

# Hidrodinâmica Costeira e Estuarina

**Estuários:** importância do estudo de estuários; definição, tipos (os sistemas costeiros), classificações, o diagrama de Hansen e Rattray, números adimensionais;

**Forçantes da circulação:** marés, ventos e descarga fluvial.

**Análise de dados:** distribuição de propriedades; séries temporais de nível, ventos e correntes, salinidade, descarga fluvial; visualização dos dados; análises harmônicas, espectrais e espectrais cruzadas. Filtros. Correlações. Exercícios.

**Cálculo de fluxos:** transporte advectivo de sal e de qualquer propriedade

**Modelos simplificados de mistura:** tempo de residência; teorema hidrográfico de Knudsen; modelos de prisma de maré; estimativa de concentração de poluentes

**Equação do movimento:** gradientes de pressão, efeito de Coriolis; Termos de fricção

**Equação do balanço de sal – conservação de massa e sal:** soluções para cada tipo de estuário

**Modelos estacionários analíticos;**

**Visitas, seminários, aulas práticas**

# Livros

- Miranda, L.B., B.M. Castro, B. Kjerfve 2012 (ou 2002). Princípios de Oceanografia Física de Estuários. EDUSP.
- Officer, C. 1976. Physical Oceanography of Estuaries. Wiley, 465 pp.
- Dyer, K.R. 1997. Estuaries, a Physical Introduction.
- Hardisty, J. Estuaries: monitoring and modelling the physical system. Blackwell Publ. 157 pp.
  
- MAIS AVANÇADOS
- Valle-Leviinson, A. 2010. Contemporary issues in Estuarine Physics. Cambridge, 315 pp.,
- Pradle, D. 2009. Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation and morphology. Cambridge, 236 pp.

# Estuários

- Uma das definições mais comumente adotadas é a de Cameron e Pritchard (1963): Estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado, com ligação livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mesuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.
- A definição dada por Dyer (1997), é uma adaptação da definição proposta por Cameron e Pritchard (1963):
- ***Estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado, com ligação livre com o oceano aberto, que se estende ao longo do rio até o limite de influência da maré, no interior do qual a água do mar é mesuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.***

# INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS ESTUÁRIOS



## PORQUE ESTUDAR OS ESTUÁRIOS?

- ★ Cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor da Terra estão localizadas nas proximidades dos estuários;
- ★ Os estuários são um dos sistemas biologicamente mais produtivos do mundo!
- ★ Mais de 2/3 da produção de peixes e crustáceos passa parte das suas vidas nos estuários;
- ★ Facilidades para instalações portuárias comerciais e navais;
- ★ Capacidade natural de renovar periódica e sistematicamente suas águas;
- ★ Via de acesso para o continente;
- ★ Facilidades que favorecem atividades econômicas e de lazer. Milhões de pessoas praticam atividades como pesca e navegação, e outras tantas se beneficiam dos estuários como fonte de alimentação e de renda.

A descarga de água doce na parte interna, a entrada de água do mar, e o transporte de sedimento em suspensão e nutrientes orgânicos e inorgânicos são processos de grande importância para o desenvolvimento urbano, social e econômico das regiões estuarinas.

Uma parte dessas substâncias é utilizada como alimento pelos organismos marinhos, mas os poluentes que também são transportados juntamente com substâncias naturais, podem afetar uma grande variedade da biota marinha e representar uma ameaça para a saúde das populações que utilizam esses recursos naturais como alimento. As principais fontes destas substâncias são:

- ★ Despejos municipais (fontes de organismos patogênicos, matéria orgânica, e nutrientes);
- ★ Atividades agrícolas (fontes de pesticidas e herbicidas);
- ★ Indústrias, portos, marinas e navegação (fontes de metais pesados, óleos e substâncias químicas tóxicas);
- ★ Usinas de eletricidade (fontes de calor);
- ★ Atividades de pavimentação, agricultura, e obras portuárias (fontes de sedimento).

## APLICAÇÕES DO ESTUDO DA DINÂMICA DOS ESTUÁRIOS

- ★ Avaliar os impactos de alterações na bacia hidrográfica e na geometria dos estuários;
- ★ Identificar as zonas de erosão/deposição de sedimento, que podem prejudicar a navegação;
- ★ Identificar zonas apropriadas para deposição de material dragado
- ★ Acompanhar a ocorrência da Zona de Turbidez Máxima
- ★ Calcular o tempo de permanência de substâncias no interior do estuário;
- ★ Avaliar a distribuição de propriedades físicas, químicas e biológicas para suportar projetos de aquicultura;
- ★ Prever o comportamento do sistema no caso de acidentes portuários (Navio Bahamas, por exemplo);
- ★ Estudar a dispersão de poluentes;
- ★ Estudar a dinâmica da pluma estuarina;
- ★ Estudar o aporte de sedimento do estuário para a zona costeira adjacente (formação de bancos de lama).

## FORMAÇÃO E IDADE GEOLÓGICA DOS ESTUÁRIOS

Com algumas exceções, os estuários formam-se em regiões de transição relativamente estreitas entre o mar e o continente.

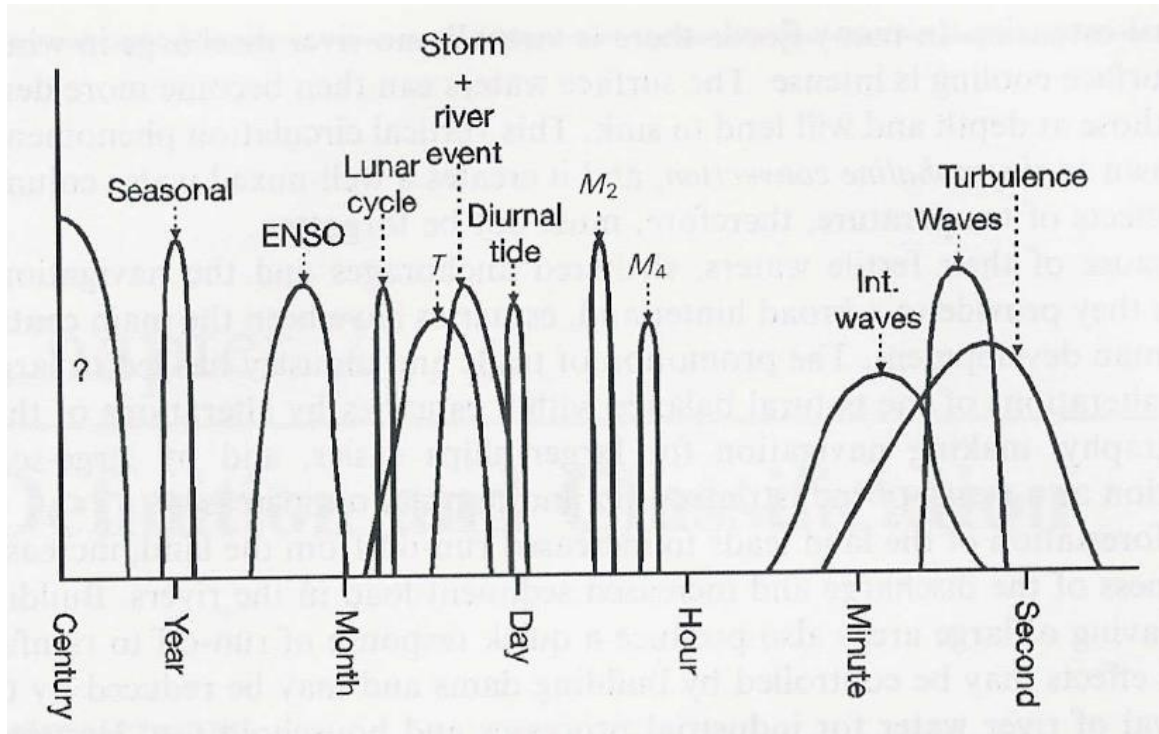
São ambientes de época geológica muito recente (< 5 mil anos), e a sua forma e extensão é constantemente alterada pela erosão e deposição de sedimento, e por alterações seculares no nível do mar. Estas alterações no nível do mar podem ser decorrentes de variações:

★ **Eustáticas:** variações de massa (por congelamento ou degelo) e de volume (por alterações da concentração de calor, aquecimento e resfriamento dos oceanos);

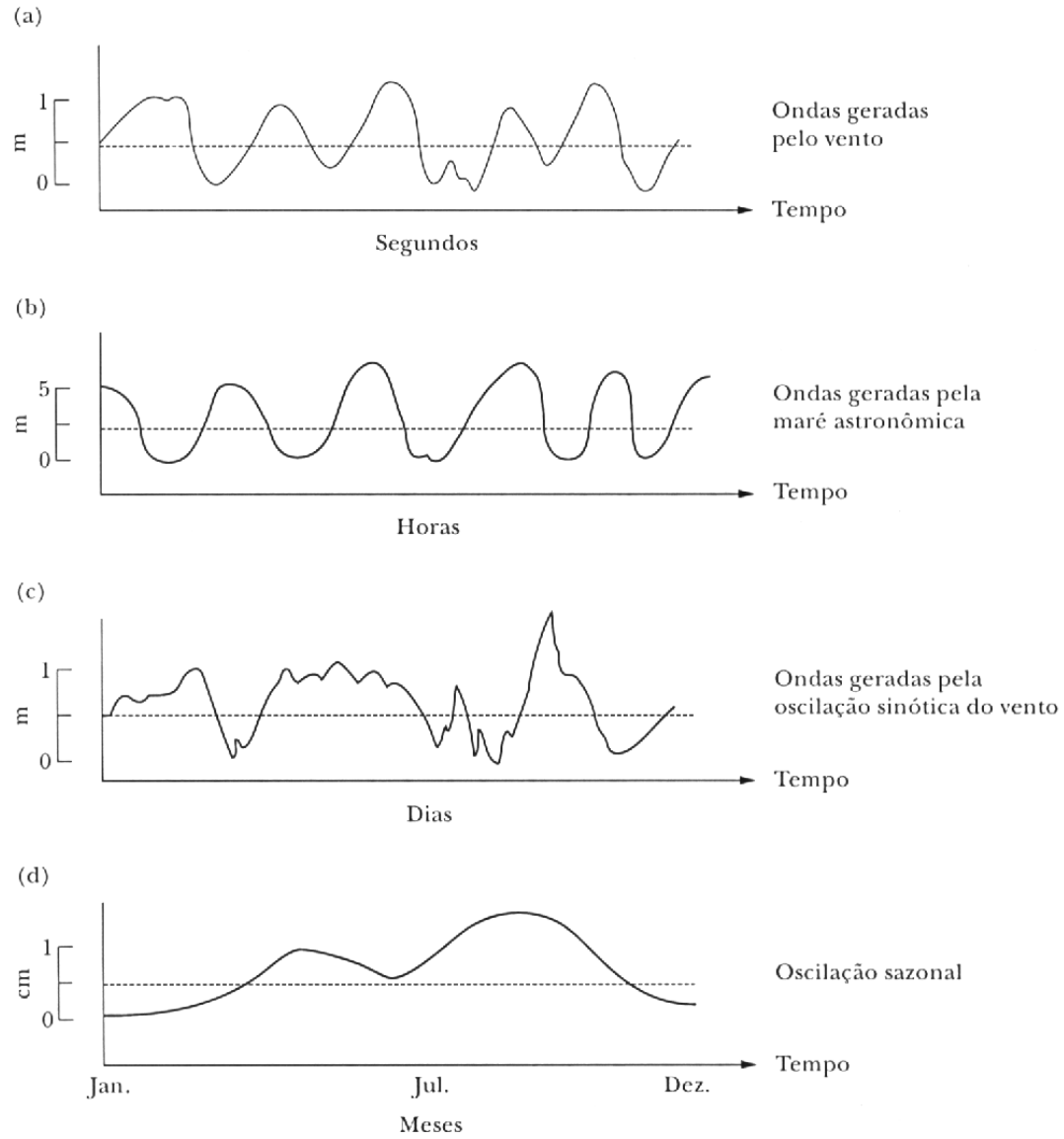
★ **Isostáticas.** movimentos da crosta terrestre, variações da geometria das bacias oceânicas, compactação e erosão de sedimentos não consolidados.

A última transgressão marinha, denominada **transgressão Flandriana**, teve início há cerca de 15 mil anos atrás e até 7 mil anos atrás houve uma rápida ascensão do nível do mar. Ao final deste processo transgressivo, o mar atingiu aproximadamente o nível atual, e as planícies costeiras e os vales dos rios foram gradativamente inundados, dando origem aos estuários, enseadas, baías e lagunas costeiras.

# Escalas Temporais







No presente estão ocorrendo variações do nível do mar no litoral de alguns países devido a oscilações naturais e antropogênicas da crosta terrestre (isostáticas), que podem ter futuras implicações na sobrevivência dos estuários. Exemplos:

- ★ A linha de costa da Escócia está se elevando a uma taxa de 3 mm/ano (abaixamento relativo do nível de  $-0.3$  m/século), em resposta ao decréscimo do peso sobre o continente ocasionado pelo derretimento de camadas de gelo decorrente do aquecimento climático.
- ★ Uma subsidência da linha de costa está acontecendo na Holanda, com uma taxa de afundamento da ordem de 2 mm/ano (elevação relativa do nível do mar de 0,2 m/século).
- ★ A região sudeste da Inglaterra também está sendo submetida a um sério processo de subsidência da linha de costa, pois a elevação natural do nível do mar está ocorrendo simultaneamente ao abaixamento do litoral, aumentando o movimento relativo.

## **PREVISÕES ANIMADORAS:**

Para os próximos anos foi estimado um aquecimento entre 1,5 e 3 °C na temperatura da superfície do mar, o que terá uma grande influência no comportamento hidrodinâmico dos estuários e outros ambientes costeiros.

- ★ Existem previsões de que o aumento do nível do mar deverá ser acelerado devido ao *global warming*, atingindo um aumento de 1 m até o ano de 2100 (Dyer, 1997).
- ★ Se toda calota polar descongelar o nível do mar se elevará cerca de 30 metros (Dyer, 1973). Nesse caso, os atuais estuários serão inundados formando-se novos ambientes estuarinos na parte superior dos rios....

