

F13 60



**Universidade Eduardo Mondlane**  
**Faculdade de Ciências**  
**Departamento de Física**



**Trabalho de Licenciatura**

*Estimativa do Tempo de Renovação da Água no Estuário do  
Rio Incomati.  
Contribuição para o Estudo da Qualidade de Água*

**Autor: Edson Anselmo José**

**Maputo, Março de 2004**

**Universidade Eduardo Mondlane**

**Faculdade de Ciências**

**Departamento de Física**

**Trabalho de Licenciatura**

*Estimativa do Tempo de Renovação da Água no Estuário  
do Rio Incomati.*

*Contribuição para o Estudo da Qualidade de Água*

**Autor: Edson Anselmo José**

**Supervisor: Prof. Doutor António M. Hogueane**

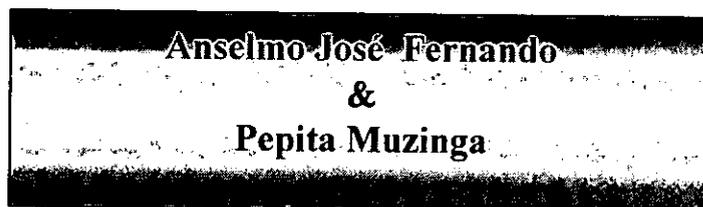
**Co-Supervisor: Dr. Fernando V. Saide**

**Maputo, Março de 2004**

## Dedicatória

*“Todo o início é difícil. Esta é uma verdade que tem razão de ser em qualquer aspecto da vida”.*

*Quero dedicar este pensamento a todos aqueles que pela causa da natureza muitas vezes se prescindem da convivência; de maneira muito especial aos meus pais,*



*aos meus irmãos e sobrinhos: Gaudêncio, Arlete, Marito, Nilza, Fani, Selma, Peluci e Cúcu, que em mim acreditaram e confiaram, dedico-lhes o meu amor e gratidão.*

## Agradecimentos

Nunca poderei agradecer suficientemente a todas as pessoas que têm tido um papel tão importante em minha vida, mas há algumas delas que se destacam por certas razões em torno das quais a minha vida gira:

- A todos os docentes e o CTA do Departamento de Física, quero estender os meus agradecimentos de maneira muito especial ao Prof. Doutor Mutimucuío, Dr. Momad Ibraímo, Dr. Chea, Dr. Tembe, Prof. Doutor Utui, Dr. Chenene, Dr. Genito, Prof. Doutor Maphossa, Prof. Burdeyni, Prof. Doutor Rakov, e muitos outros, que ao longo dos 5 anos de formação transmitiram os seus conhecimentos de maneira clara e convincente, e em particular ao Prof. Doutor Hogueane e Dr. Saíde pela disponibilidade e atenção que tiveram no acompanhamento de todo o trabalho;
- Aos funcionários do gta, em especial Manuel de Sousa e Ibraímo, pelo apoio vãos os meus agradecimentos;
- A todos os colegas da R-II e do Departamento de Física em especial Chicumbe, Deolindo, Arruda, Issufo, Meque, Santinho, Berino, Clousa, Claire, Orlando, Maparage, dr. Messias Sidumo, Nostado e outros que juntos partilhamos os momentos mais difíceis da vida estudantil, o meu muito obrigado.
- Aos meus avós Eduardo e Helene, a tia Jacinta, Adelino, Gricelda, agradeço-lhes de coração pelo apoio incondicional desde os primeiros dias da minha formação superior;
- A Valdemira, companheira indispensável cuja vida é e será um monumento de grandes recordações, dedico-lhe muito amor e respeito;
- A todos amigos do canabajdu, Nelito, Txodjo, Edgarrinho, Celita, Zinha, Laide, Chaninha, Celinho, Bibí, Nucha, Rúben, Betuel, Elsa, dr. Canhanga, e muitos outros endereço-lhes a minha sincera e profunda gratidão pelo suporte e coragem que deles recebi para a concretização dos meus sonhos;

### **Declaração de Honra**

As conclusões deste trabalho são evidências dos resultados apresentados ao longo do mesmo. Pela minha honra, declaro assumir a responsabilidade dos resultados apresentados neste trabalho mostrando a síntese das várias etapas realizadas por mim sob orientação do Prof. Doutor A. M. Hogueane e Dr. Fernando V. Saide.

Março de 2004

-----  
*Edson Anselmo José*  
-----

## Resumo

Estuários são regiões onde as águas dos rios se misturam com as águas do mar, resultando numa salinidade intermédia; eles são ainda os únicos sistemas aquáticos onde ocorre a interação dinâmica entre as águas doces, águas marinhas, o sistema terrestre e a atmosfera.

