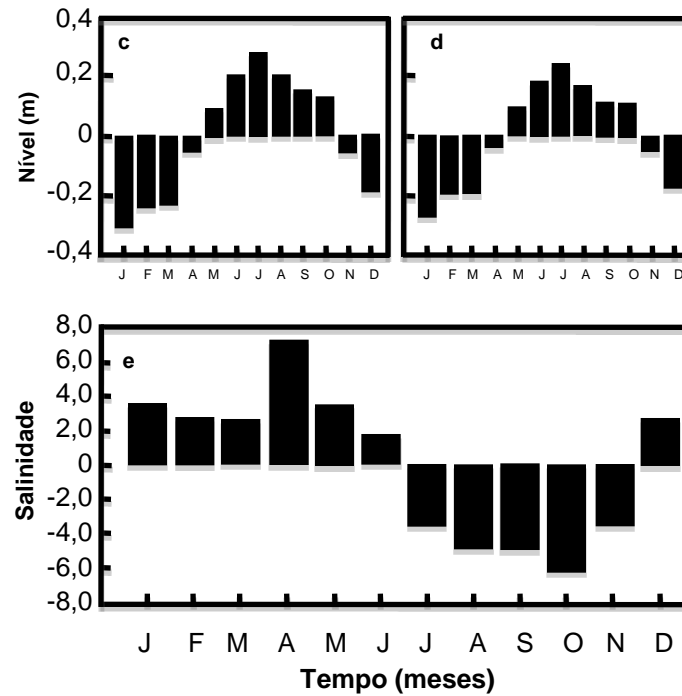
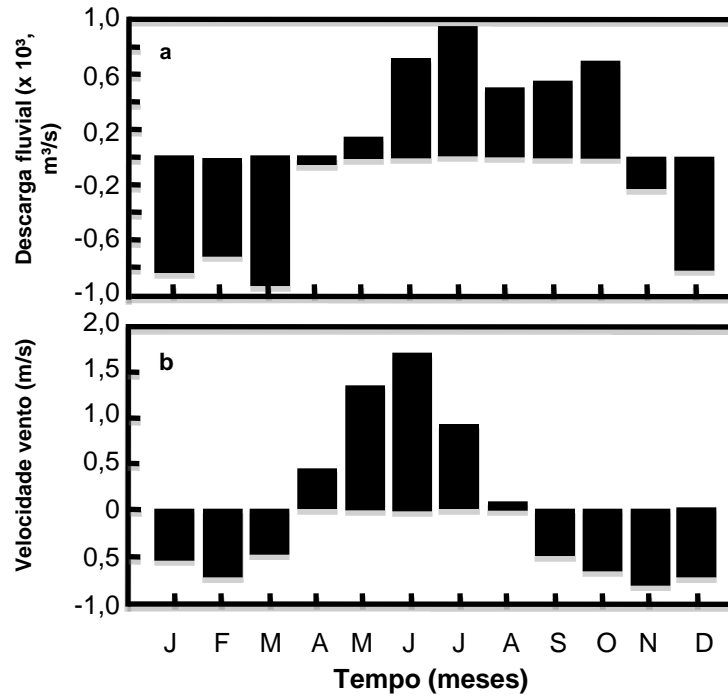
Ação do vento e da descarga fluvial

Séries de dados obtida em 1988 - PLP (CIRM/FURG)



Möller e Castaing, 1999

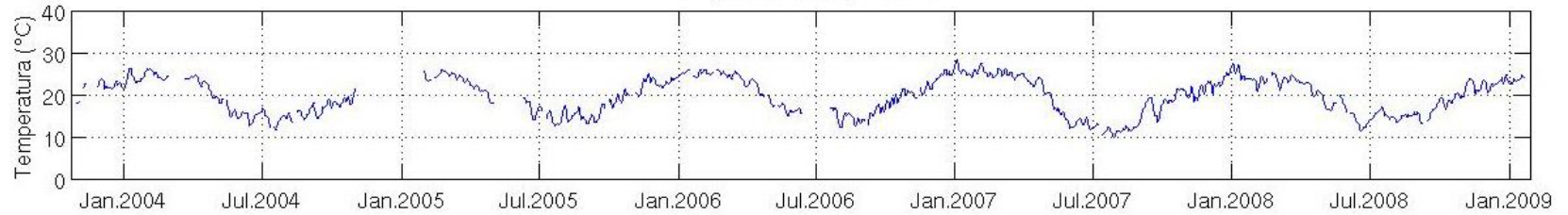
Variabilidade sazonal: vento e descarga - impactos



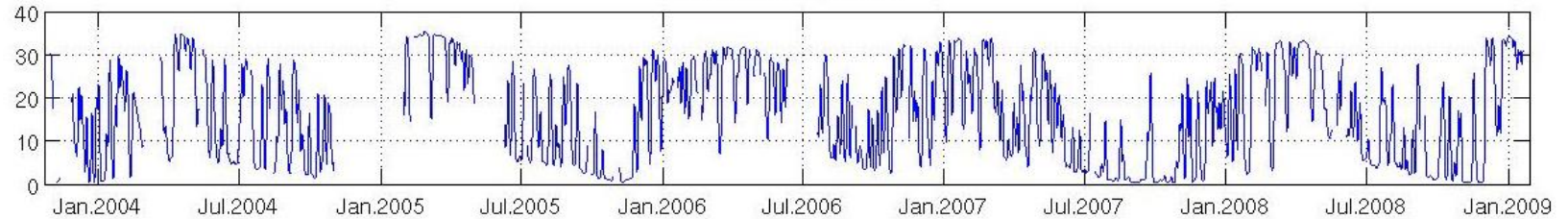
Fonte: modificado de Marques (2005)