**Melhor sair do Cassino....**



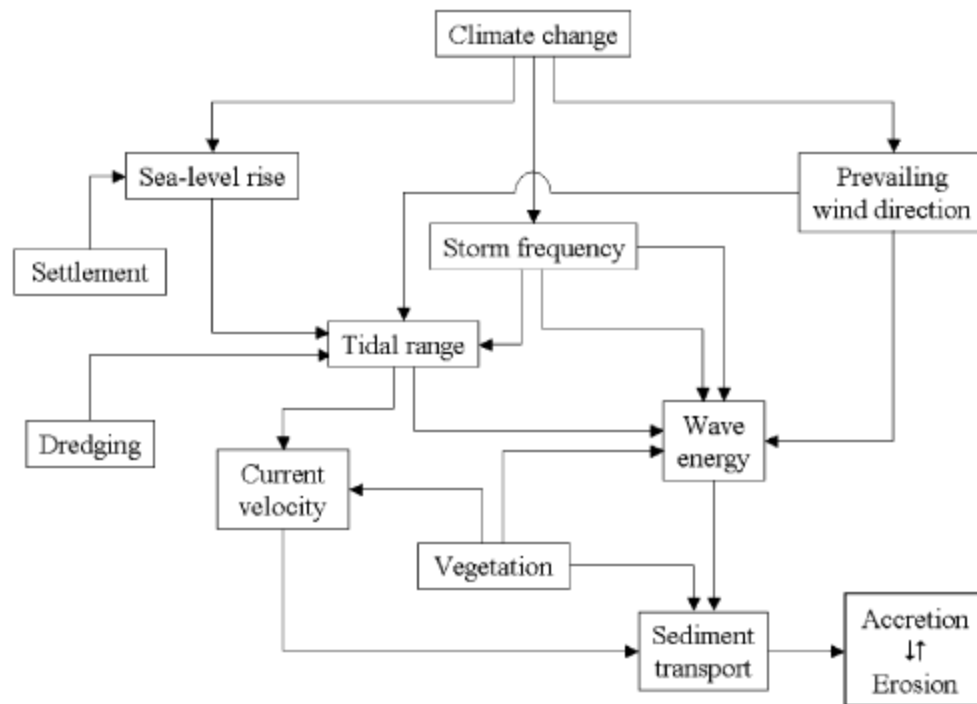
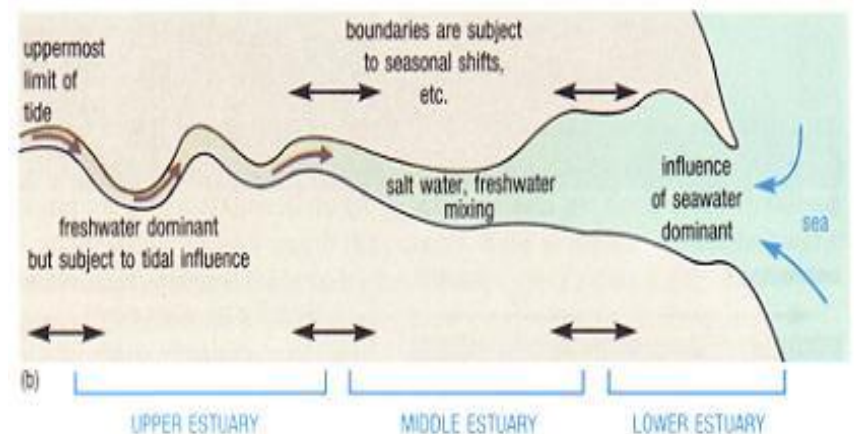
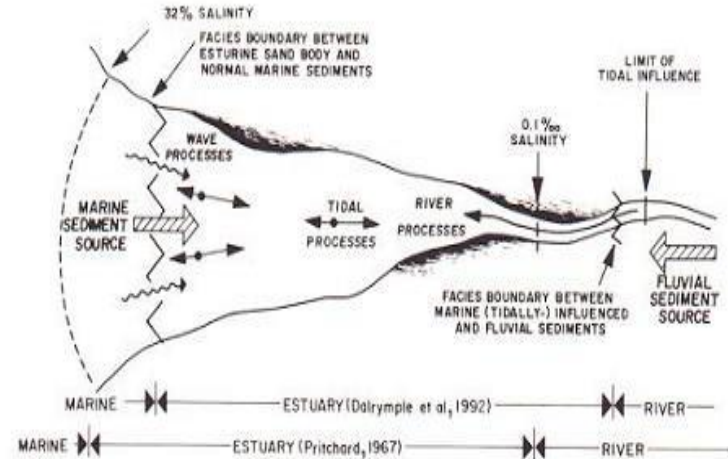


Fig. 12. Conceptual diagram which shows the factors, and their interactions, which influence accretion and erosion at the marsh edge.

# Estuários

- Kjerfve (1984) enfatizou as diversas regiões de um estuário mostrando que este pode ser dividido em três áreas distintas:
- 1) zona costeira externa, área da pluma; 2) zona de mistura; 3) área de influência da maré no rio caracterizada por águas continentais mas sujeita à influência diária da maré.



# Estuários - classificações

- Classificação por amplitude de maré
- Classificação geomorfológica
  - Planície costeira
  - Barra
  - Fjord
  - Outros
- Sistemas costeiros (Magill e Kjerfve, 1989)
- Classificação por estrutura halina
  - Altamente estratificado
  - Parcialmente estratificado
  - Bem misturado
- Diagrama de Hansen e Rattray (1966)

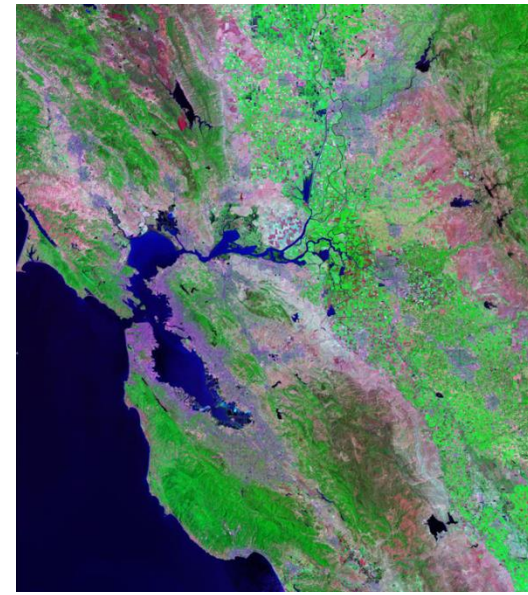
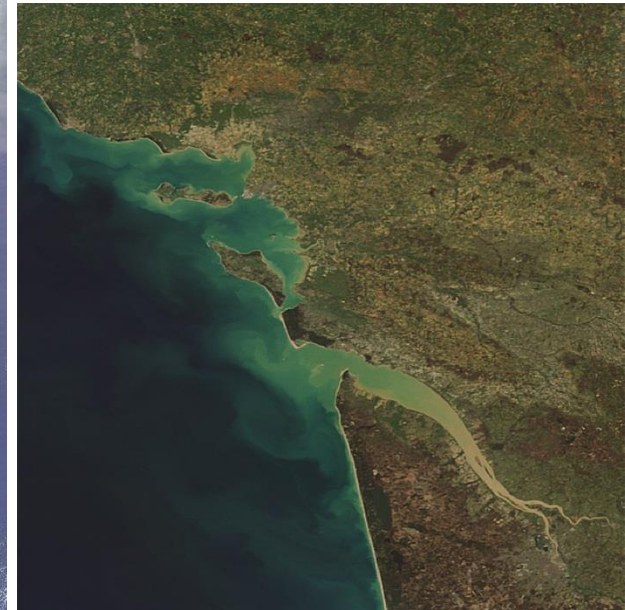
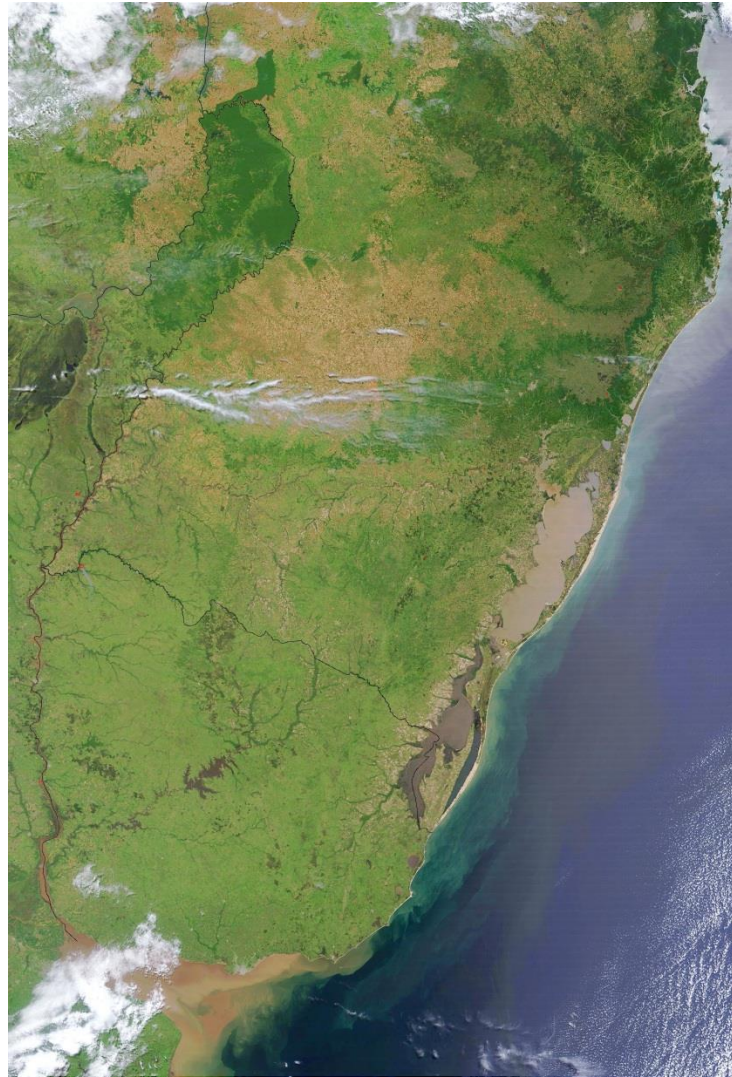


# Classificação pela maré:

- **Micromaré:** altura de maré  $< 2\text{m}$ 
  - A circulação é dominada pela ação do vento e das ondas, e o efeito da maré fica restrito as proximidades da boca do estuário.
  - **Exemplos: Baía de Chesapeake**
  - **Lagoa dos Patos**
- **Mesomaré:**  $2\text{m} < \text{altura de maré} < 4\text{m}$ 
  - São os estuários mais estudados. A circulação é controlada pelas correntes de maré.
  - **Exemplos: São dominantes nas costas E e W dos EUA**
  - **Predominam na Indonésia**
  - **Baía Blanca, Argentina**
- **Macromaré:**  $4\text{m} < \text{altura de maré} < 6\text{m}$ 
  - São os estuários menos estudados. A circulação é dominada pelo efeito da maré e o efeito das ondas é importante na boca do estuário.
  - **Exemplos: Gironde, França**
- **Hipermaré:** Bay of Fundy, Canadá
  -



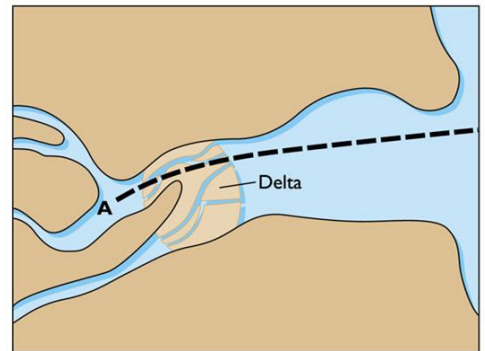
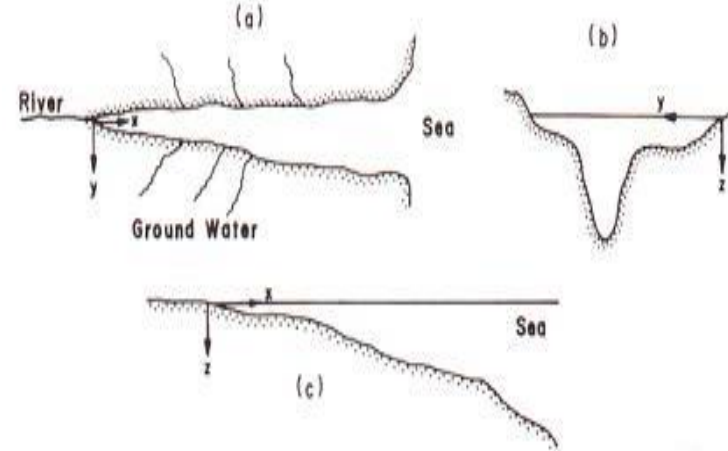
# Classificação pela geomorfologia



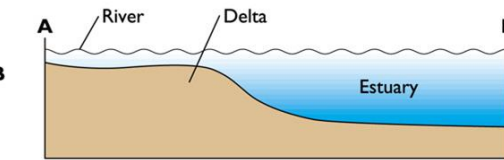
# Planície costeira

## Estuários de Planície Costeira:

- Formados durante a transgressão do mar que inundou os vales dos rios no Holoceno.
- São relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade, com as maiores profundidades localizadas próximas à boca do estuário.
- Geralmente são orientados na direção perpendicular à costa, em forma de V.
- A área da secção transversal (largura x profundidade) tem forma de V, sendo maior próximo à boca do estuário e diminuindo estuário acima.
- $S_x = S_0 e^{-kx}$
- Como a razão larg./prof. é grande, o fluxo depende da intensidade da descarga fluvial e da altura da maré.
- Exemplos: Gironde, Sena (Fr.); Severn, Mersey (UK)



(a) DROWNED RIVER VALLEY

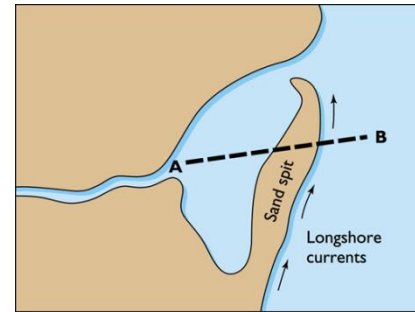


PROFILE VIEW

(Pinet, 2003)