Eles desempenham um papel importante na vida nos oceanos, porque filtram os sedimentos e poluentes que provem dos rios, constituem um habitat vital de muitas espécies marinhas e não só; também são considerados “viveiros do mar” devido ao seu ambiente protegido e abundância de alimento, como também são locais atractivos de lazer.

A qualidade da água nos estuários torna-se assim relevante na manutenção destes ambientes; assim, conhecendo o tempo de renovação (*tempo de residência*) desta água permite-nos determinar a qualidade da mesma e a capacidade de auto limpeza do próprio estuário. Para a determinação deste tempo são necessários os conhecimentos dos padrões de circulação, de transporte de sedimentos e partículas em suspensão, para além de que estes conhecimentos são essenciais na compreensão dos problemas ecológicos dos ambientes estuarinos.

O presente trabalho foi realizado no estuário do rio Incomati, que é um dos mais importantes dos que drenam na Baía de Maputo, tem um comprimento estimado em 26 km, a sua profundidade média é 3.0 m e o seu volume é aproximadamente igual à 61.3 Mm<sup>3</sup>. As marés neste estuário são de carácter semi-diurno, portanto com um período de 12,42 hr. O rio Incomati é compartilhado por três países nomeadamente Moçambique, Suazilândia e a África do Sul.

Para a determinação do tempo de renovação da água neste estuário foram propostos três modelos nomeadamente “*fracção de água doce, modelo de duas camadas e prisma de marés*”. No entanto, foram usados dois dos três modelos, “*fracção de água doce e prisma de marés*” porque estes se aplicam para estuários parcialmente misturados e completamente misturados que é o caso do Incomati, enquanto que o “*modelo de duas camadas*” se aplica para estuários estratificados (cunha salina). A partir dos resultados obtidos, verificou-se que com os modelos *fracção de água doce e prisma de marés*, o tempo de renovação varia de 1 a 2.5 dias e de 6 a 17 dias respectivamente.

## Índice:

CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUÇÃO, OBJECTIVOS, DESCRIÇÃO DA ZONA DE ESTUDO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2 Objectivos .....	3
1.3 Descrição e Caracterização da Zona de Estudo .....	4
1.4 Motivação da Realização do Trabalho.....	4
CAPÍTULO II.....	6
2. METODOLOGIA, QUESTÃO CHAVE, PRINCIPAIS PROCESSOS FÍSICOS NOS ESTUÁRIOS .....	6
2.1 Metodologia .....	6
2.2 Questão Chave .....	7
2.3 Principais Processos/Factores Físicos nos Estuários .....	7
CAPÍTULO III.....	8
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	8
3.1 Conceito de Estuário .....	8
3.2 Tipos de Estuário, sua origem e características .....	9
3.3 Limites de Um Estuário .....	12
3.4 Critérios de Delimitação .....	12
3.5 Circulação Estuarina, Tipos e Características.....	14
3.6 Princípios Básicos de Circulação e Mistura.....	21
3.7. Tempo de Residência.....	24
3.7.1 Método de Fracção de Água Doce.....	25
3.7.2 Modelo de duas Camadas .....	26
3.7.3 Métodos de Segmentação e de Prisma de Maré.....	27
CAPÍTULO IV.....	29
4. ANÁL. DE RESULT., CONCLUSÃO, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES, REF. BIBLIOG. ....	29
4.1 Análise e Discussão de Resultados .....	29
4.2 Conclusão, Limitações e Recomendações .....	33
4.3 Referência Bibliográfica .....	36

## CAPÍTULO I

### 1. Introdução, Objectivos, Descrição da Zona de Estudo e Motivação

#### 1.1. Introdução

O conhecimento dos padrões de circulação, de transporte de sedimentos e partículas orgânicas em suspensão nos ambientes estuarinos, apresenta grande importância no planeamento de actividades portuárias e obras de engenharia, especialmente em relação aos altos custos de dragagem de canais, da manutenção da qualidade da água e conservação do ambiente marinho nos estuários. (Leussen, 1988).

Por outro lado, estes conhecimentos são essenciais na compreensão de problemas ecológicos, relacionados com o transporte de metais radionucleídeos e os micropoluentes orgânicos acoplados aos sedimentos finos (Leussen, 1988), no estudo do funcionamento dos mangais <sup>(1)</sup> e outros ambientes estuarinos (Kjerfve, 1990) e na determinação da contribuição do ambiente estuarino na produtividade das zonas costeiras (Kjerfve & Mckellar, 1980; Baird *et al.*, 1987).