Ciclos de salinização das águas

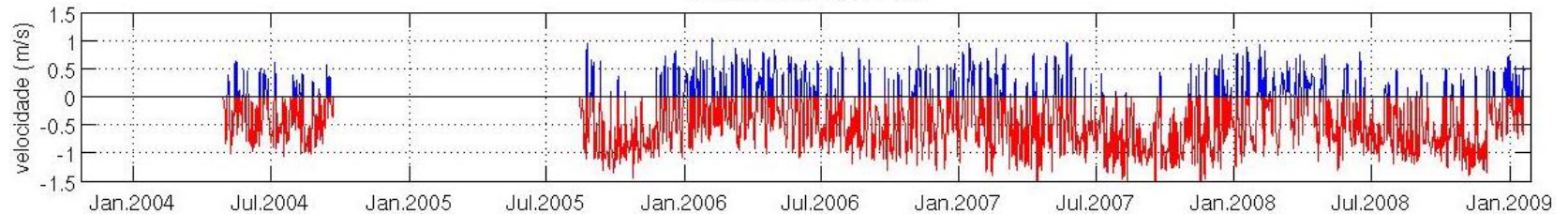
Temperatura Superficial



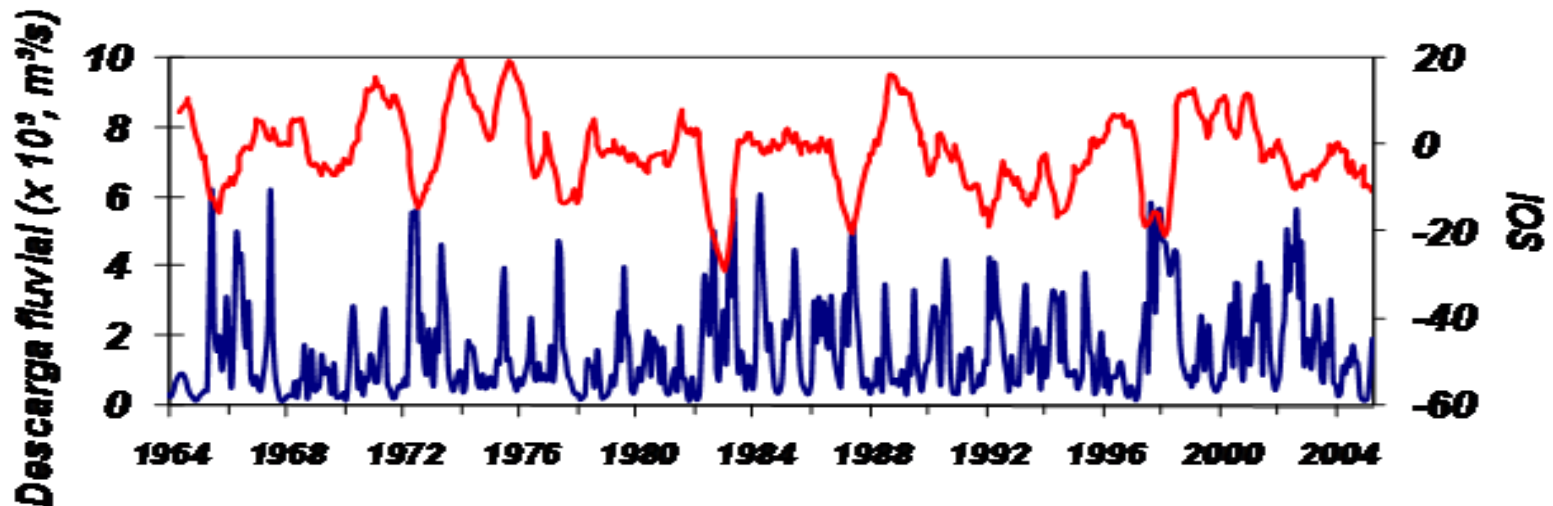
Salinidade Superficial



Velocidade Superficial



Variabilidade inter-anual

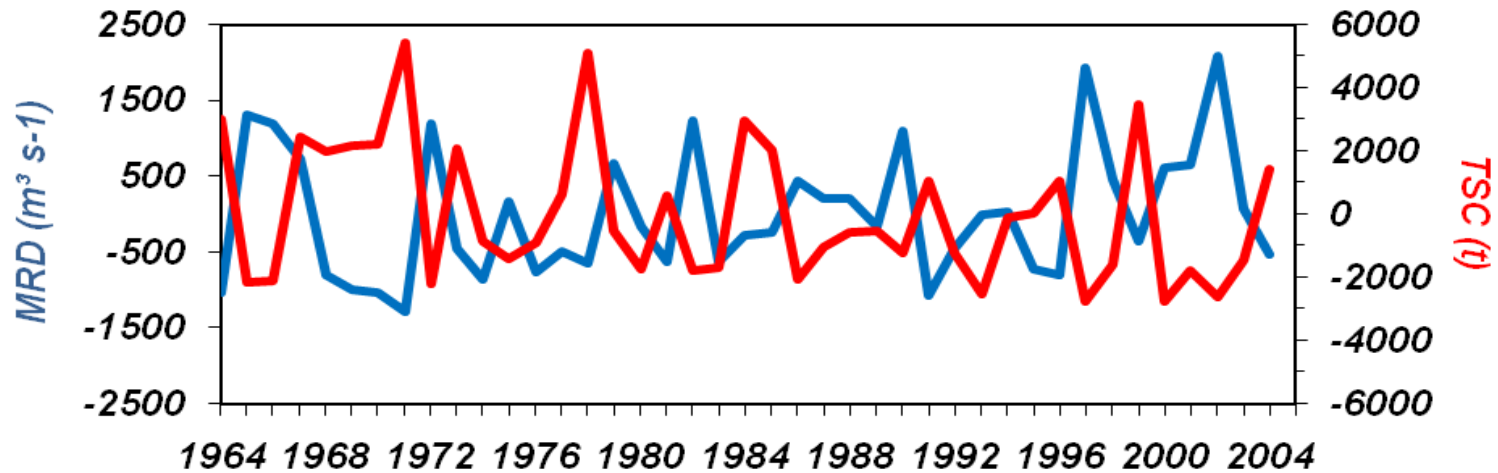
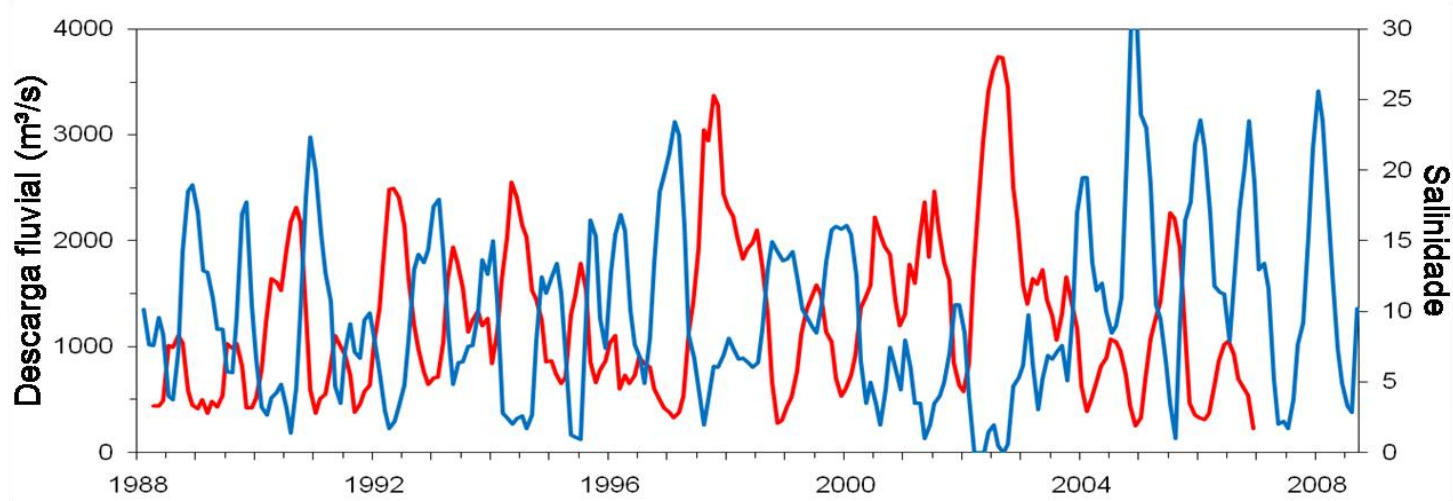


Möller et al. (2009)

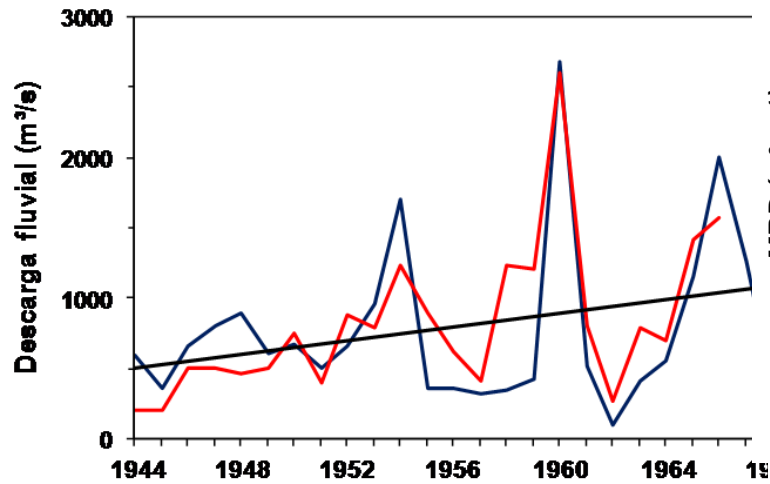
Regime de ventos afetado por El Niño (NE) e La Niña (SO) – Barros et al. (2002). Piola et al. (2005) – impactos no deslocamento da Pluma do Rio da Prata.

Tendências?? Cenários

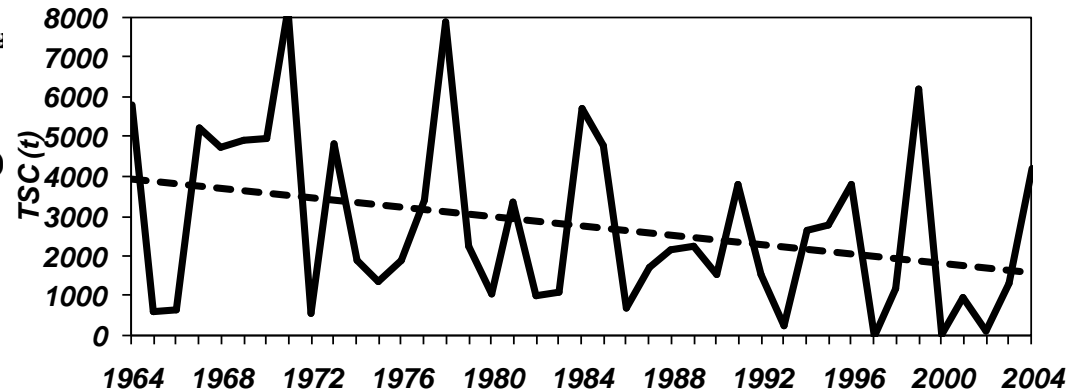
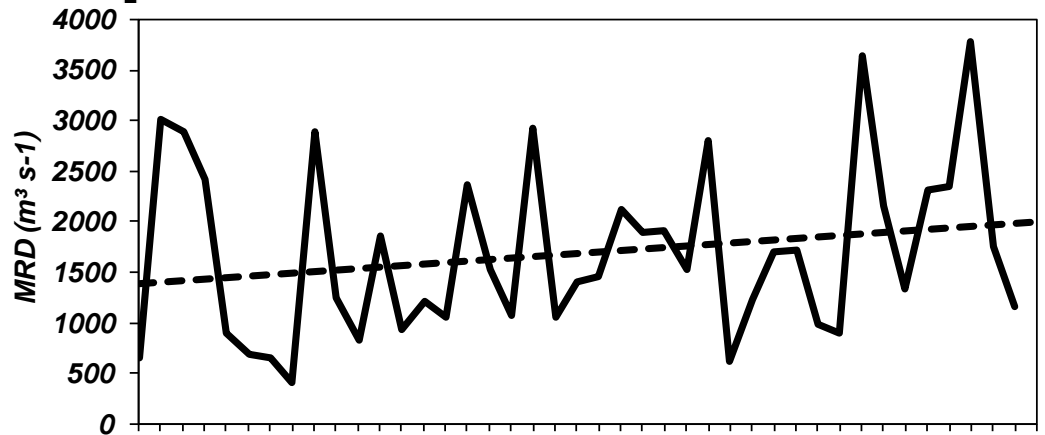
Descarga fluvial - impactos