# Estuários de barra – lagoas costeiras

- **Estuários construídos por barras:** lagoas costeiras
- - Também são estuários formados pela inundação de vales primitivos de rios durante a transgressão marinha, mas a sedimentação recente ocasionou a formação de barras na sua boca. Portanto, estes ambientes estão associados a regiões costeiras que podem sofrer processos erosivos com facilidade, produzindo grandes quantidades de sedimento que são re-trabalhados pelas ondas e transportados pelas correntes litorâneas para formar as barras.
  - O sistema de rios que alimenta estes estuários apresentam descarga fluvial variável de acordo com a estação do ano e podem transportar grande concentração de sedimento em suspensão, ocasionando alterações sazonais na geometria da boca do estuário.
  - Exemplos: lagoas da costa brasileira; lagoas do Golfo do México



(c) BAR-BUILT ESTUARY

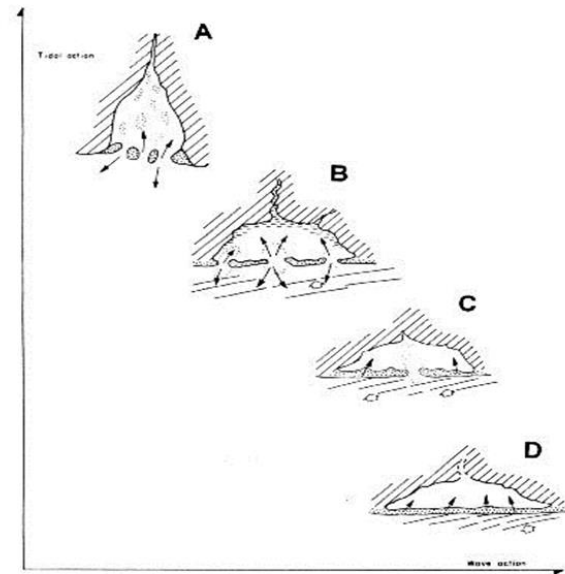
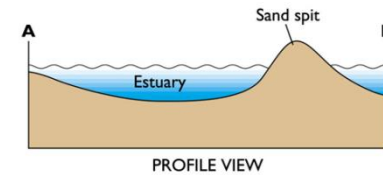
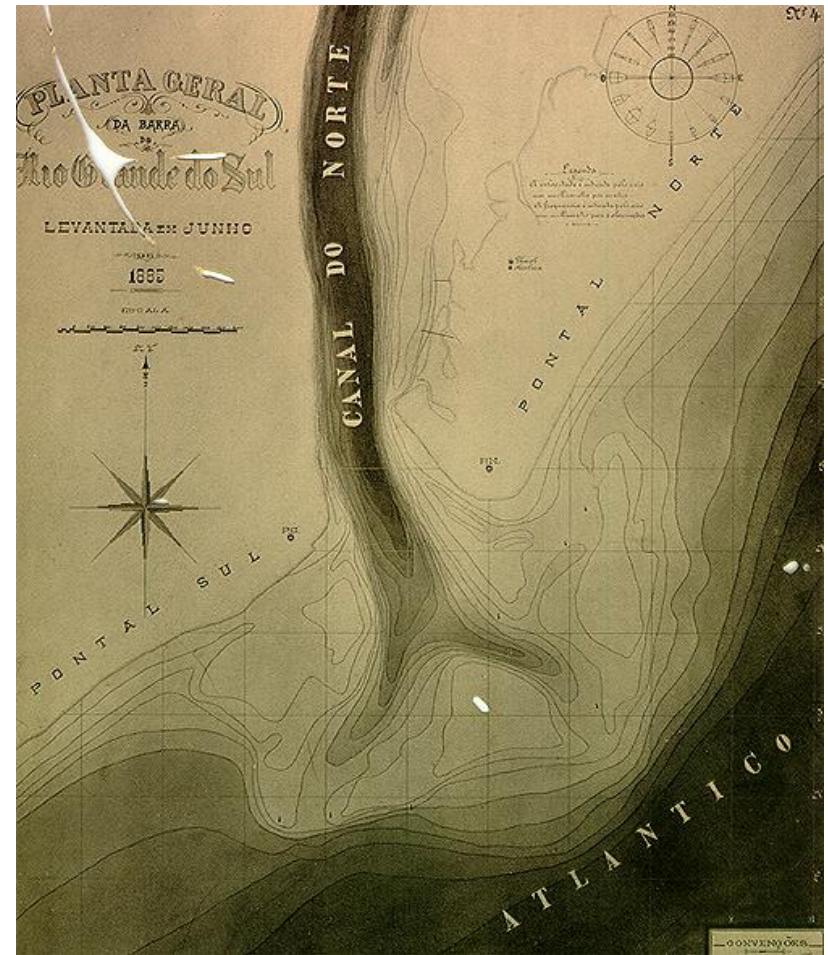


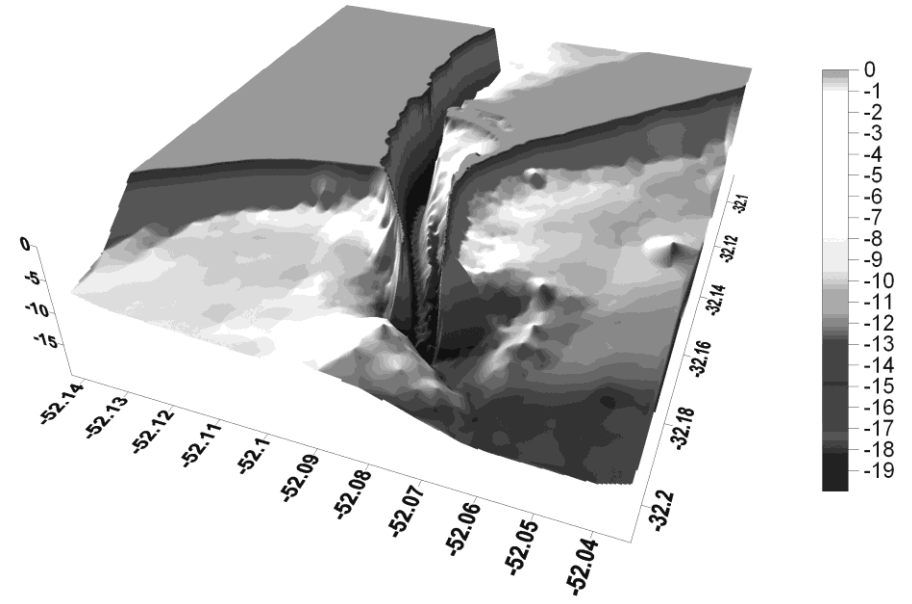
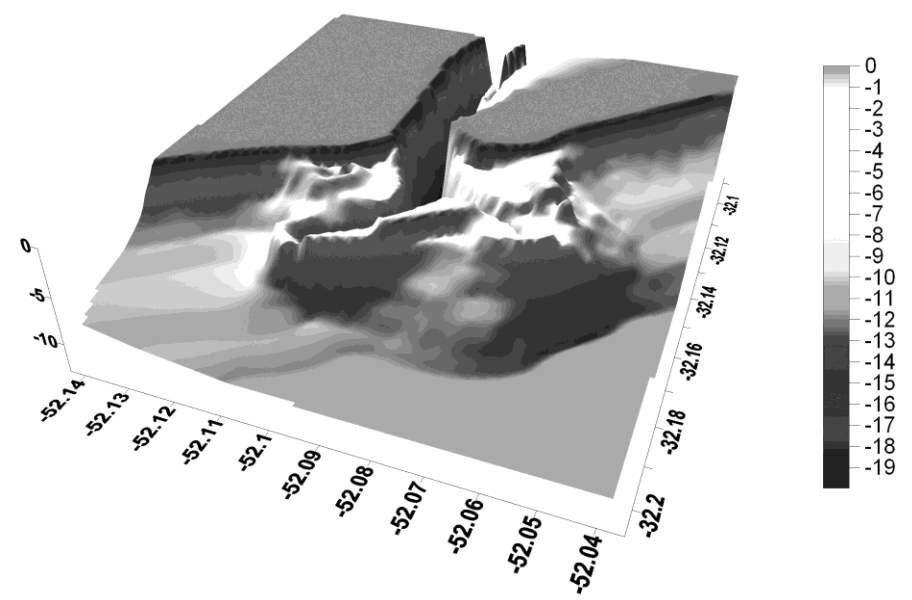
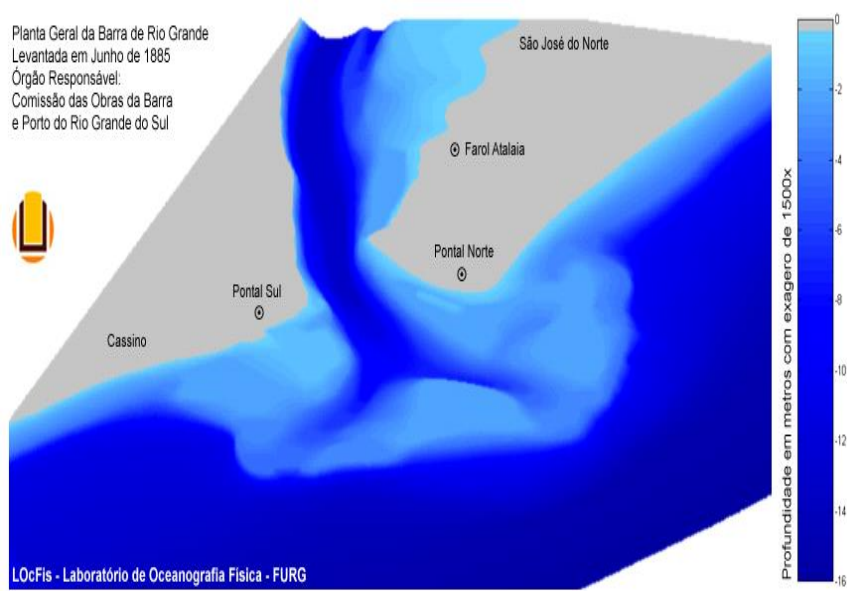
Fig. 9-19. Classification of coastal lagoons in relation to tides, waves and longshore currents (modified after Nichols and Allen, 1981).



# Classificação pela geomorfologia



Planta Geral da Barra de Rio Grande  
Levantada em Junho de 1885  
Órgão Responsável:  
Comissão das Obras da Barra  
e Porto do Rio Grande do Sul



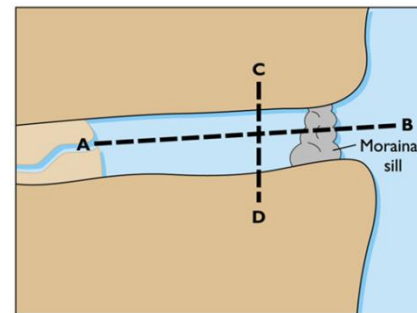
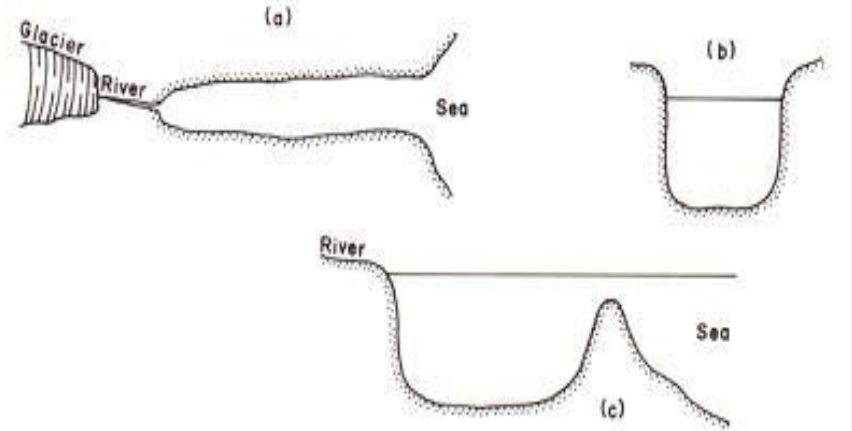
# Fiordes

- **Fiordes**

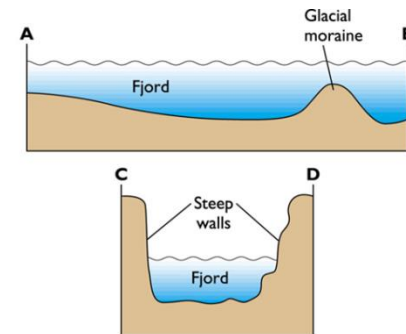
- Formaram-se em regiões que durante o Pleistoceno estavam cobertas pelas calotas de gelo. As calotas de gelo invadiram os vales dos rios primitivos e a sua pressão sobre os blocos continentais e os efeitos erosivos durante o descongelamento aprofundaram os vales dos rios primitivos e criaram um vale totalmente diferente, que foi inundado a medida que o mar avançou.
- A profundidade dos vales pode variar entre 200 e 800 m, alcançando um máximo de 1200 m.
- São sistemas profundos e a razão largura profundidade é relativamente pequena quando comparada com estuários de planície costeira. A secção transversal é aproximadamente retangular.

- **Exemplos:**

- Fiordes Osla e Hardanger, Noruega, h ~ 1200 m.
- Mercier Channel, Chile, h ~ 1200 m.
- Milford Sound, Nova Zelândia.
- Loch Etive, Escócia.