Os parâmetros principais da Oceanografia Física investigados num estuário têm sido o movimento da água, processos de mistura, e a distribuição da salinidade que resulta da combinação dos mesmos. A distribuição da temperatura, é normalmente de "interesses secundários" num estuário, desde que esta tenha um efeito menos importante na estratificação ou variação da densidade da água. Outro tipo de parâmetros que constitui motivo de estudo são os efeitos dos processos de circulação e mistura no movimento e dispersão de substâncias introduzidas no estuário de várias formas, (Lauff, 1967).

---

<sup>(1)</sup> Constituem um dos sistemas mais produtivos do mundo e funcionam como habitats de criação, protecção e alimentação de diversas espécies de moluscos, crustáceos, espécies estuarinas e costeiras, (Mitsch & Gosselink, 1986), muitos dos quais representam importantes recursos pesqueiros. Além disso, actuam na regulação dos ciclos químicos, influenciando na manutenção de nutrientes e material orgânico particulado na zona costeira, (Day *et al.*, 1989).

A realização de um balanço de massas para um ambiente estuarino permite obter os valores de exportação e/ou importação de água e materiais (ex: sal, sedimentos) e, envolve medições durante um período de tempo considerável, que possibilitem detectar variações sazonais na acumulação de sedimentos (ex: pela descarga fluvial, produção biológica), na ciclagem interna e nos padrões de erosão e sedimentação associados aos ciclos de maré, (Kjerfve & Mckellar, 1980; Dyer, 1988).

Alguns efeitos de alta energia (ex: tempestades), apresentam particular importância, podendo movimentar em curto período de tempo, uma carga sedimentar superior a verificada durante longos períodos em condições normais, (Nichols, 1986; Dyer, 1988).

Podem-se encontrar diferentes tipos de estuários na superfície da esfera terrestre, alguns dos mais predominantes são apresentados mais adiante no presente trabalho. Seguem-se algumas das características principais de estuários de acordo com a classificação de Lauff, (1967):

- Os estuários são limitados à desembocadura dos rios pelas marés;
- Os estuários, muitas vezes mostram áreas salinas, mas a extensão destas áreas diferem dependendo da quantidade de entrada de água doce;
- Em estuários extensos, as correntes induzidas devido as marés alcançam a montante do rio, neste caso, o limite superior do estuário corresponde ao limite superior da influência da maré;
- Os estuários, em contraste com as lagoas, são caracterizados pela instabilidade dos factores ambientais;

Por serem ambientes altamente produtivos e próximos a costa, os estuários têm sido intensamente povoados pelo homem, sofrendo deste modo uma influência directa ou indirecta de diversas actividades antrópicas (ex: urbanas, recreativas, portuárias, industriais, pesqueiras, desmatamento, etc.) desenvolvidas ao seu redor ou ao longo da sua bacia de drenagem, (Knox, 1986; Kennish, 1986).

Os resultados de pesquisa poderiam ser úteis para o conhecimento do comportamento do estuário do rio Incomati no relativamente ao tempo de residência da água no estuário e os factores que determinam esse tempo. É em volta deste aspecto (tempo de renovação da água no estuário do rio Incomati) que se inserem os objectivos e motivação da realização do presente trabalho, que de alguma maneira irá contribuir para o estudo da qualidade da água.

## 1.2 Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo geral:

- *A determinação do tempo necessário para a renovação da água com base em dados de salinidade período e amplitude das marés e volume da água doce drenada no estuário de Incomati;*

Os objectivos específicos deste trabalho são:

- *Determinar os factores que contribuem na mistura e remoção da água no estuário;*
- *Determinar o tempo de renovação da água no estuário do Incomati;*
- *Apresentar medidas ambientalmente correctas para a conservação dos ambientes estuarinos;*

### **1.3 Descrição e Caracterização da Zona de Estudo**

O rio Incomati é um dos mais importantes dos que drenam na Baía de Maputo. O rio é compartilhado por Moçambique, Suazilândia e a república da África do Sul e tem muitas barragens do lado da África do Sul que retêm água para irrigação, daí a ocorrência de intrusão salina ameaçadora no estuário. O caudal médio do rio é cerca de 200-400m<sup>3</sup> o que corresponde a um escoamento anual de cerca de 700-1000Mm<sup>3</sup>, (Hoguane *et al.*, 2002).

Antes de 1975 o rio nunca secou, tendo um fluxo mínimo na ordem de 1m<sup>3</sup>/s. Depois deste tempo, notou-se um desenvolvimento rápido na república da África do Sul, condicionando assim uma redução do fluxo. Um entendimento bilateral entre Moçambique e a África do Sul resultou num acordo em que África do Sul deveria garantir uma descarga mínima de 2m<sup>3</sup>/s. O rio desagua na Baía de Maputo, onde a maré é de carácter semi-diúrno, (Groen, 1993).