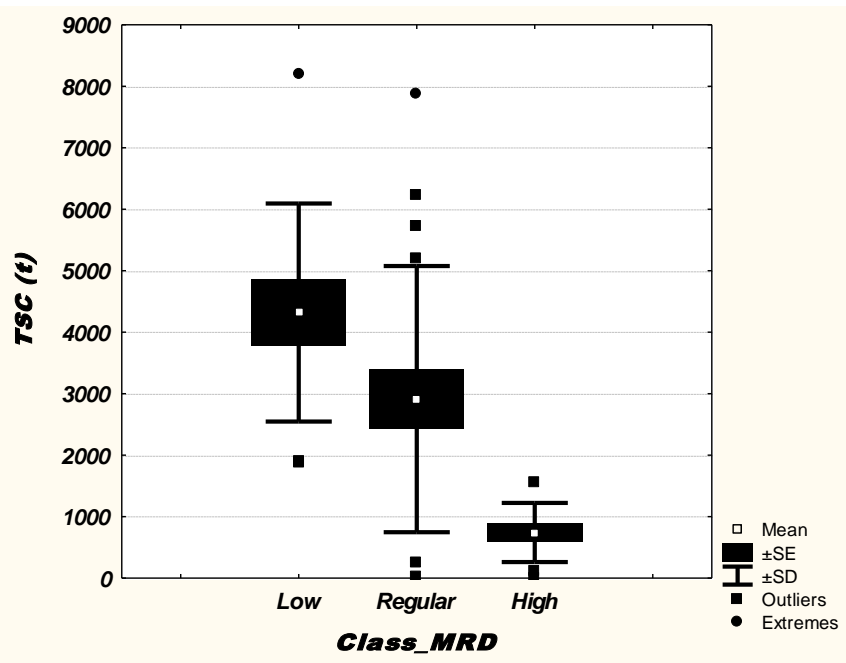
Variabilidade de longo período - impactos



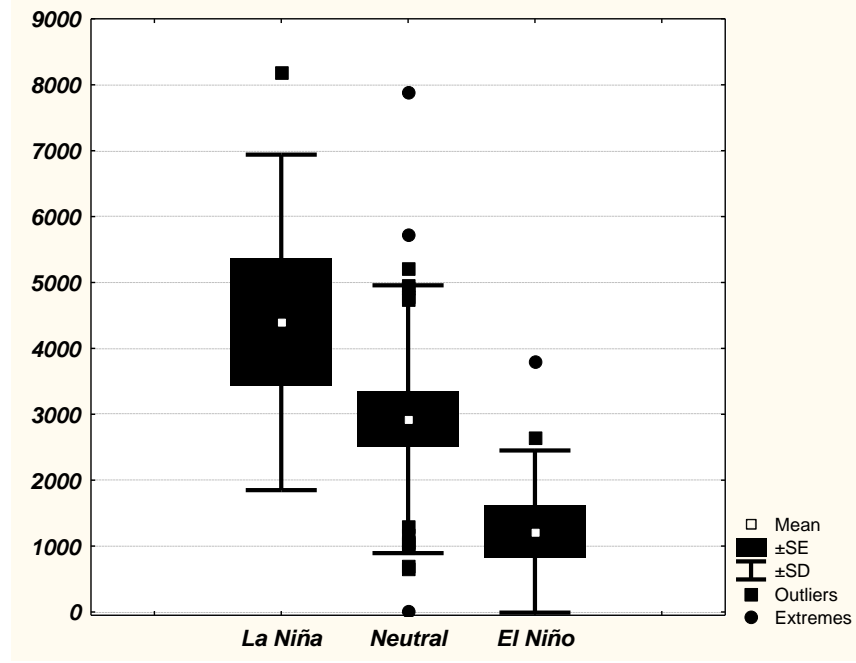
Tendências:
Descarga: $20 m^3/s$ por ano
Nível: $2.5 mm/ano$



Möller et al. (2009)



- Box Plot Categorizado por Tipo de Descarga da variável despesa acumulada do camarão (jan a mai), mostrando a distribuição da média, erro padrão da amostra e da população.



- Box Plot Categorizado por Tipo de evento ENOS da variável despesa acumulada do camarão (jan a mai), mostrando a distribuição da média, erro padrão da amostra e da população

CONSEQÜÊNCIAS DOS EFEITOS DA DESCARGA FLUVIAL

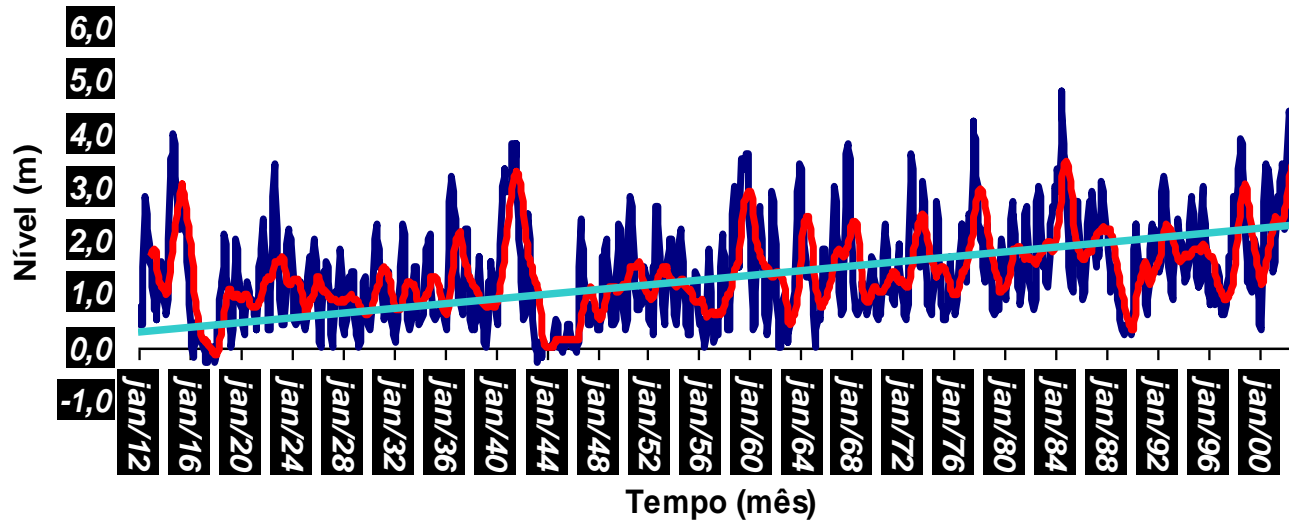
Variação de nível

Pesca de espécies com importância
comercial

Transporte de sedimentos

Alterações climáticas

caso Lagoa Mirim



Tendência:

Geral: 1,6 cm/ano

Entre 1912 e 1975: 0,5 cm/ano

Após 1977: 1,7 cm/ano – efeito da barragem?

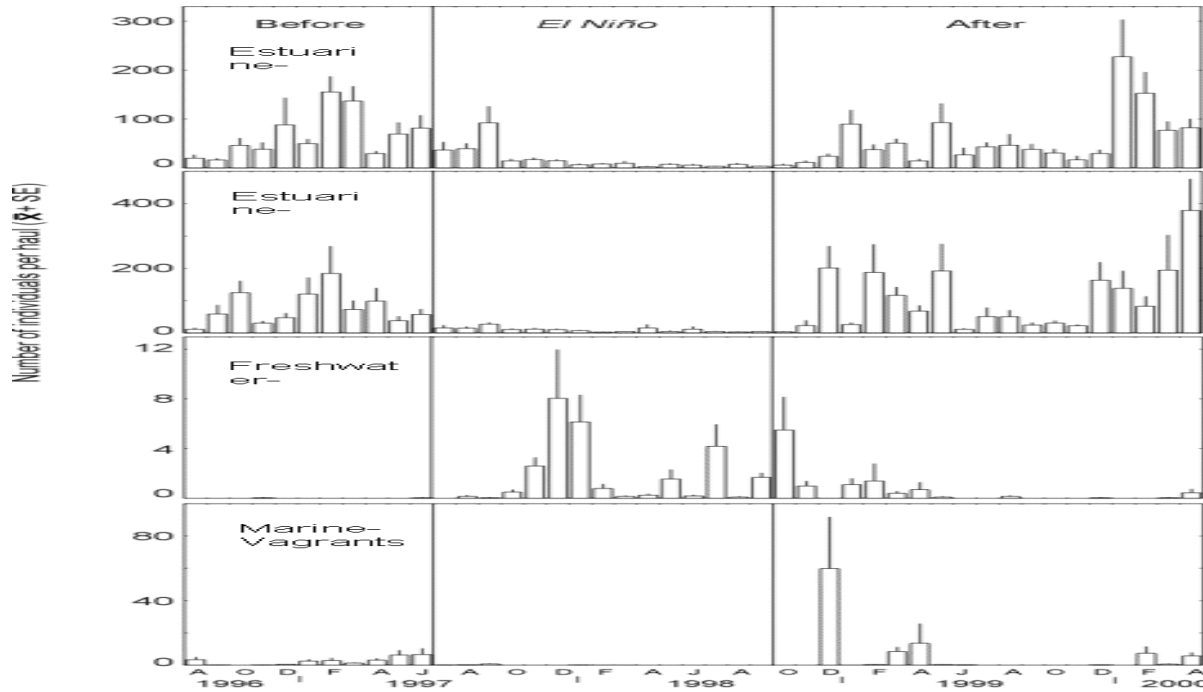
O que isto representa?