(b) FJORD



PROFILE VIEWS

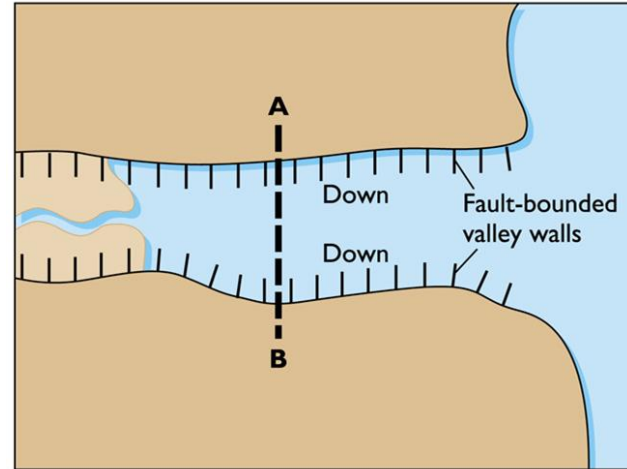


# Outros tipos

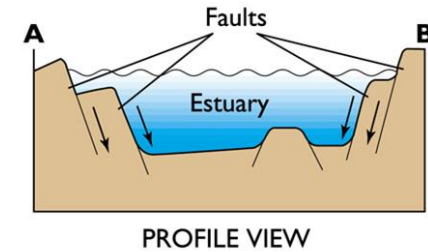
- **Outros**

- Originados por

- A) falhas tectônicas – Baía da Califórnia, Baía de São Francisco
- B) erupções vulcânicas
- C) morfologia alterada por sedimentação recente
  - Deltas
  - Rias

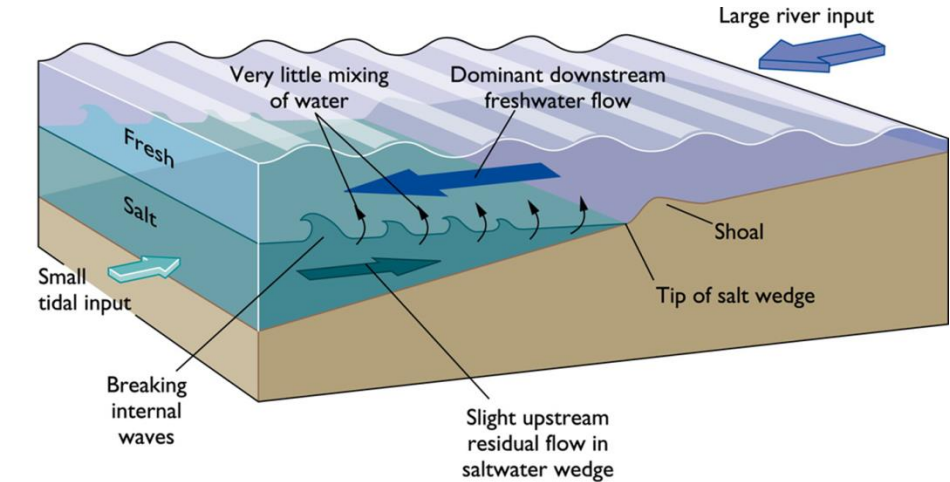


(d) TECTONIC ESTUARY



# Altamente estratificado: cunha salina

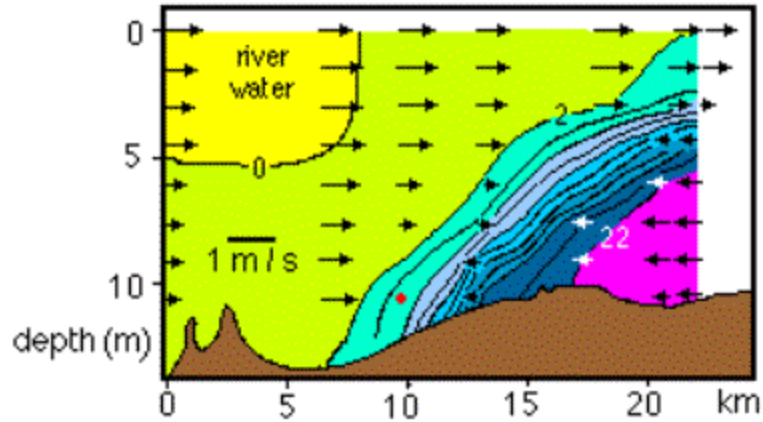
- **A. CUNHA SALINA**
- São típicos de regiões de micromaré e de lugares em que predominam condições de grande descarga fluvial.
- A camada superficial menos densa se desloca estuário abaixo sobre a camada de fundo mais densa (alta salinidade). O cisalhamento da velocidade na interface gera a tensão interfacial de atrito que, pelo processo de entranhamento.
- A interface entre a camada superficial (água doce) e de fundo (água salgada) é chamada de HALOCLINA.
- A continuidade de massa é preservada pelo movimento de pequena intensidade da cunha salina estuário acima, para substituir a parcela de água do mar que é advectada estuário abaixo na camada superficial.
- O processo de entranhamento adiciona volume à camada superficial e conseqüentemente aumenta a descarga em direção à boca do estuário.



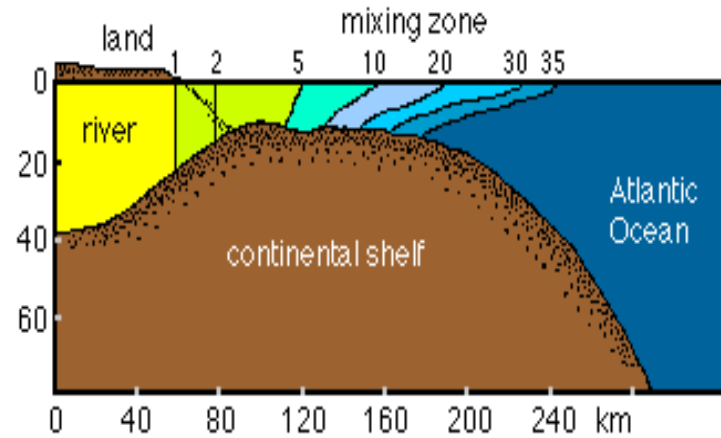
(a) SALT-WEDGE ESTUARY



# CUNHA SALINA



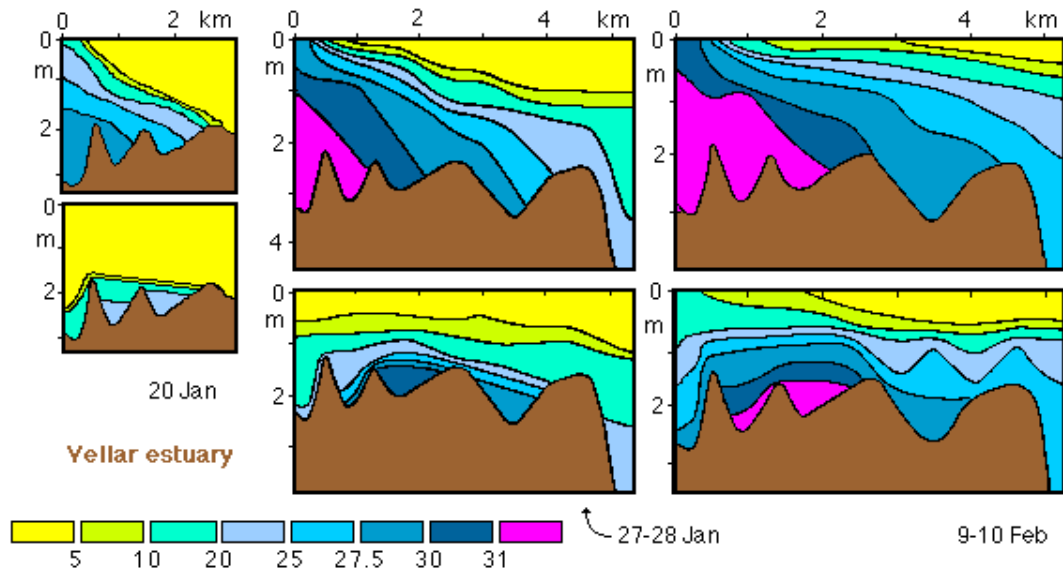
**Perfil longitudinal de salinidade e velocidade de correntes no Rio Mississippi.**



**Salinidade na região de mistura do Rio Amazonas sobre a plataforma continental**

# CUNHA SALINA

## SALT WEDGE ESTUARY



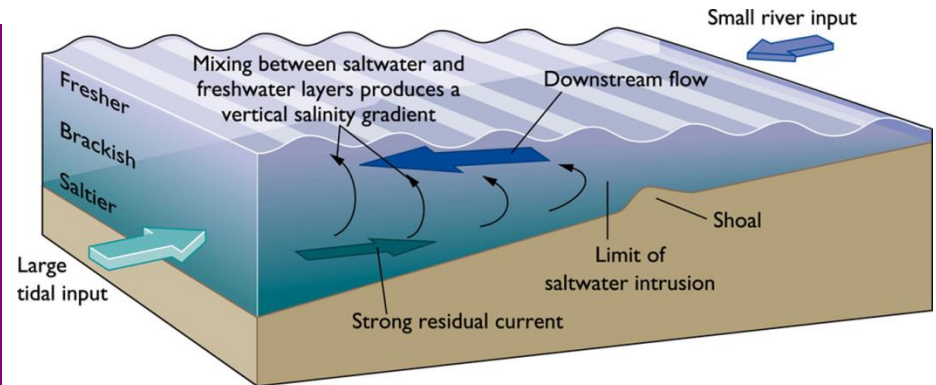
Salinity in the Vellar estuary, southern India. Top figures show the situation at high water, bottom figures at low water. Notice that isohalines are not evenly spaced.

The observation period was preceded by heavy rain. On 20 January the estuary displays the structure of a salt wedge with a mixing region of about 1 km width. During low tide the freshwater pushes the salt wedge back beyond the observation point; water with high salinity is then found only in some depressions.

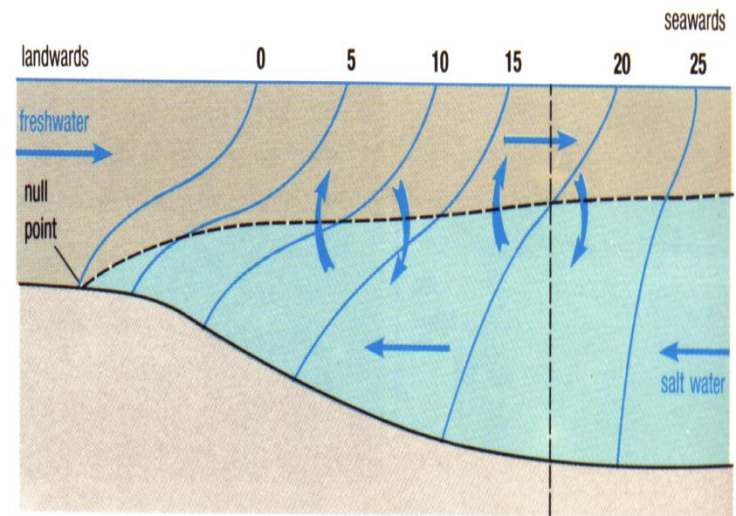
Adapted from [Dyer and Ramamoorthy](#) (1969).

# Parcialmente estratificado

- **B. PARCIALMENTE MISTURADO**
- Ocorre quando os rios deságuam em zonas costeiras moderadamente influenciadas pela maré. Nesta situação, a co-oscilação da maré agita periodicamente todo volume de água no interior do estuário, oscilando para dentro e para fora do estuário de acordo com as correntes de enchente e vazante.
- Para que a camada acima da halocline transporte um volume de água igual ao descarregado pelo rio, este volume deve aumentar consideravelmente. Simultaneamente, o transporte de água do mar estuário acima nas camadas mais profundas também aumenta, desenvolvendo-se um movimento em duas camadas e de sentidos opostos.
- A amplitude de maré pode variar significativamente entre os ciclos de maré de sizígia e quadratura. Em marés de sizígia a circulação gravitacional tende a aumentar, e aumentam também as trocas turbulentas de sal e água entre as camadas. Como consequência a estratificação diminui.

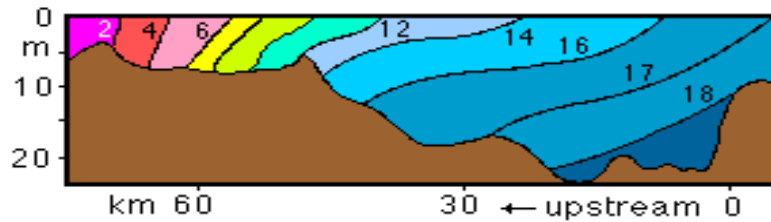


(b) PARTIALLY MIXED ESTUARY

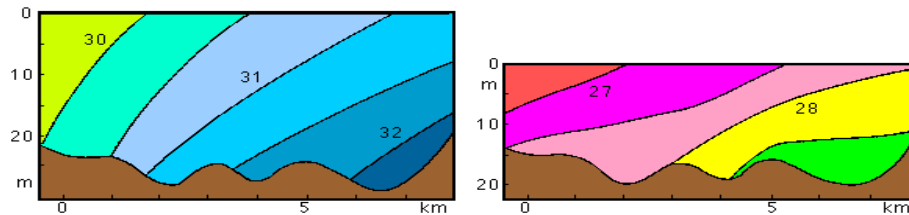


# Parcialmente estratificado

## SLIGHTLY STRATIFIED ESTUARY



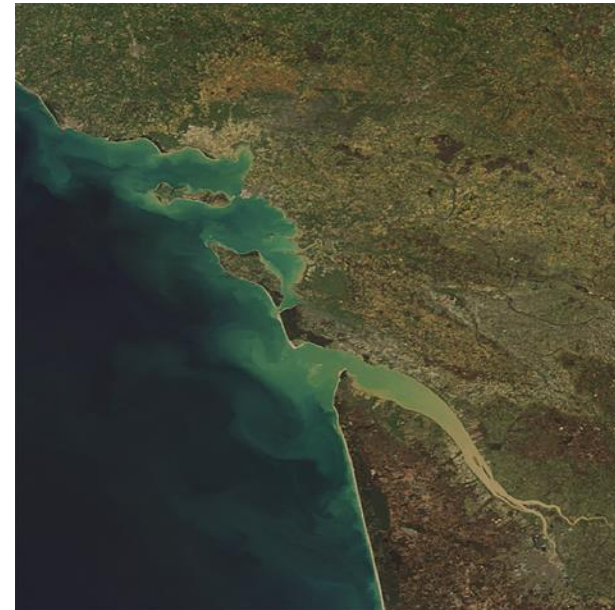
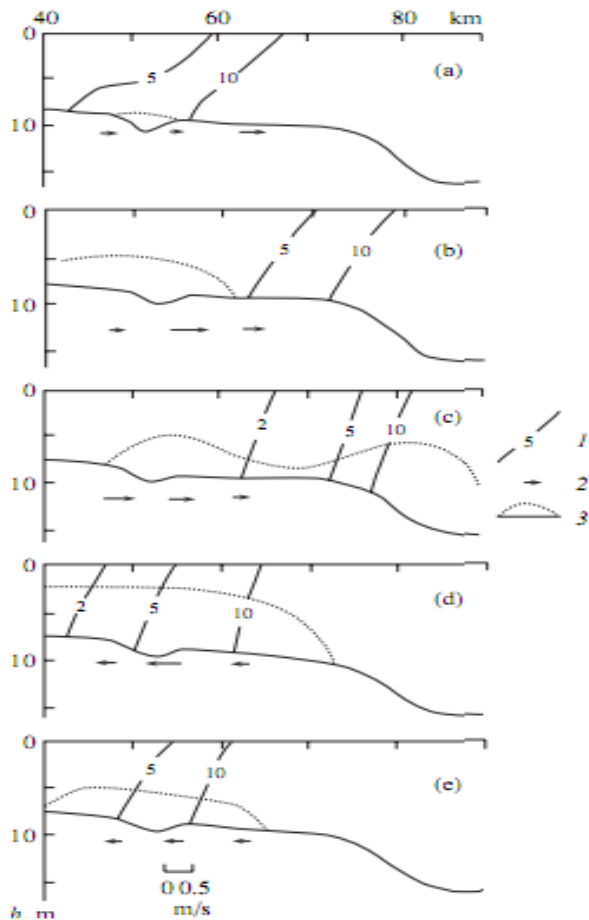
A salinity section along the axis of Chesapeake Bay, USA.