Durante a enchente da maré, a amplitude da mesma é de 3m, mas devido a pouca profundidade da boca do estuário, a amplitude mais alta da maré perto de Marracuene é da ordem de 1.5m. A boca do rio é larga e pouco profunda. No limite a jusante, numa extensão de cerca de 12 km o Incomati é somente separado do oceano por uma cadeia de dunas. O pequeno declive das dunas faz com que o estuário seja largo e pouco profundo na região mais baixa, (Groen, 1993).

### **1.4 Motivação da Realização do Trabalho**

O conhecimento do comportamento dos estuários contribui grandemente na gestão e conservação da biodiversidade. É com base neste princípio que o autor se motiva no estudo de algumas características do estuário do rio Incomati, tais como o tempo de residência da água dentro do estuário e os factores que contribuem para a sua remoção.

O tempo de residência é um importante indicador do funcionamento dos estuários. É possível afirmar que estuários com tempo de residência baixo exportarão mais rapidamente os nutrientes vidos das descargas a montante do que os com tempo de residência alto. Por outro lado, o tempo de residência constitui um indicador do comportamento ecológico e da capacidade de auto limpeza dos sistemas estuarinos;

Os métodos para o cálculo deste tempo, foram desenvolvidos como resposta do crescente índice de deposição de resíduos doméstico ou industriais em regiões ou cidades por onde passam rios, sendo estes considerados como veículos de transportes desses resíduos para o mar onde são completamente dissolvidos. São por vezes ignorados os princípios básicos dos processos de transporte, remoção e dissolução desses mesmos resíduos ou mesmo o tempo de permanência nos estuários, rios ou oceanos. Na tabela 01 abaixo são apresentados exemplos de tempo de permanência de alguns iões no oceano:

**Tabela 01: Exemplo de tempo de Permanência em solução de alguns Iões no Oceano;**

Ião	Tempo em Anos
Sódio	260 milhões
Cloro	79 milhões
Magnésio	45 milhões
Potássio	11 milhões
Sulfato	8 milhões
Cálcio	8 milhões
Manganês	1.4 mil
Ferro	140
Alumínio	100

Fonte: Duxbury & Duxbury, (1997).

Como se pode ver na tabela acima, uma vez despejados no oceano estes elementos constituem grande ameaça para as espécies marinhas. A poluição orgânica, é devida principalmente aos despejos dos esgotos das cidades nos rios e baías que lhes são próximos. Este tipo de poluição é causada fundamentalmente pelo grande crescimento da população urbana. Apesar da importância dos processos hidrodinâmicos e sedimentares para a percepção dos processos estuarinos, no Incomati poucos estudos sobre o tempo de residência foram realizados, no qual o autor incentiva a sua realização. Embora estejam sendo feitos levantamentos da distribuição da salinidade, temperatura e marés, quantificação da clorofila, parâmetros químicos e do material em suspensão, há necessidade de estudar a circulação no estuário e suas implicações nas actividades de carácter económico e recreativo.

## CAPÍTULO II

### 2. Metodologia, Questão Chave e Principais Processos/Factores Físicos nos Estuários

#### 2.1 Metodologia

O trabalho proposto irá basear-se nas metodologias apresentadas por Dyer, (1997), Lauff, (1967), entre outros, para o estudo do tempo de renovação da água num estuário e os factores que determinam esse tempo. A área de estudo compreenderá o estuário do rio Incomati; sendo assim propõe-se:

1. *Revisão bibliográfica das diferentes abordagens sobre a matéria;*
2. *Consulta a algumas instituições governamentais e não governamentais que estão directamente ligadas ao estudo do estuário do Incomati;*
3. *Análise e sistematização da informação obtida, compilação dos dados e análise dos resultados;*

O tempo de residência foi durante muito tempo um dos padrões de comparação de estuários. Em estuários unidimensionais, o tempo de residência calculado com base na salinidade que é um majorante do tempo de residência da água descarregada entre o rio e o mar; em estuários com formas mais complexas, a circulação residual pode ter recirculações importantes e o tempo de residência da água proveniente do rio pode ser inferior ao tempo de residência da água proveniente de outras descargas.

Sendo assim, usar-se-ão de diferentes métodos de estimativa do tempo residencial e far-se-á comparação dos resultados obtidos. Será necessário conhecer o volume de água acumulada no estuário, a descarga do rio, e outros parâmetros que contribuam para a determinação do tempo de renovação.