Se Verdadeira a tendência:

- redução na área de plantio de Arroz;
- Baixa dinâmica acarreta em alto tempo de residência;
- Ondas: erosão de margens;
- aumento de áreas alagadas: problemas de saúde pública ;

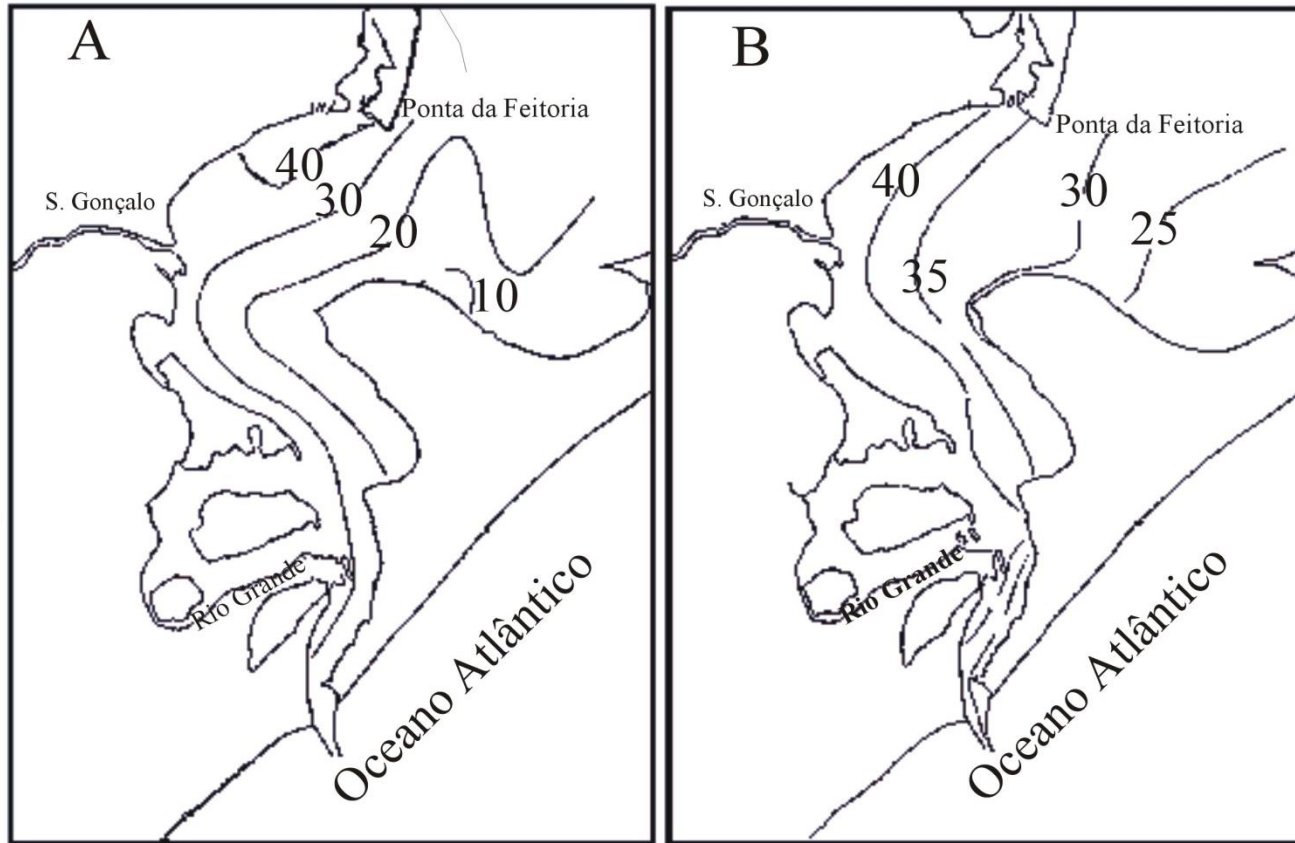
Inner lagoon - biological processes

Monthly mean fluctuations of CPUE



Monthly mean fluctuations of fish CPUE (average number of individuals per seine haul) and 95% confidence intervals for four species groups: estuarine residents, estuarine dependents, freshwater vagrants and marine vagrants from August 1996 to April 2000. The 1997-1998 *El Niño* is delimited from July 1997 to september 2000. Garcia et al. (2000)

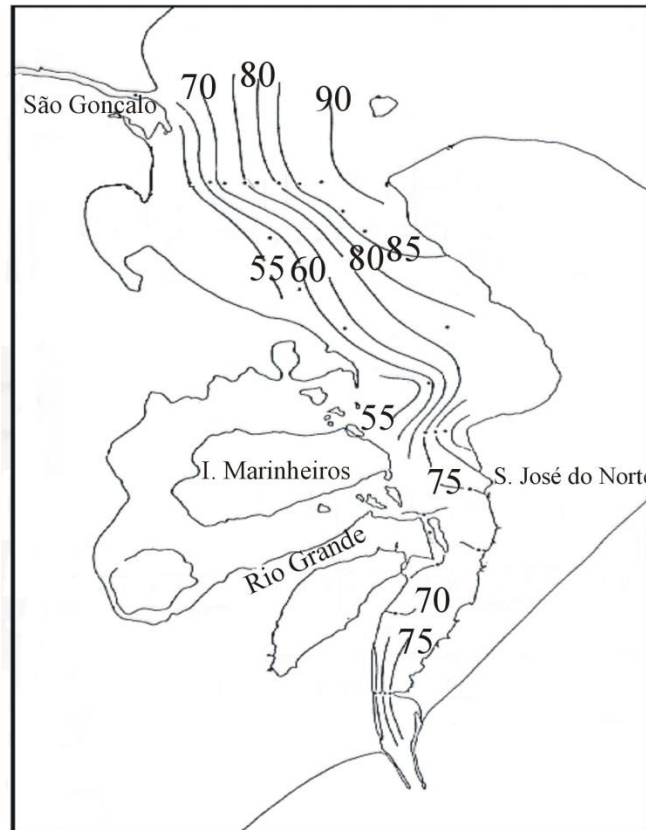
Efeito do rio em processos de transporte sedimentar



Total Suspended Matter (mg/l) 1979/80.. A) Surface; B) Bottom
Average of 15 cruises

: Paim e Möller . (1986)

Efeito do rio em processos de transporte sedimentar



Total Suspended Matter (mg/l) - 1982/83
Average of 24 cruises

Paim e Möller. (1986)

Depósitos de lama formados sobre a praia após fortes tempestades

Origem: sedimentos finos transportados para o mar pela Lagoa dos Patos. Aumento da quantidade em períodos de fortes descargas de rios.



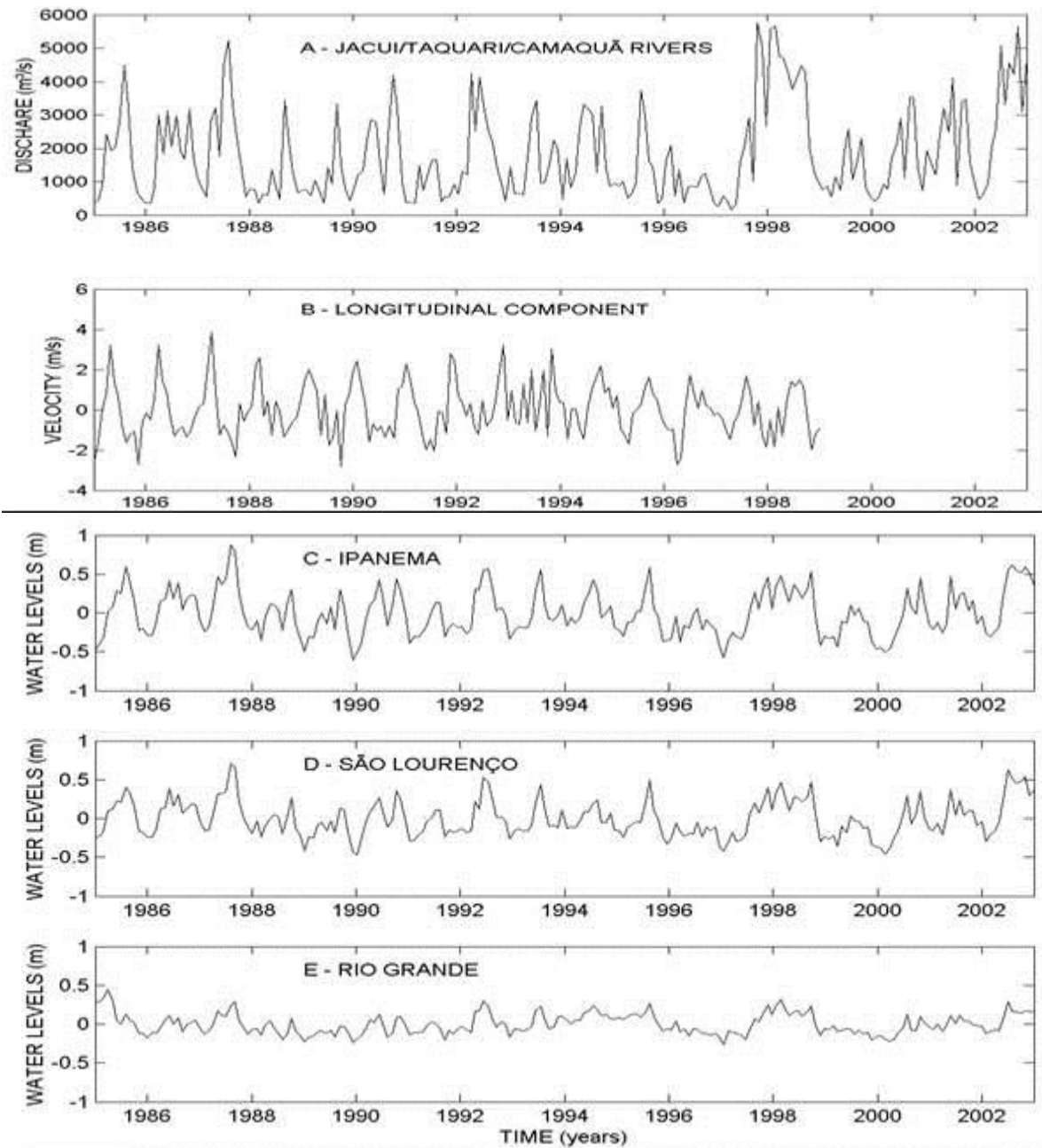
Afeta:

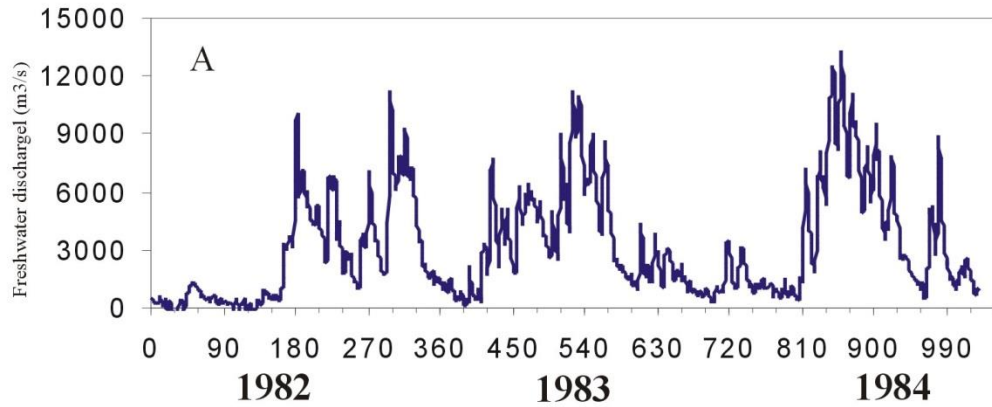
Propagação de ondas

Mata vários tipos de organismos - fundo

Turismo

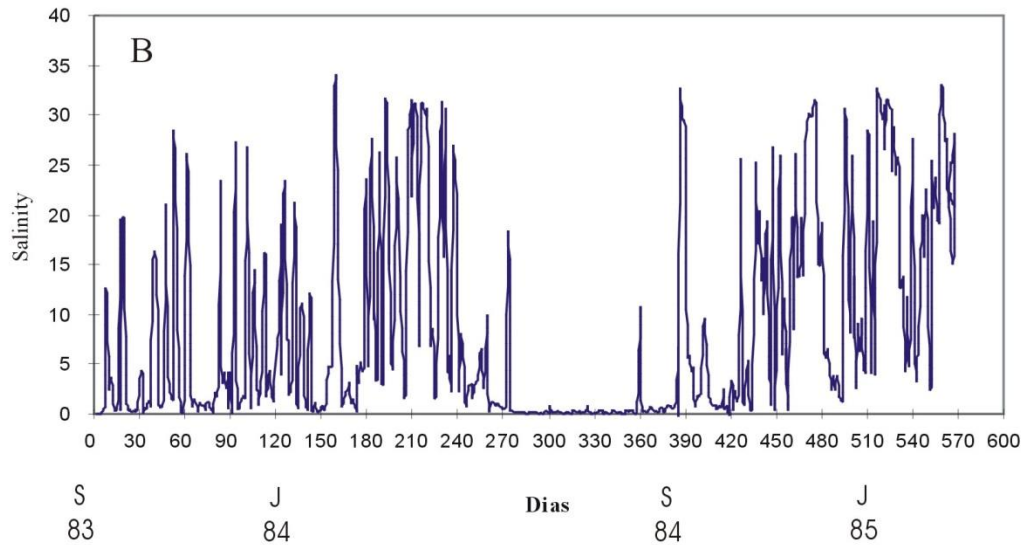
Segurança para banhistas, surfistas,
tráfego de carros





A) Freshwater discharge in Patos Lagoon area from Jan/82 a Nov/84

Paim e Möller Jr. (1986)



B) Surface salinity temporal variation in the entrance channel area from Set/83 a Mar/85

Baumgarten e Niencheski (1986)

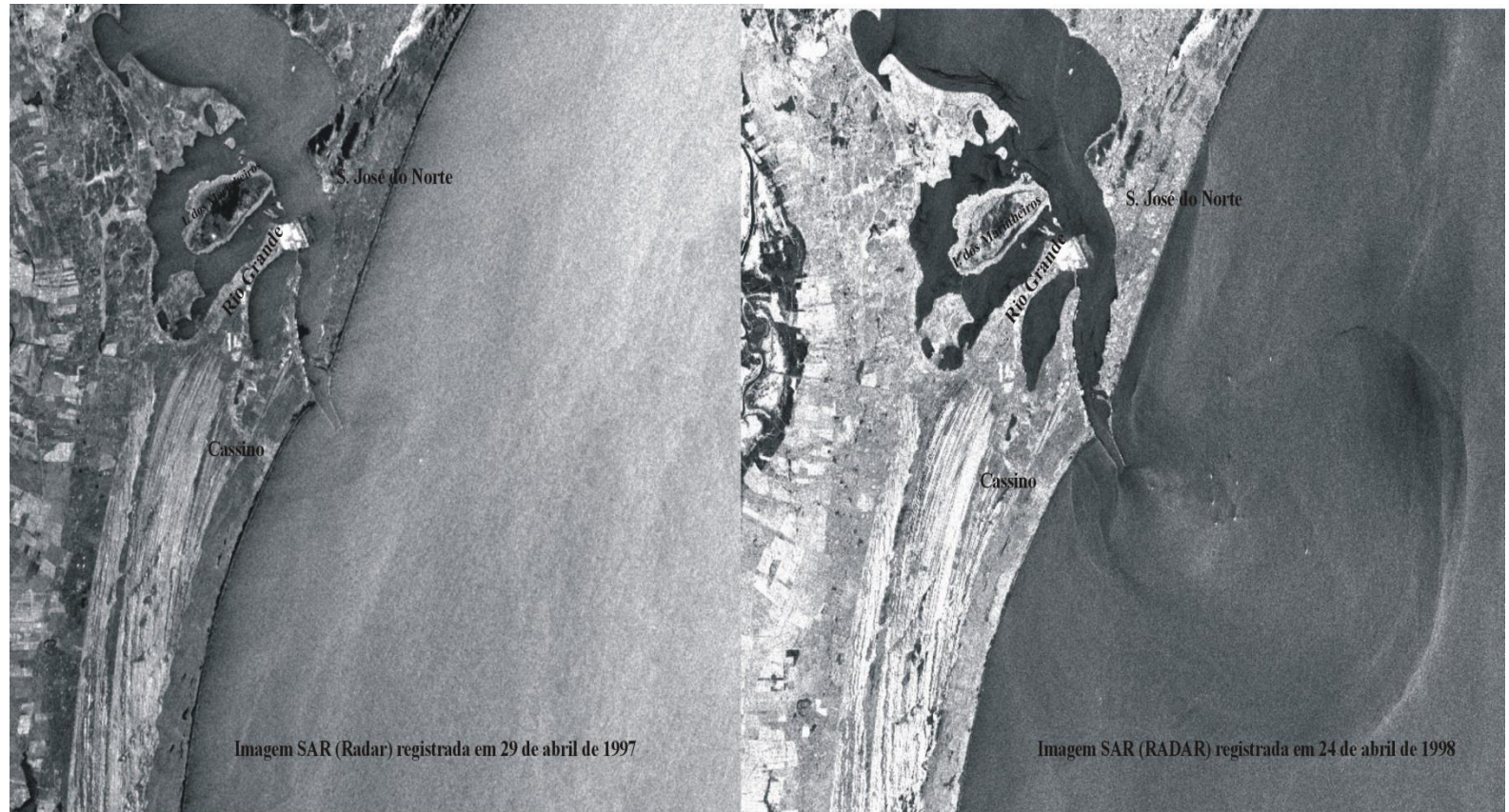
Buoyancy flow in the coastal zone – modified by wind regime