Salinity sections along the axis of the Mersey Narrows, England, at high tide (left) and at low tide (right).



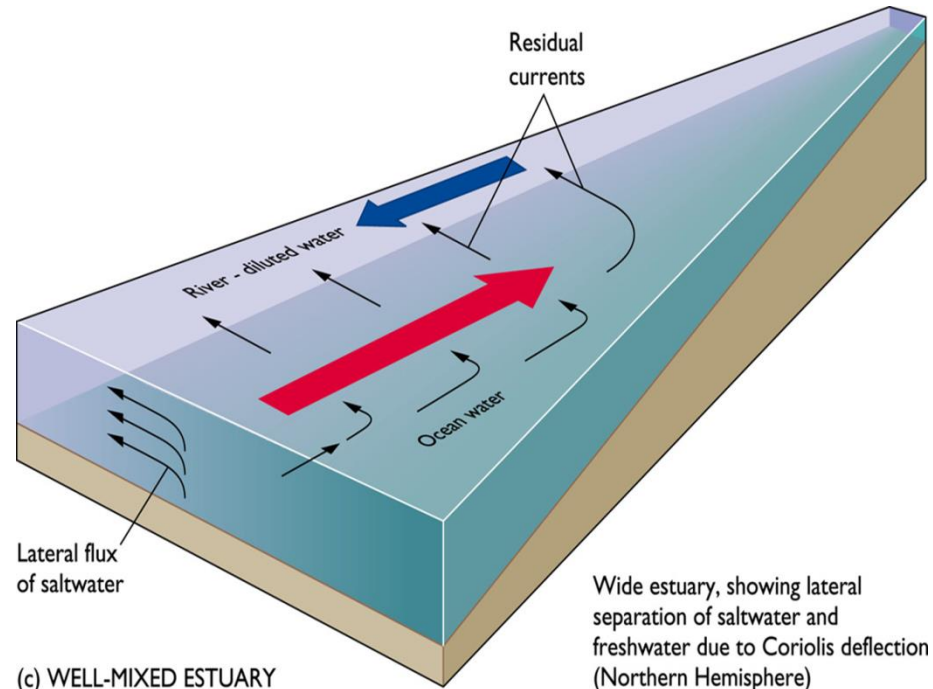
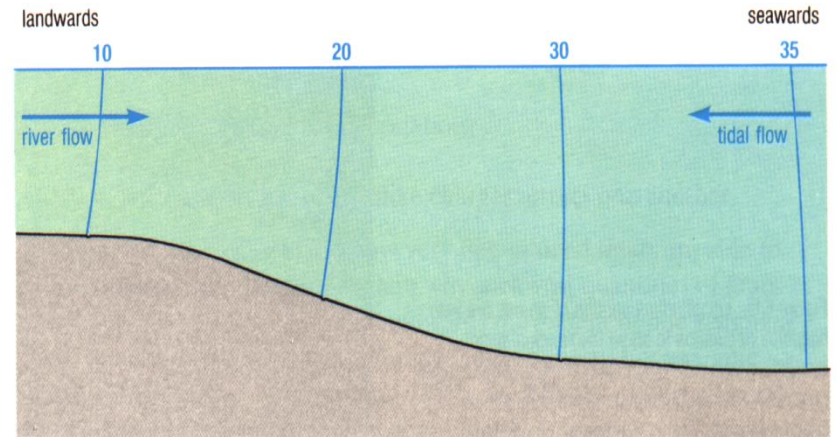
# Turbidez máxima em estuários parcialmente estratificados – Gironde –Fr.





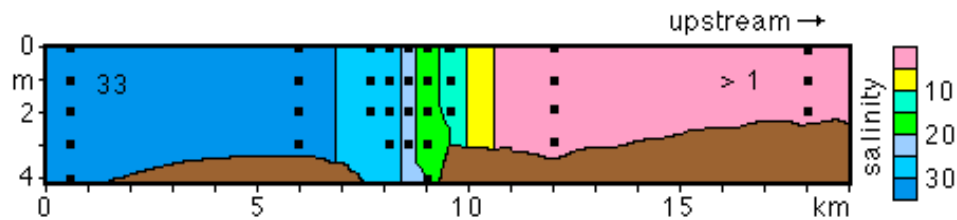
# Verticalmente homogêneo

- **C. VERTICALMENTE HOMOGÊNEO**
- Esse tipo de estuário forma-se em canais rasos e estreitos forçados por descarga fluvial pequena.
- Esse tipo de estuário ocorre quando a amplitude de maré é grande em comparação à profundidade local. Nestes estuários as correntes de maré serão muito maiores que a descarga dos rios, e isso requer condições de macromaré.
- Estes estuários apresentam pequena estratificação vertical de salinidade, tornando o fluxo vertical de sal desprezível, e o processo de mistura ocorre principalmente na direção longitudinal.
- Embora a salinidade praticamente não varie verticalmente, ela pode variar consideravelmente na secção transversal do estuário.
- A intensidade do gradiente longitudinal de salinidade é menor do que no estuário parcialmente misturado, e o componente baroclínico da força de gradiente de pressão não é capaz de gerar circulação gravitacional. Sendo assim, o movimento estacionário é predominantemente unidirecional e estuário abaixo (da terra para o mar).



# Verticalmente homogêneo

## VERTICALLY MIXED ESTUARY



A salinity section along the axis of the Myall River channel in New South Wales, Australia. Black squares indicate where salinity was measured. Isohalines are spaced 5 units apart. Note the rapid transition from salinities  $< 5$  to  $> 30$  over a distance of a few km. At some distance from the mixing region salinities are uniform and close to 1 and 33 as indicated.

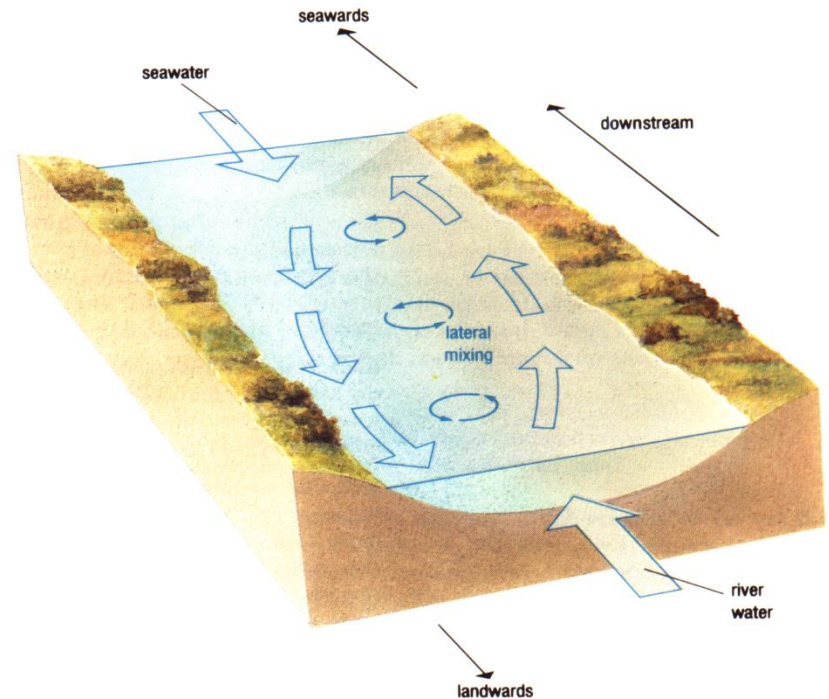
# Estratificação lateral

## Lateralmente Estratificado (tipo C)

- - ocorrência depende das dimensões do estuário –
- - se  $W \gg c/f$

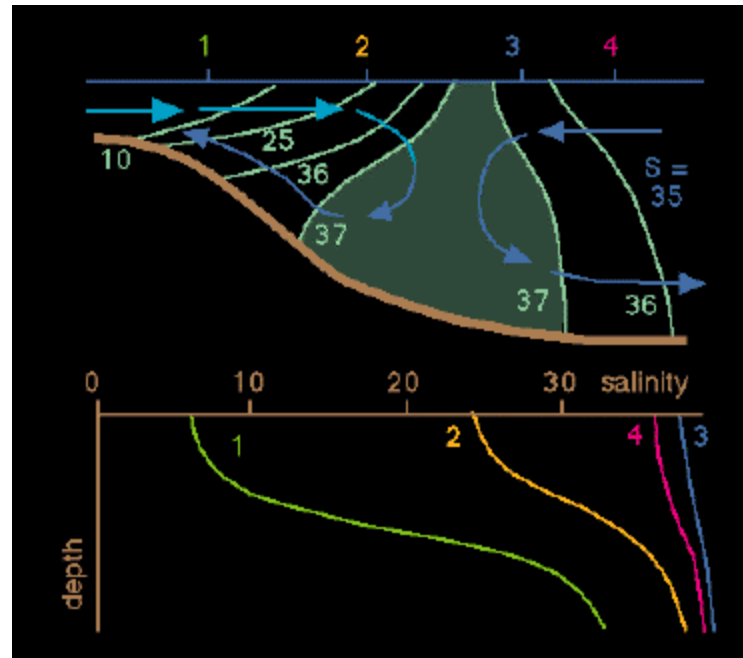
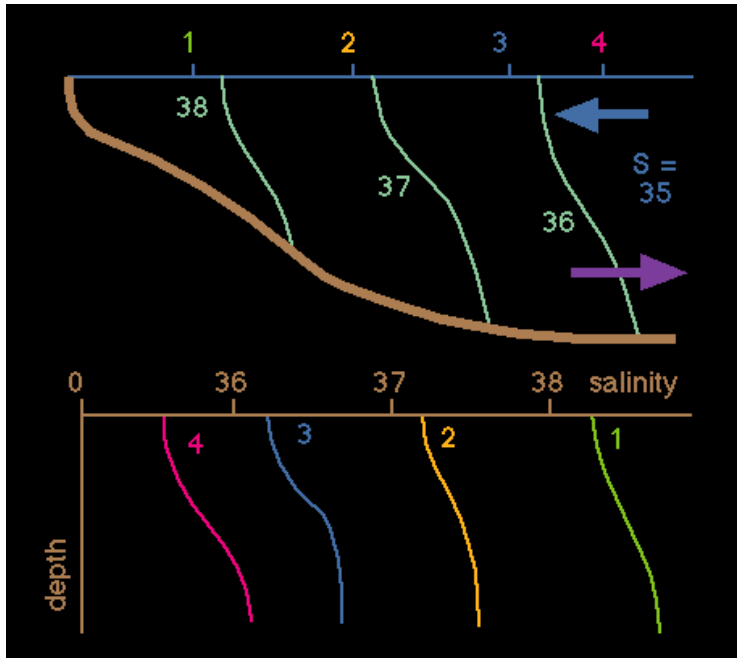
## Lateralmente Bem Misturado (tipo D)

- Em canais estuarinos estreitos, o cisalhamento lateral poderá ser suficientemente intenso para gerar condições de homogeneidade lateral. Nestas condições, a salinidade aumenta gradativamente estuário abaixo e o movimento médio está orientado nesta direção em todas as profundidades.
- Embora este movimento tenha a tendência de transportar sal para fora do estuário, o balanço é atingido pelo transporte de sal estuário acima por difusão turbulenta, que esta associado ao efeito à irregularidades topográficas e ao atrito com o fundo na corrente de maré (dispersão da maré).





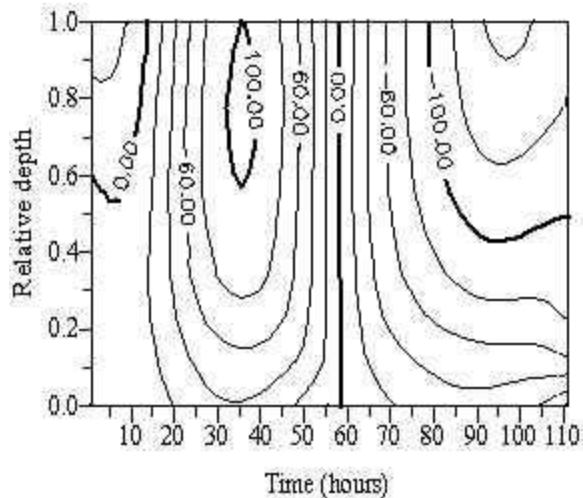
# Estuários invertidos



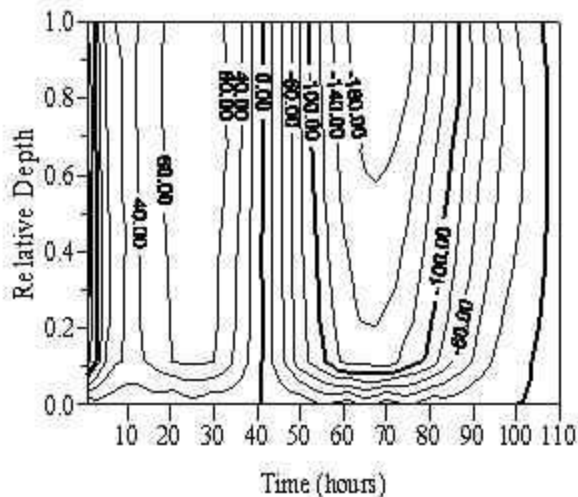
Alligator river, Austrália

# Variação temporal da salinidade na Lagoa dos Patos

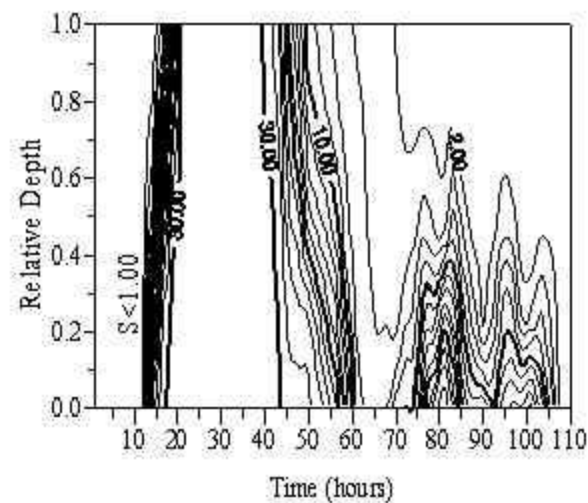
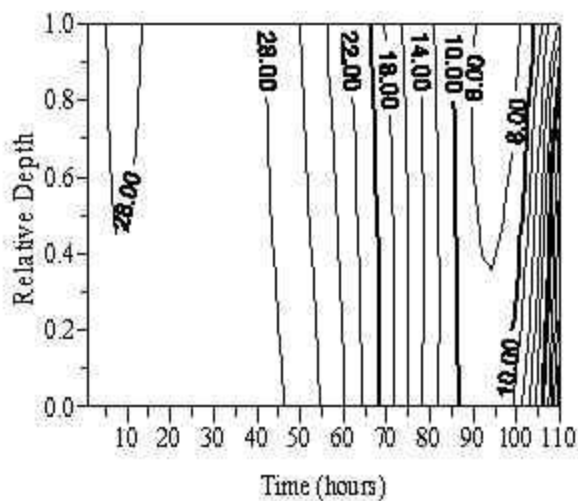
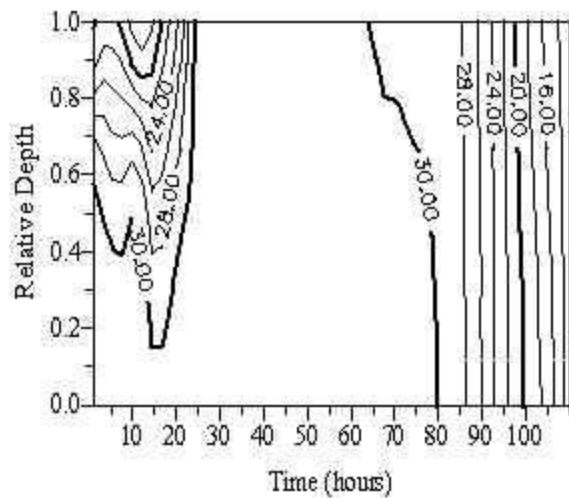
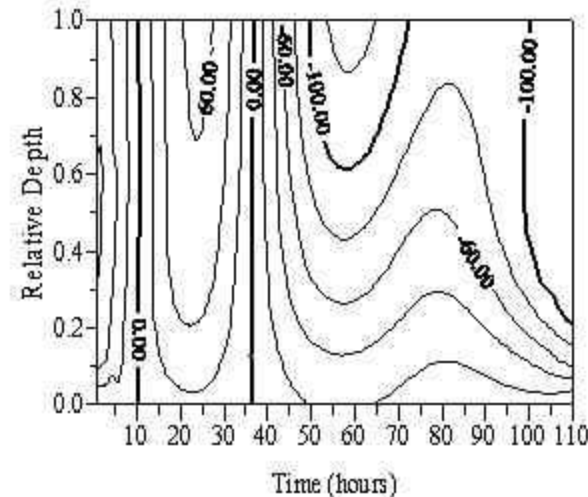
06 - 11/04/92



18 - 23/05/92



05 - 10/10/92



# Lagoas Costeiras



# Lagoas Costeiras

- Estuários de barra na classificação de Cameron e Pritchard (1963)
- Áreas continentais continuamente inundadas por águas marinhas ou doces, aproximadamente orientadas paralelamente à linha de costa, separadas do oceano por uma barreira arenosa e conectadas a ele por um ou mais canais (Phleger, 1981; Nichols e Allen, 1981).
- Formadas em regiões de fraca influência da maré
- Ambientes comuns em regiões que apresentam plataforma continental ampla em conjunto com planície costeira extensa, com baixa amplitude de maré, regime de ondas de grande energia e grande suprimento de material arenoso (Pheger, 1967; Kjerfve, 1986).
- Ocupam 13% das áreas litorâneas do mundo (Barnes, 1980)
- Ambientes recentes, uma exceção é a Lagoa dos Patos que começou a ser formada a 230.000 anos AP.
- Apresentam formas irregulares, mas alguns padrões são observados e o mais notável é a formação de flechas que podem levar à segmentação da laguna.
- Normalmente rasas e com pouca utilização

# Lagoas Costeiras

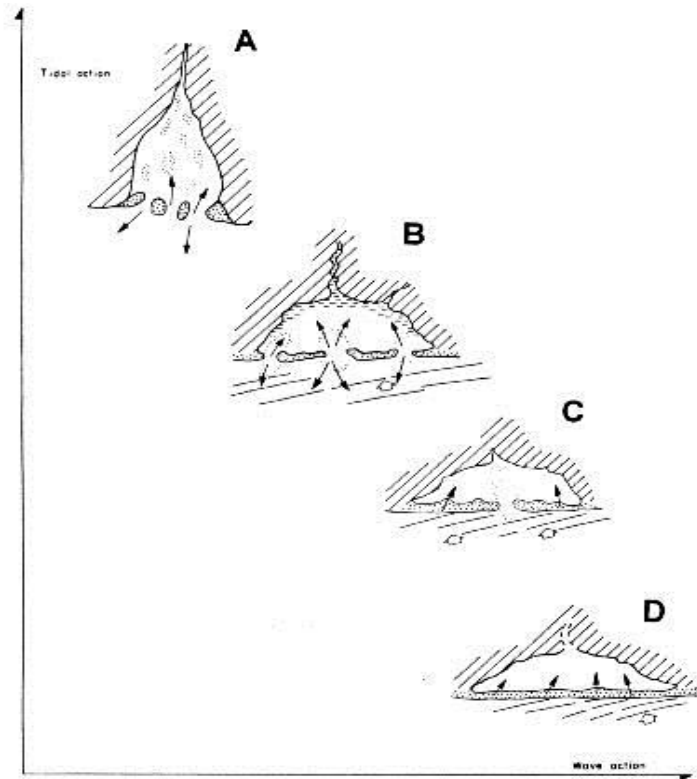


Fig. 9-19. Classification of coastal lagoons in relation to tides, waves and longshore currents (modified after Nichols and Allen, 1981).

# Lagoas Costeiras

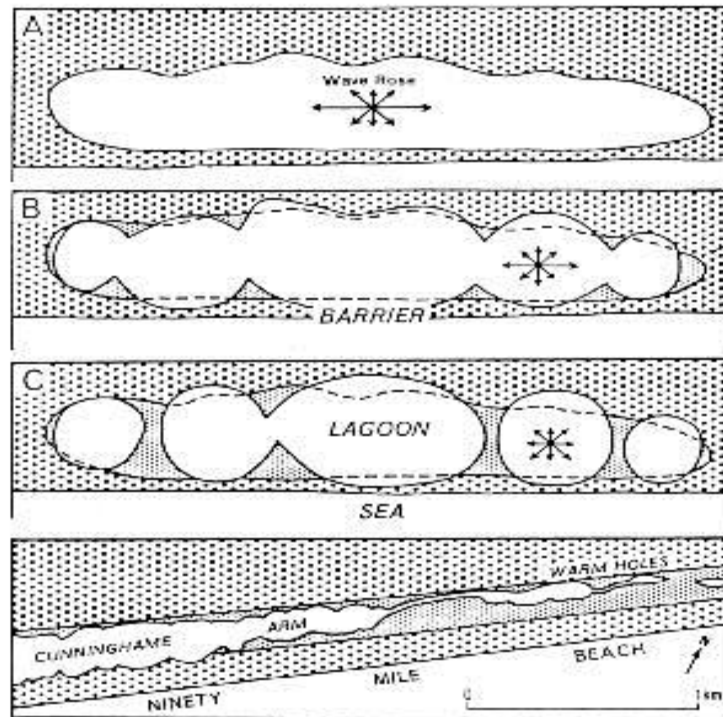
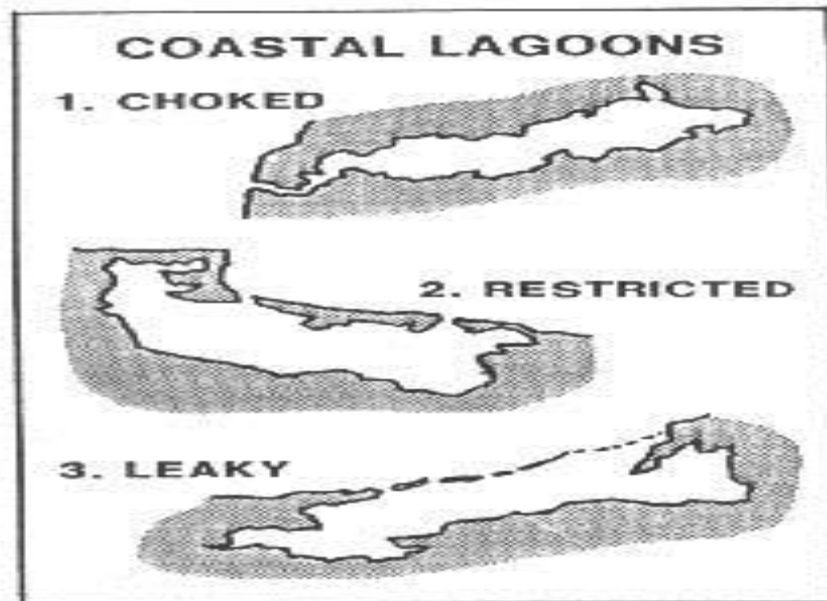


Fig. 2.10. Segmentation of a coastal lagoon by the erosion of embayments and growth of spits and cusped forelands in response to waves generated by local winds.

Zenkovitch, 1956

# Lagoas Costeiras

- Classificação de Kjerfve (1986) para lagoas costeiras
  - Estranguladas ou sufocadas (choked) circulação dominada por processos difusivos
    - Trocas são restritas, longos tempos de residência
  - Vazadas ou abertas (leaky) circulação dominada por processos advectivos