Landsat image – 06 Jul87

Coastal area

Buoyancy flow in the coastal zone – modified by wind regime



Conclusões sobre os processos de circulação da Lagoa dos Patos

- **A Lagoa dos Patos é um sistema que tem a dinâmica de suas águas condicionada pela descarga de água doce.**
 - Em baixas e moderadas descargas o vento tende a forçar a circulação.
 - Em altas descargas, apenas ventos muito fortes podem forçar entradas de águas salgadas na Lagoa dos Patos
- **Em períodos prolongados de baixas descargas:**
 - Maior salinização das águas
 - Águas mais transparentes
 - Maior produção de espécies de importância comercial
 - Maior tempo de residência das águas e de substâncias introduzidas no meio (problemas de poluição)
 - Problemas para culturas agrícolas – arroz – exemplo de 1988
- **Em períodos prolongados de altas descargas**
 - Menor salinização das águas (fluxo de rio)
 - Águas mais turvas e alto transporte de sedimentos para o oceano – lama do Cassino
 - Menor produção de espécies de importância comercial – entrada de larvas
 - Menor tempo de residência de substâncias introduzidas na laguna – caso BAHAMAS
 - Enriquecimento da zona costeira
 - Autoerosão – transporte de sedimentos contaminados para o oceano

PELD_Oc. Física: medições diretas

- **Objetivos:**
 - Estimar o fluxo, descarga de água doce e tempo de residência da água no estuário da Lagoa dos Patos.
 - Relacionar dados de fluxo da água com o teor de material em suspensão e fluorescência.
- **Metodologia**
 - Medições de perfis de velocidade e direção de correntes em séries temporais em ponto fixo;
 - Medições de salinidade, temperatura, intensidade do sinal acústico (ISA, material em suspensão) e fluorescência em séries temporais;
 - Aplicação de métodos para transformar dados em perfis em vazão;
 - Aplicação de métodos para transformar ISA em material em suspensão;
 - Aplicação de métodos para cálculo do tempo de residência;

Medições no Canal de Acesso



ADP Sontek fundeado de Agosto 2005 a Agosto 2009;

ADP Sontek fundeado desde Abril 2010

2 CTs Seabird 37SM desde Outubro de 2003

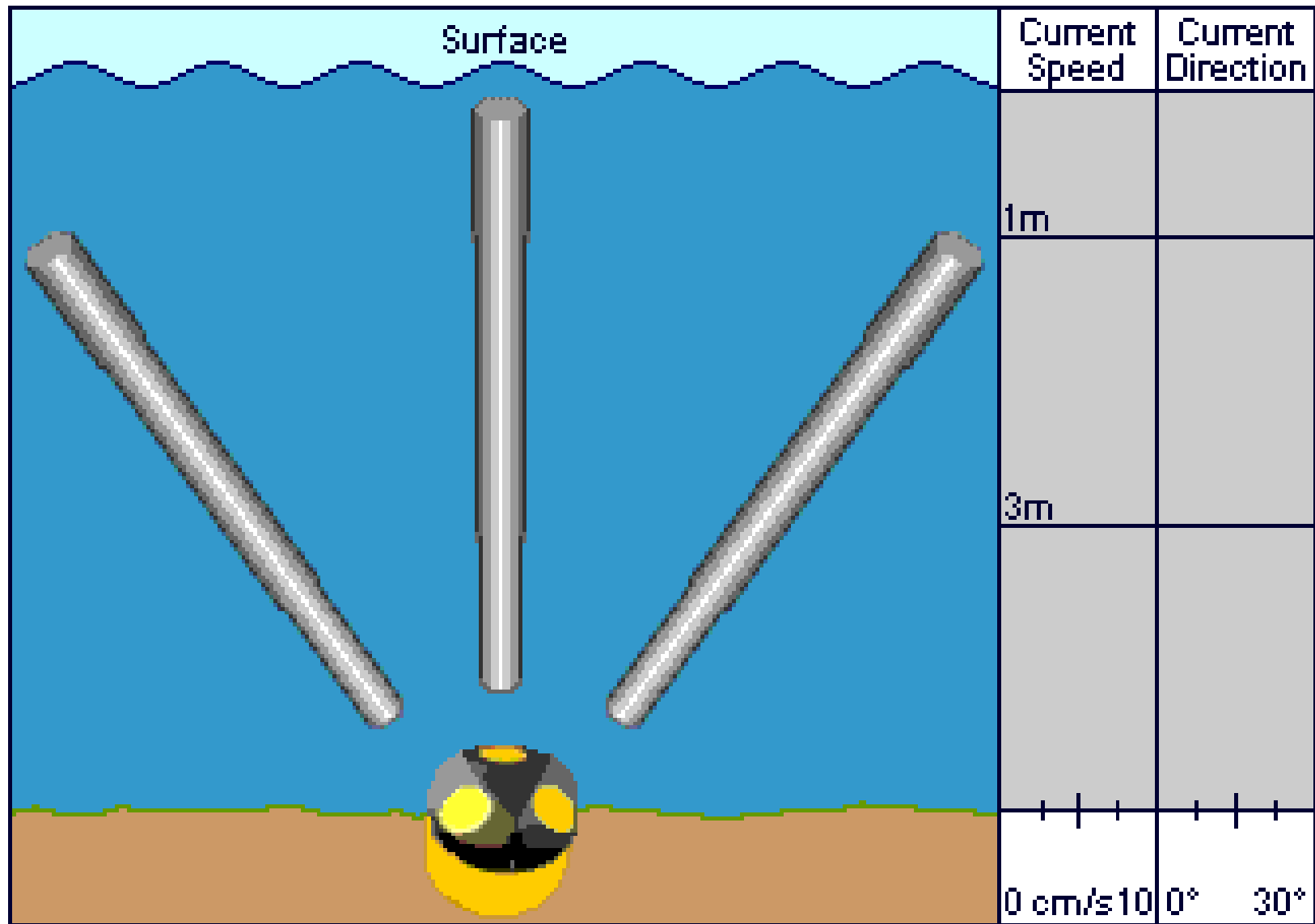
Secções com ADP com *bottom tracking*

Fluorímetro desde março 2010

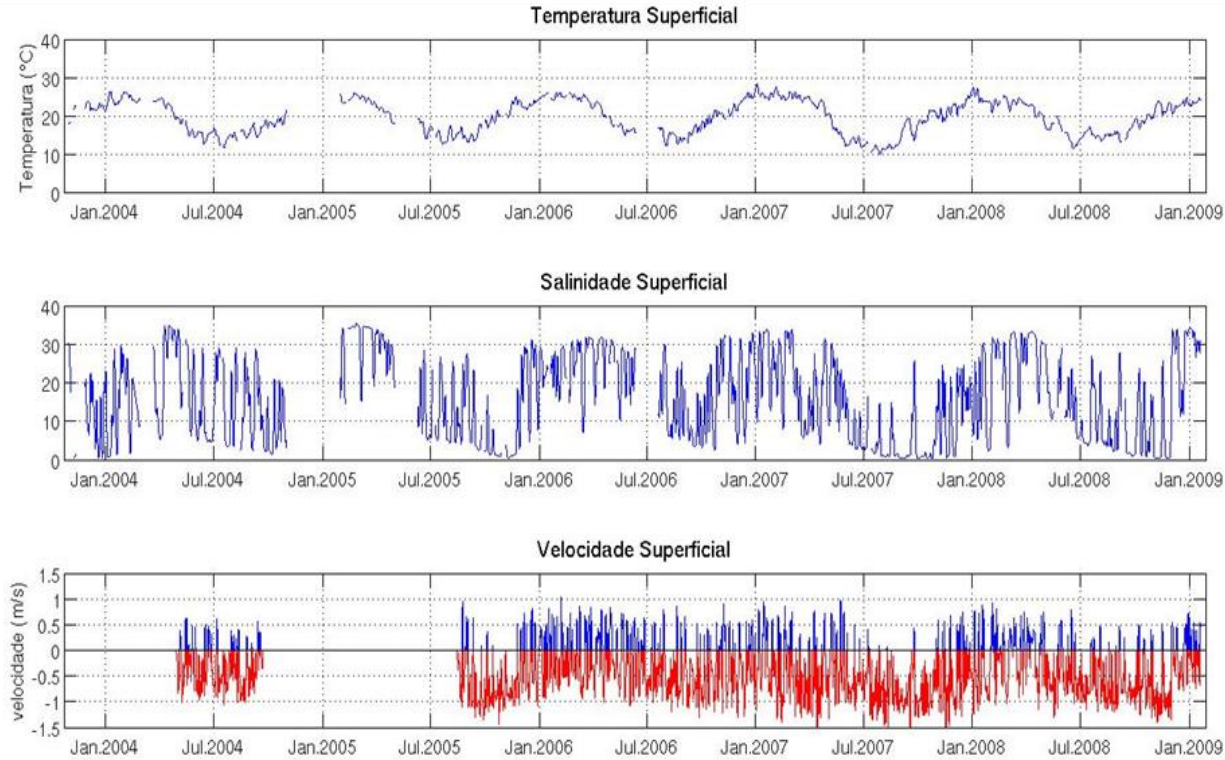


*ADP - Acoustic Doppler
Current Profiler*

- Sontek ADP – 1,0 khz
- Sontek XR – 1,0 MHz



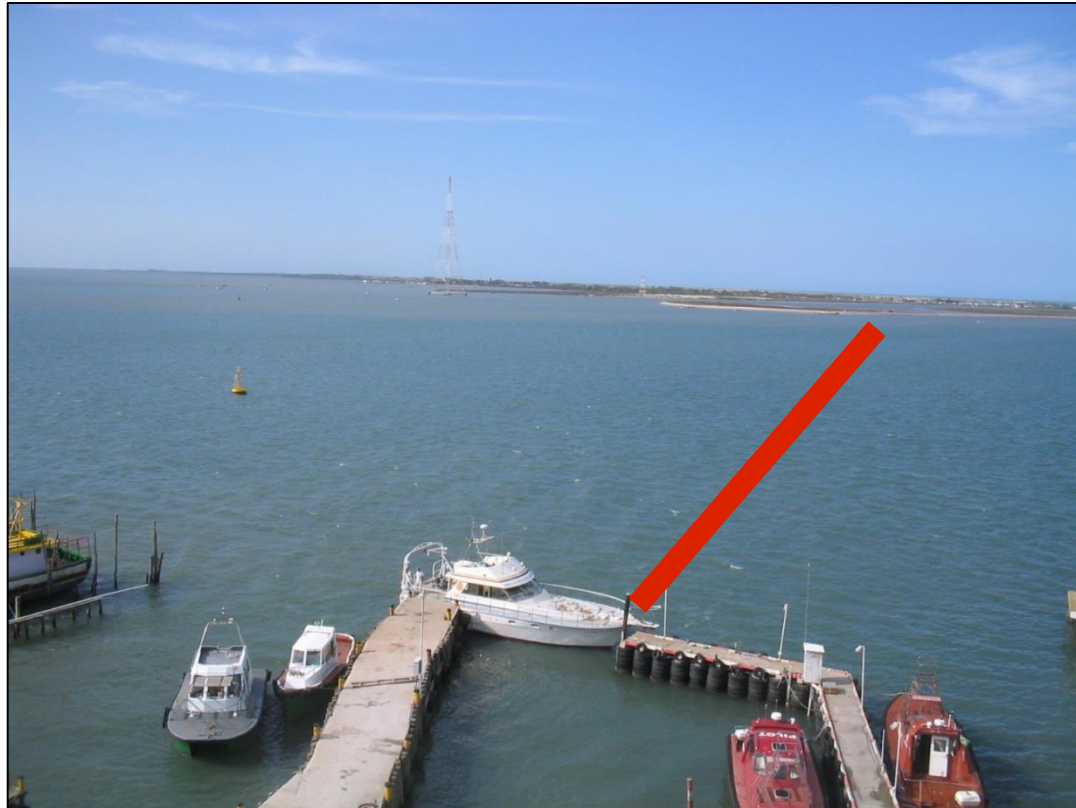
Monitoramento atual



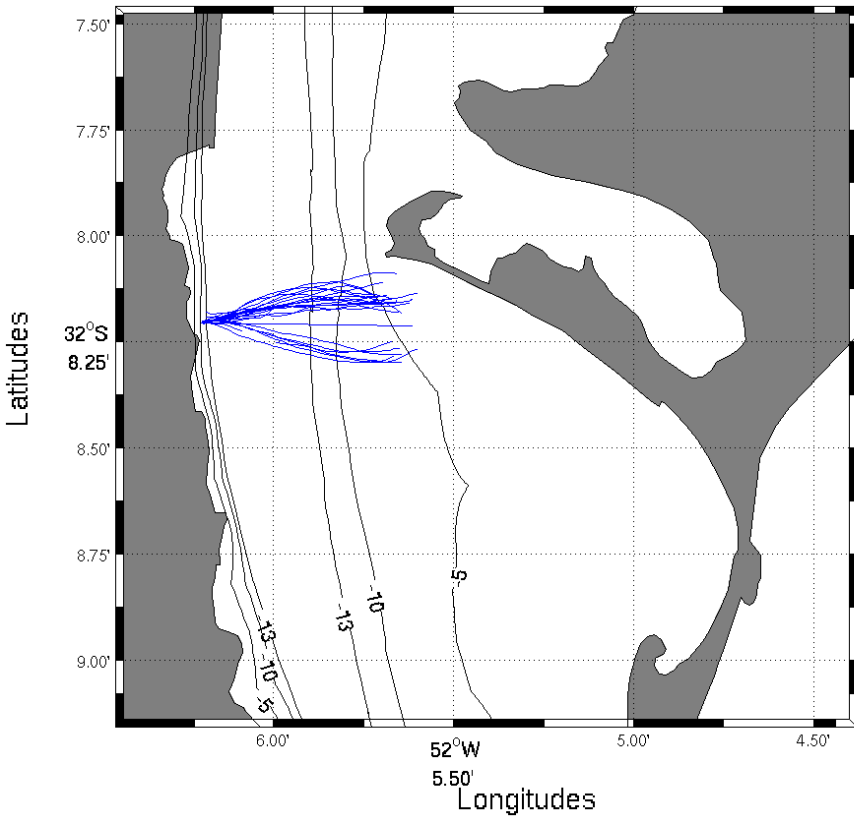
Dados transformados em descarga

ADP com bottom tracking

- Sontek ADP–1500 khz

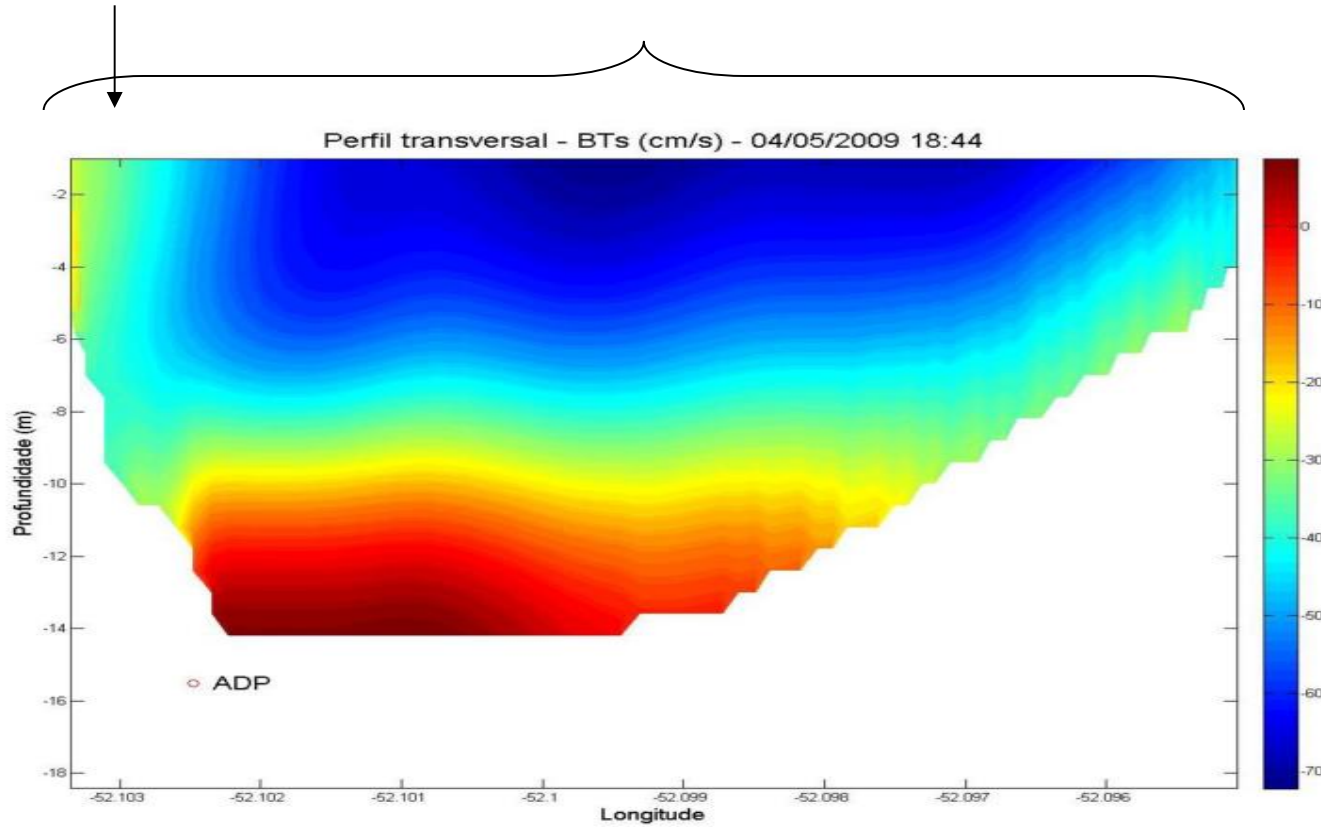


Perfis Amostrados

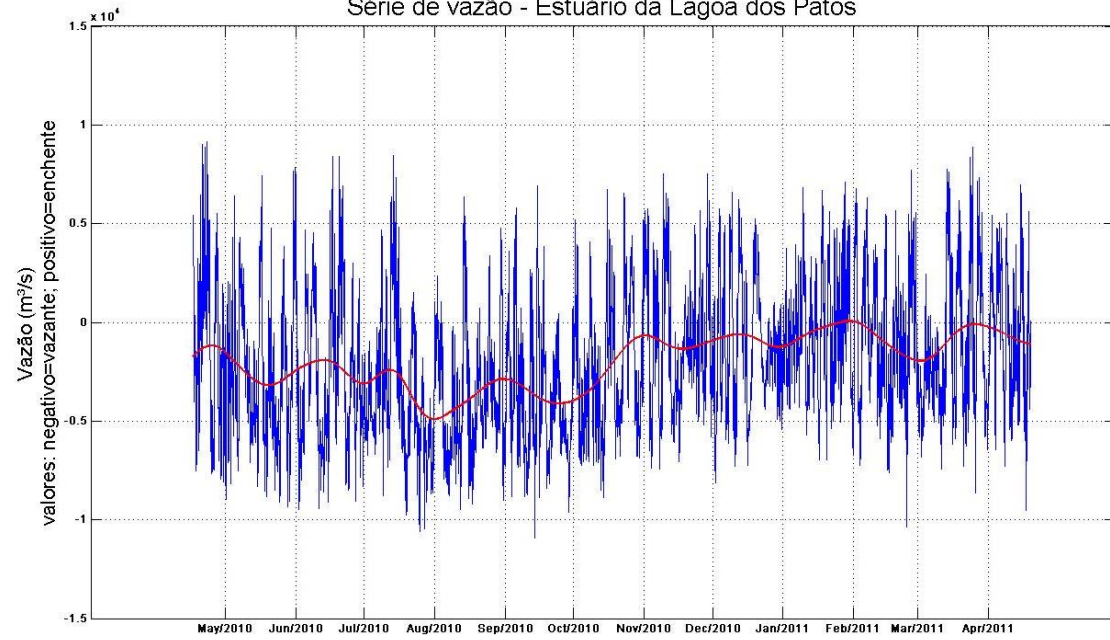


V_i

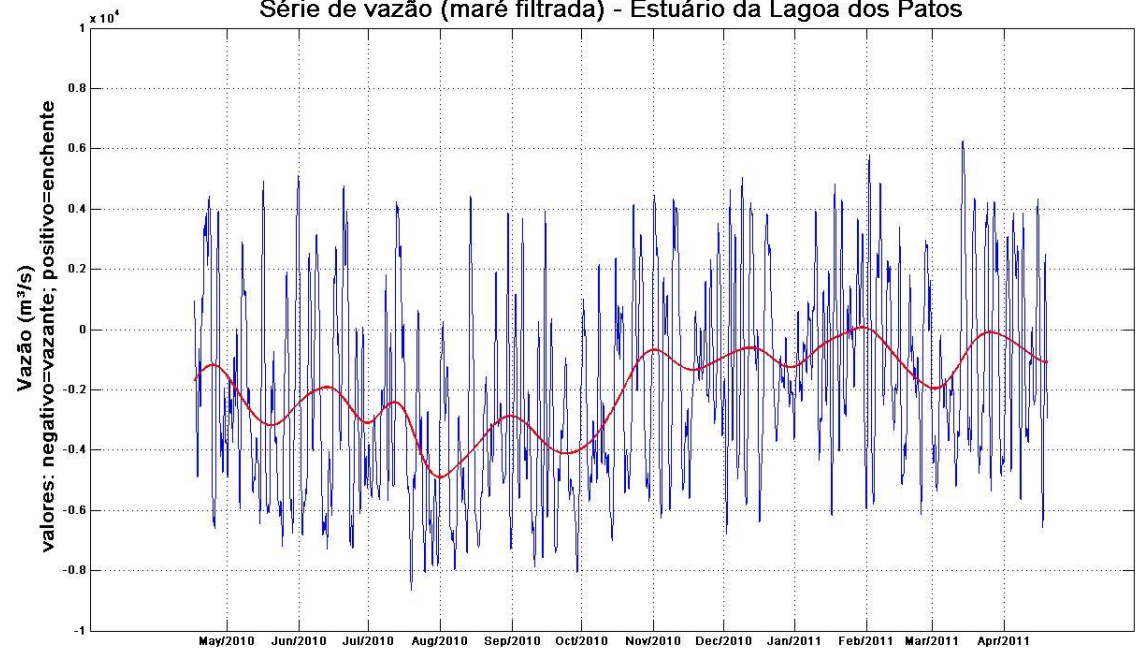