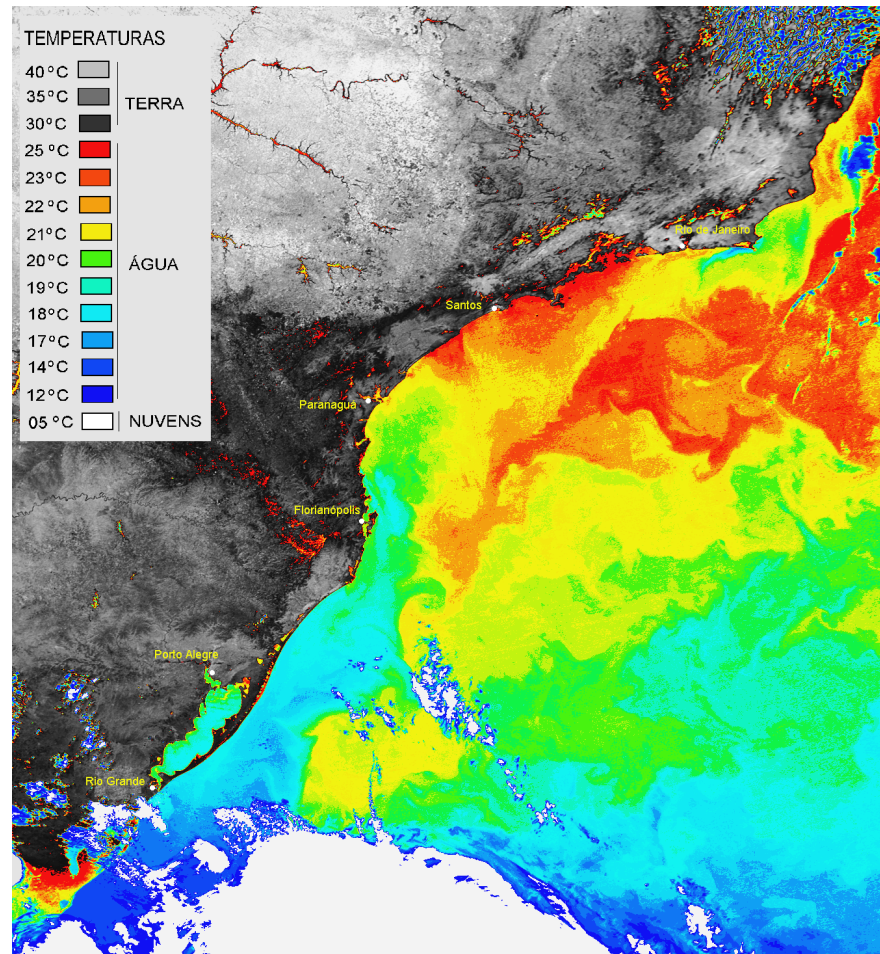


# Lagoa Salgada no centro da Argentina





# Lagoas Costeiras Brasileiras





# Lagoas costeiras brasileiras

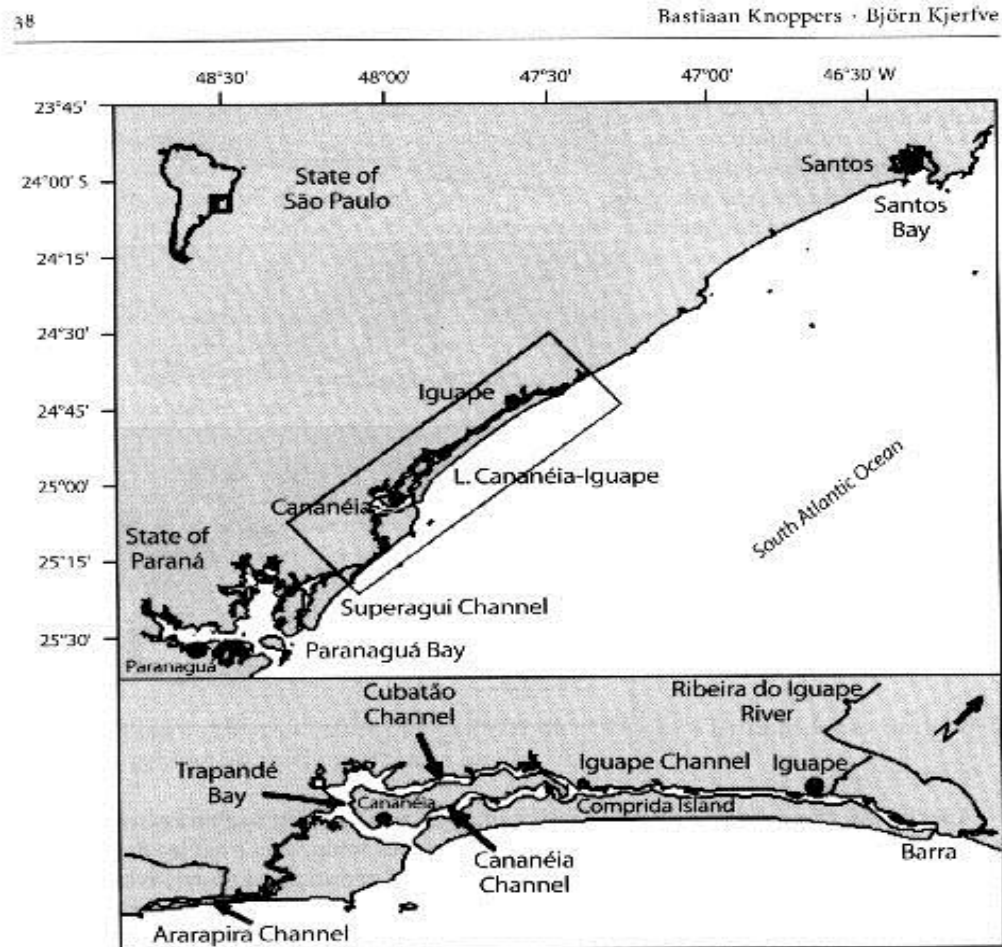


Fig. 3.4. The coastline of the state of São Paulo and its coastal lagoons

# Lagoas costeiras brasileiras

- Localizadas na costa SE/S do Brasil.
- A maior parte do tipo “estrangulada”. A exceção é o sistema Cananéia que é restrito.
- Araruama é a única lagoa costeira brasileira hiperhalina, raras no mundo.
- Lagoa dos Patos é a maior lagoa costeira brasileira e a maior laguna estrangulada do mundo. É, talvez a mais estudada pois os primeiros estudos sobre este sistema tiveram início em 1883 visando a construção dos molhes da barra.
- Um grande número de lagoas costeiras foram segmentadas e separadas do mar – lagoas cordiformes do RS.
- Algumas lagoas costeiras tiveram suas formas alteradas com a construção de molhes para fixação da desembocadura: L. Patos, L. Tramandaí. Quais as conseqüências para a circulação???
  
- Mostrar transparência com quadro comparativo das lagoas brasileiras





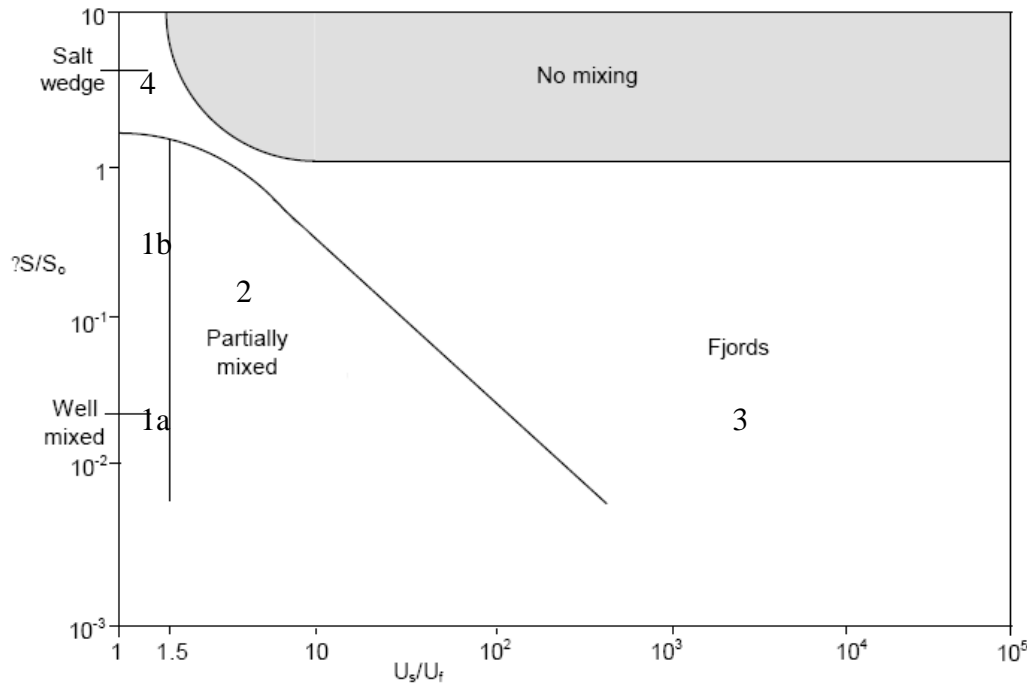
# Diagramas de Classificação

- Simmons (1955)
- Ippen e Harleman (1961)
- Hansen e Rattray (1966)
- Prandle (1985)
- Jay e Smith (1988)
  - Todos assumem condições estacionárias e estuários estreitos. Levam em conta:
    - Dissipação de energia
    - Ganho de energia potencial
    - Características estacionárias da velocidade

## Classificação de Simmons (1955)

- Estuary classification as a ratio of river inflow and tidal flow ( $R$ ) over a tidal cycle,
- **$R$**                       **Classification**
- $1 \leq R$                       highly stratified or salt wedge
- $R \approx 0.25$                       partially mixed
- $R \leq 0.1$                       well mixed

# Diagrama de Hansen e Rattray 1966. Limnol. & Oceanogr. 11, 319-326



$\delta S/S_o$  – parâmetro de estratificação onde:

$\delta S = S_f - S_s$  (médias em ciclos de maré)

$S_o$  – salinidade média da coluna de água (média em ciclos de maré)

$U_s/U_f$  – razão entre a velocidade de superfície ( $U_s$ ) e a média da coluna ( $U_f$ ) – médias em ciclos de maré -

$$\left(\frac{\Delta S}{S_o}\right)^{-1} \left[ 210 + 252 \left( \frac{U_s}{U_f} - \frac{3}{2} \right) \right] v^2 + \left[ 32 - \left(\frac{\Delta S}{S_o}\right)^{-1} \left( 210 + 252 \left( \frac{U_s}{U_f} - \frac{3}{2} \right) \right) + 76 \left( \frac{U_s}{U_f} - \frac{3}{2} \right) + \frac{152}{3} \left( \frac{U_s}{U_f} - \frac{3}{2} \right)^2 \right] v = 0$$

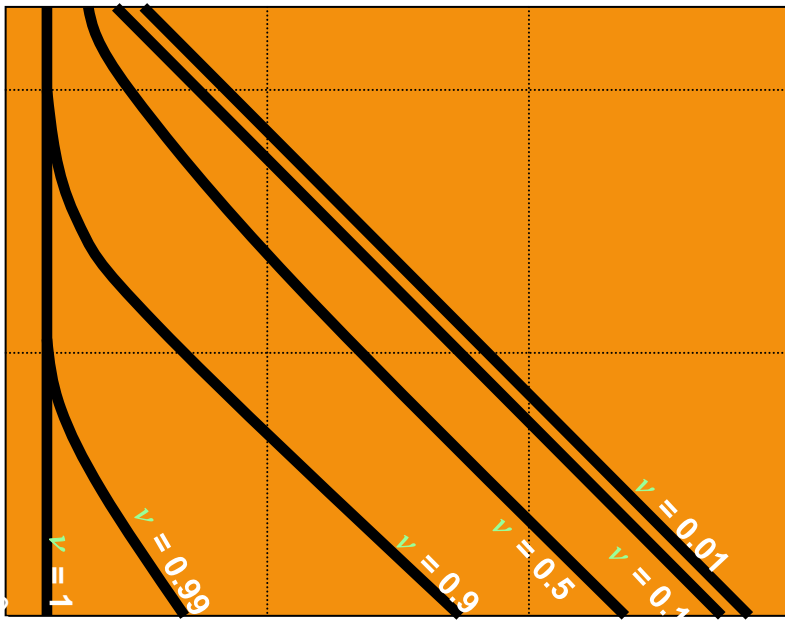
$v$  fração do transporte de sal causada por difusão. Varia de  $0 < v \leq 1$ .

Se  $v = 1$  transporte de sal é por difusão turbulenta (dispersão, não existe circulação gravitacional)



# Parâmetro $v$

$\delta S / S_0$



$u_s / U_f$

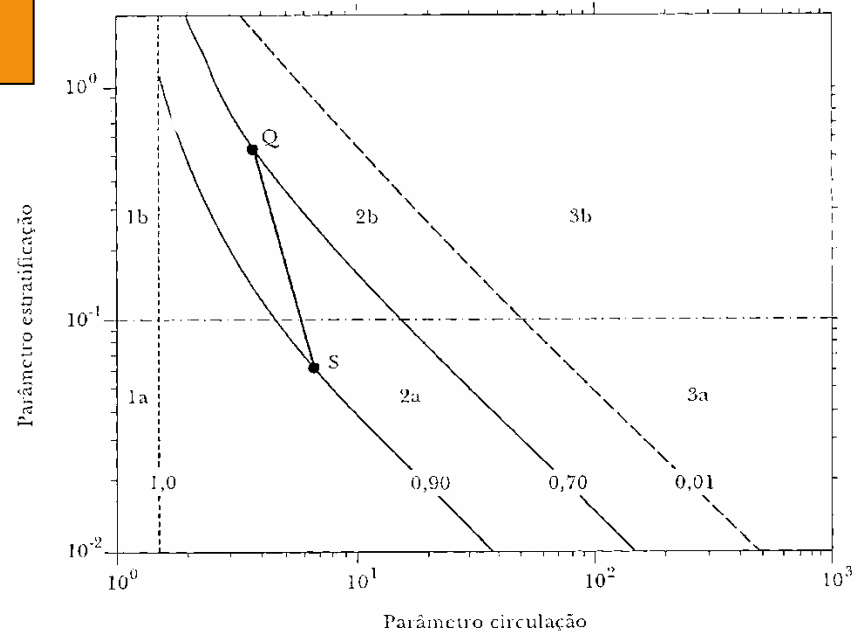


Figura 3.11 Curvas paramétricas da proporção relativa ( $0 < v \leq 1$ ) dos processos dispersivo e advectivo, obtidas com base na equação (3.6) que estabelece teoricamente a correlação dos parâmetros estratificação ( $\delta S / S_0$ ) e circulação ( $u_s / U_f$ ). Q e S são as imagens desses parâmetros nas condições quadratura e sizígia, respectivamente, no canal estuarino de Bertioga (SP).

**FACTORS AFFECTING ESTUARIES**

**TYPE**

**SALINITY PROFILES**

**NET CIRCULATION**

High  
Minimum  
Weak  
Strong

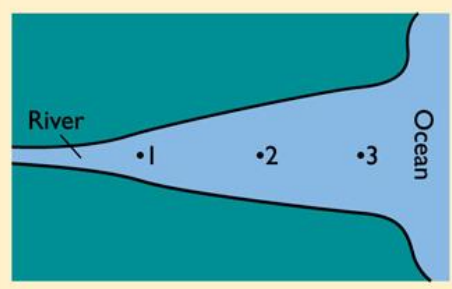
River discharge  
Tidal mixing  
Tidal currents  
Water stratification

Low  
Maximum  
Strong  
Weak

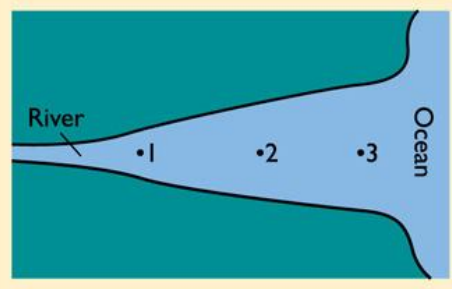
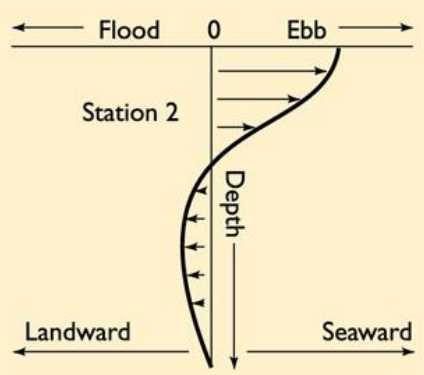
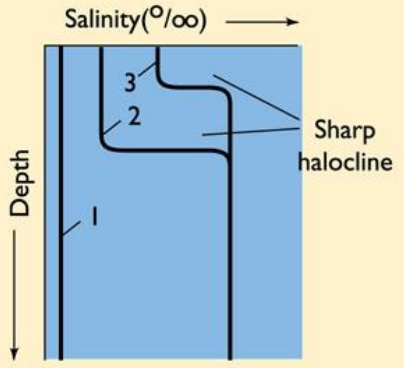
**Types of Estuaries According to Their Stratification (Pinet, 2003)**

Competition between tidal forcing and buoyancy forcing

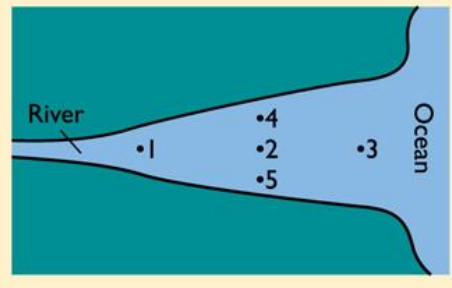
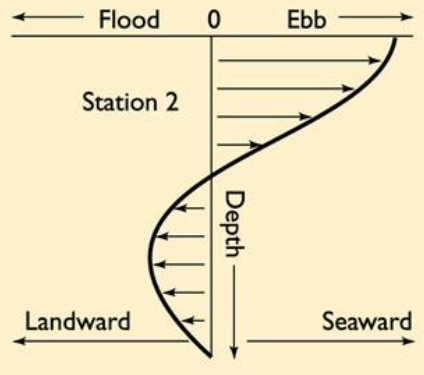
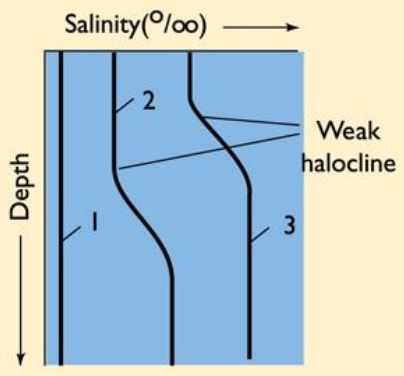
•Hydr ographic stations