V_m



Série de vazão - Estuário da Lagoa dos Patos

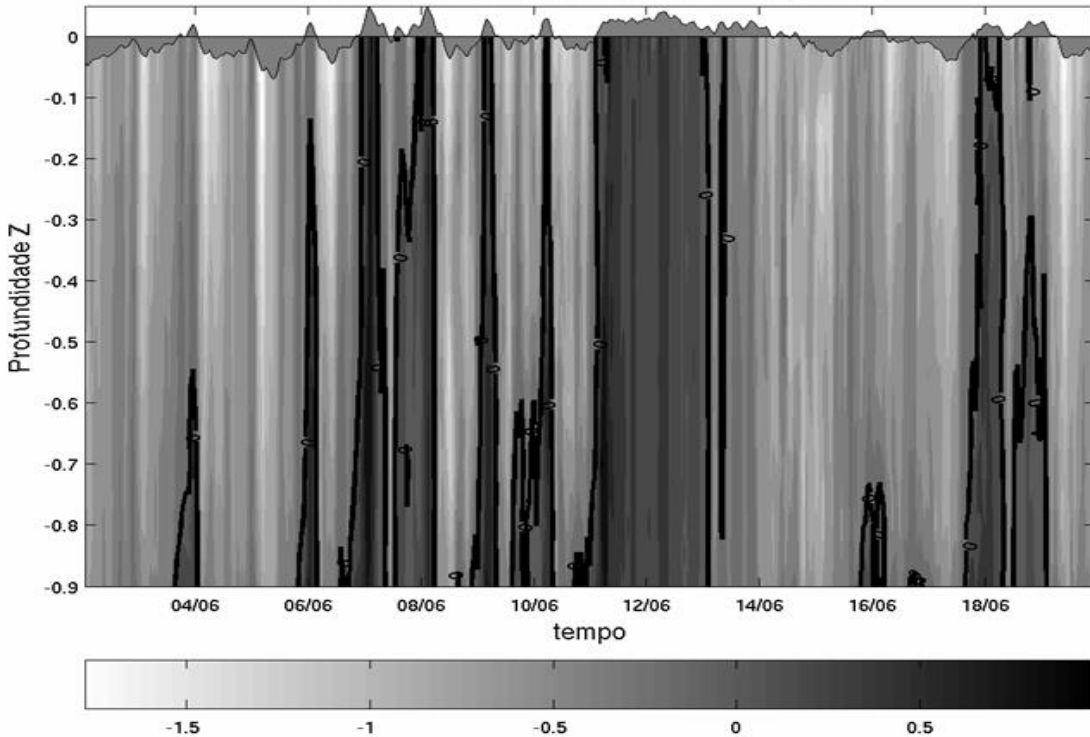


Série de vazão (maré filtrada) - Estuário da Lagoa dos Patos

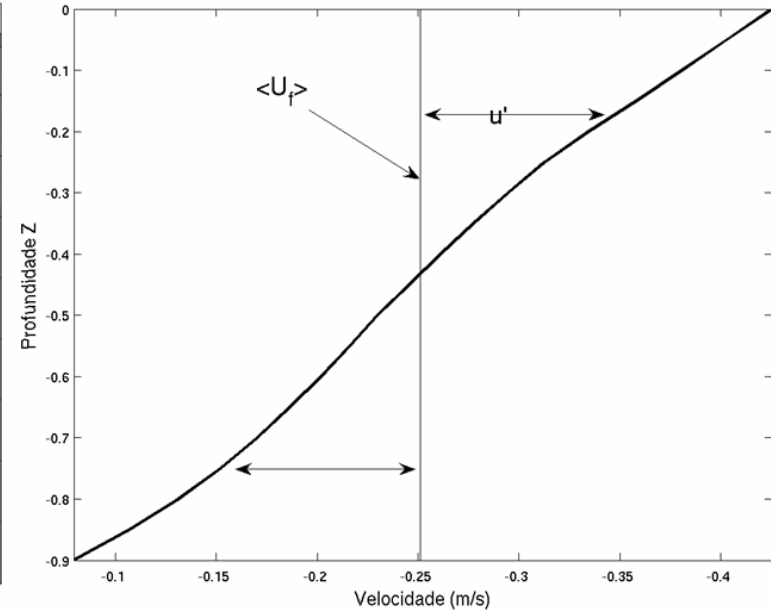


Cálculo do perfil médio

Velocidade de Corrente Componente Longitudinal



Perfil Médio



$Z = z/H$ (Miranda et al,2002)

$$\langle u \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_k u(t_k) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_i u(t_i) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{h} \int_0^h u(x, z, t) dz \right] dt$$

$$\langle \bar{s} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{h} \int_0^h s(x, z, t) dz \right] dt$$