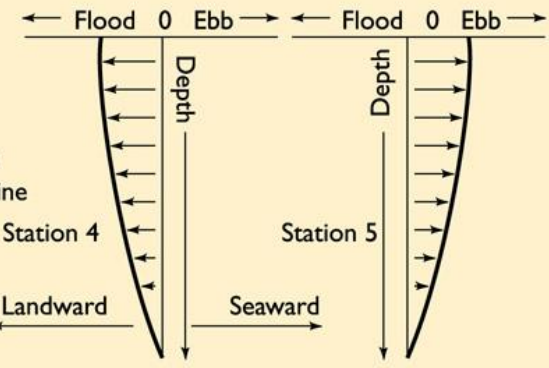
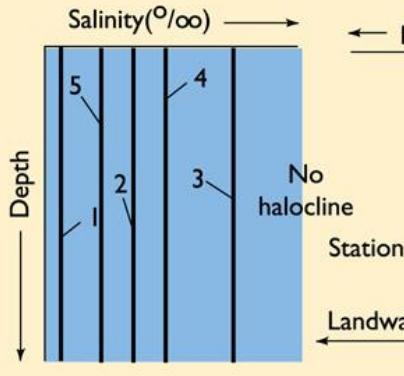
(a) SALT-WEDGE ESTUARY



(b) PARTIALLY MIXED ESTUARY

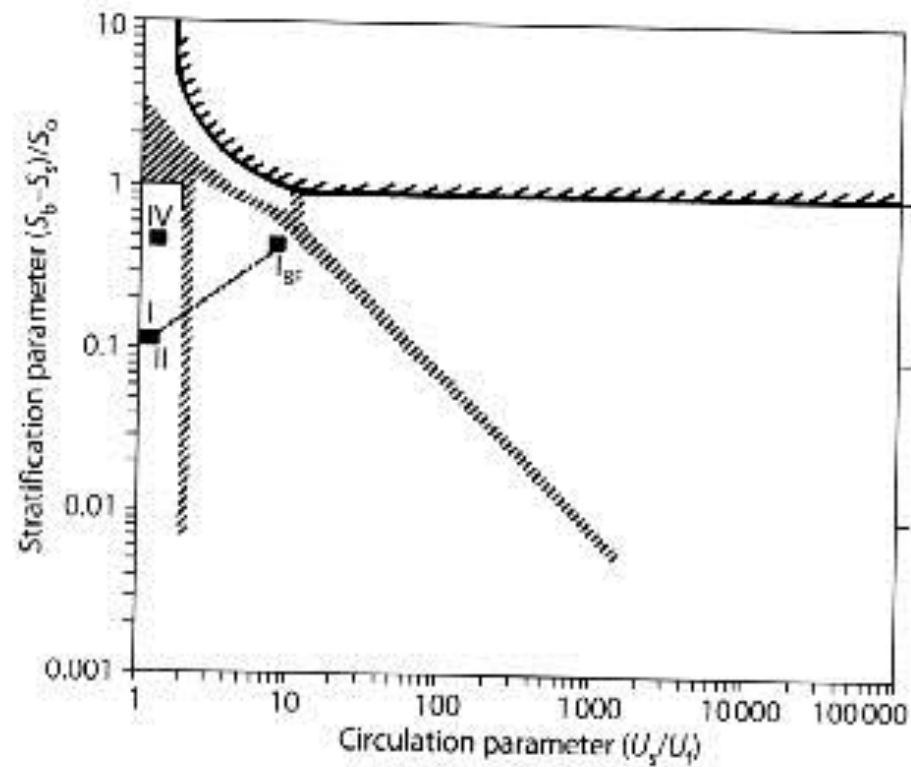


(c) WELL-MIXED ESTUARY



# O diagrama de Hansen e Rattray

**Fig. 5.10.** The stratification/circulation diagram for the situations of PLATES I, II and IV. The index "BF" refers to PLATES I data obtained before the meteorological front passage



# Classificação de Jay e Smith 1988

$$Fb = \frac{de}{De} \left( \frac{\Delta\rho h}{\Delta\rho v} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Ft = \frac{\eta}{Ho}$$

Fb – número de Froude interno

Ft – número de Froude barotrópico

$de/De$  – razão da incursão da interface da cunha salina pela profundidade média

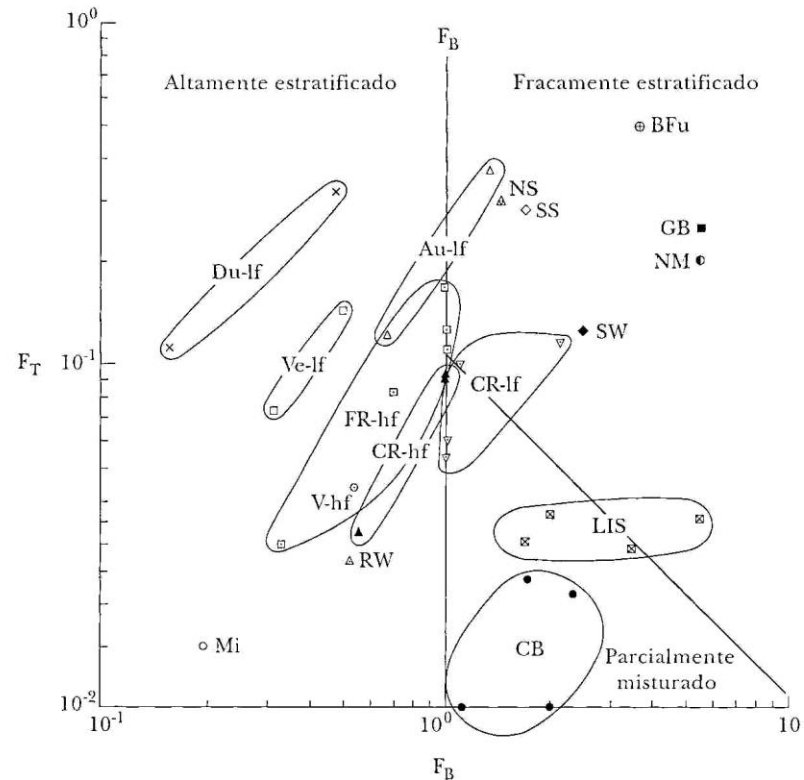
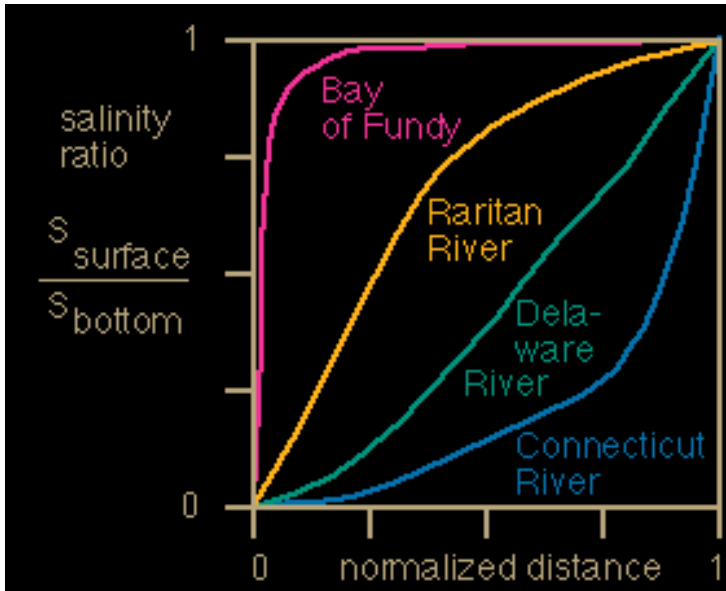


Figura 3.15 Diagrama de classificação de sistemas estuarinos rasos com os números de Froude barotrópico ( $F_T$ ) e baroclínico ( $F_B$ ). Esses parâmetros estão correlacionados com valores calculados com dados observacionais de estuários, nas condições de alta (hf) e baixa (lf) descarga fluvial: Du = Duwamish; Ve = Vellar; Au = Aulne; Mi = Mississippi; Fr = Fraser; RW = canal Rotterdam; CR = Columbia; CB = baía Chesapeake; LIS = Canal de Long Island Sound; SW = Southampton Water; NS e SS = North e South Santee; BFu = baía Fundy; GB = Great Bay e NM = estreito de Mersey (de acordo com Jay & Smith, 1988).

# Classificação de Tomczak



Classification diagram for estuaries based on the ratio surface salinity : bottom salinity, with examples for different estuary types. Normalized distance is the distance along the estuary, divided by its length. The Connecticut River is a salt wedge estuary, The Delaware River highly stratified, the Raritan River slightly stratified, and the Bay of Fundy vertically mixed.

# Números adimensionais

$$Re = \frac{UH_0}{\nu}$$

Número de Reynolds

$$Ri = - \frac{\rho \hat{\partial} z}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2}$$

Número de Richardson – gradiente de densidade contra gradiente de velocidade. Transição entre laminar e turbulento Ri=0,25

$$Ri = \frac{gh\Delta\rho_v}{\rho \ddot{u}^2} = \frac{gh\beta\Delta S_v}{\ddot{u}^2}$$

Número de Richardson Local –  $\Delta\rho_v$  e  $\Delta S_v$  são os gradientes verticais de densidade e salinidade, h é a profundidade e  $\beta$  é o termo da equação de densidade em função da salinidade

$$Ri_e = \frac{g \frac{\Delta\rho_h}{\ddot{\rho}} Q_f}{Bu_{rmq}^3}$$

$$u_{rmq} = 0,7U_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(x,t) dt}$$

$$Fm = \frac{u_f}{\sqrt{gH_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_2}}} = \frac{Q_f}{BH_0 \sqrt{gH_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_2}}}$$

# Números adimensionais

$$Ri_e = \frac{g \frac{\Delta\rho_h}{\rho} Q_f}{Bu^3_{rmq}}$$

**Número de Richardson estuarino:** o rio comporta-se como uma fonte de empuxo. B é a largura do estuário. Se Ri é grande o estuário é estratificado. A transição entre alta e baixa estratificação é  $0,08 < Ri_e < 0,8$

$$u_{rmq} = 0,7U_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(x,t) dt}$$

$$Fm = \frac{u_f}{\sqrt{gH_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_2}}} = \frac{Q_f}{BH_0 \sqrt{gH_1 \frac{\Delta\rho}{\rho_2}}}$$

**Número de Froude Densimétrico:** o condicionamento está ligado às dimensões do estuário. Quando a descarga do rio é pequena Fm tende a zero. o rio comporta-se como uma fonte de empuxo. B é a largura do estuário. Se Ri é grande o estuário é estratificado. A transição entre alta e baixa estratificação é  $0,08 < Ri_e < 0,8$

# Números adimensionais

$$W = \frac{Ri}{\delta}$$

**Número de Wedderburn** -  $\delta$  é a razão de aspecto característica da dimensão longitudinal.

$$\delta = L/H_0$$

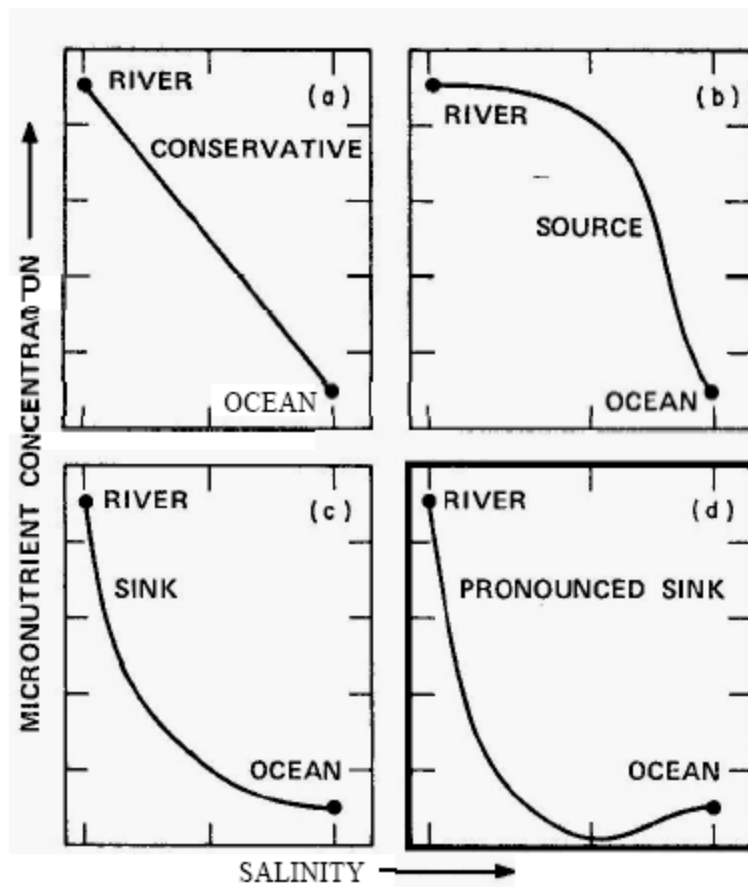
$$Ri = \frac{gH_1\Delta\rho_H}{\rho u_1^2}$$

**Número de Richardson modificado** (Geyer, 1997) – usado para um sistema estuarino estratificado que tem o vento por forçante principal.  $U_1$  e  $H_1$  representam a velocidade e espessura da camada acima da haloclina.

$$We = \frac{g\Delta\rho_H H_1^2}{\tau_{Wx} L}$$

**Número de Wedderburn Estuarino** – onde a expressão quadrática foi considerada igual à tensão de cisalhamento. Quando o efeito do vento é predominante  $We < 1$ . Quando  $We > 1$  o efeito do empuxo predomina sobre os processos de estratificação.





**Figure 3. Idealized longitudinal distributions of salinity covarying with a non-conservative substance which has a higher concentration in river water than seawater. (a) Horizontal mixing rates dominate and effects of internal sources or sinks are negligible; (b) secondary source is present; (c) sink is present; (d) sink is pronounced relative to the horizontal mixing rate. After Peterson et al. (1975a).**