Para o efeito, serão usados dados de temperatura e salinidade de pesquisas realizadas no rio obtidos no âmbito dos projectos: Incomati River Shared Initiative Integrated Basin Managment (Cátedra de Ciências Marinhas e Oceanografia, UEM); Catchment to Coast, (Europe Union); Sida/Sare e dados de escoamento do rio obtidos pela Direcção Nacional de Águas.

## 2.2 Questão Chave

*Quanto tempo a água que entra no estuário do Incomati leva para se renovar e quais os factores que condicionam esta remoção e mistura?*

Para responder esta questão, primeiramente recorreremos a hipóteses baseadas em fundamentos meramente teóricos. Contudo, uma análise cuidadosa baseando-se em parâmetros físicos já estudados, conduzir-nos-ão a resultados que posteriormente poderão ser tomados em consideração com vista a uma conclusão plausível.

## 2.3 Principais Processos/Factores Físicos nos Estuários

- O transporte e distribuição de materiais no estuário é primariamente condicionada pela hidrodinâmica estuarina, (Kjerfve et al., 1982; Leussen & Dronkers, 1988; Kjerfve, 1990);
- Nos sistemas estuarinos, os processos de mistura, circulação e estratificação são basicamente governados pela descarga de água doce, pelas correntes de maré e pela transferência de momentum através do cisalhamento do vento em sua superfície livre, (Kjerfve, 1990; Miranda, 1996);
- Em estuários onde as descargas de água doce, a acção do vento e de ondas geradas pelo vento são relativamente baixos, a circulação é basicamente guiada pelas correntes de maré (Day et al., 1989);

## CAPÍTULO III

### 3. Fundamentos Teóricos

#### 3.1 Conceito de Estuário

Estuário é definido como sendo uma bacia costeira semi-fechada com uma livre comunicação com o mar, onde a água do rio se mistura com água do mar, resultando numa salinidade intermédia. A influência da água do rio no mar pode estender-se vários quilómetros dentro dele, sendo difícil delimitar a sua extensão, ( McCormick & Thiruvathukal, 1981; Lauff, 1967; Duxbury & Duxbury, 1997; Pickard & Emery, 1990).

Os estuários constituem os únicos sistemas aquáticos onde ocorre a interacção dinâmica entre as águas doces, águas marinhas, sistema terrestre e a atmosfera (Day *et al.*, 1989). Estes ecossistemas destacam-se pela sua alta produtividade biológica que ocorre como reflexo de:

- i) alta diversidade de sistemas produtores (exemplo: mangais, fanerógamas submersas, algas bentónicas e fitoplâncton);
- ii) abundante suplemento de nutrientes provenientes das descargas fluviais, pluviais e antrópicos;
- iii) renovação da água nos ciclos de maré;
- iv) rápida remineralização e conservação de nutrientes através de uma complexa teia trófica, que inclui organismos detritívoros e filtradores, (Day *et al.*, 1989);
- v) troca de nutrientes e outras propriedades biogeoquímicas entre o sistema bentónico e a coluna de água estuarina, através dos processos de erosão e ressuspensão dos sedimentos de fundo, (Nichols, 1986).

Os estuários são zonas ecologicamente importantes porque um grande número de organismos depende deles (pelo menos durante parte da sua vida), podendo perturbações neste compartimento ecológico ter repercussões noutros, e no seu exterior.

O padrão de circulação num estuário é influenciado pelos seus limites laterais a um grau considerável. Este controle do movimento da água pelos limites laterais é uma característica importante do estuário e pode ser levado em conta na definição. Sendo assim considera-se um *estuário positivo* se uma quantidade de água costeira semi-fechada tendo um contacto livre com o mar aberto dentro da qual corrente superficial mais a precipitação directa excedem a evaporação, consequentemente a água do mar é diluída pela água doce, (Lauff, 1967).

Um estuário é *inverso ou negativo* se a evaporação excede a corrente superficial mais a precipitação, desde que as características de padrão de circulação em tais corpos hipersalinos seja inverso em relação a aquelas encontrados em estuários positivos (Lauff, 1967).

O estuário do rio Incomati, segundo as suas características, é positivo porque a corrente superficial e a precipitação excedem a evaporação.

### 3.2 Tipos de Estuário, sua origem e características

Quanto a origem, os estuários podem ser descritos pelos processos geológicos (processos tectónicos e glaciações), processos pelos quais eles são formados; por outro lado, os rios criam seus próprios estuários, depositando sedimentos em suspensão nas desembocaduras e podem ainda ser caracterizados pela dinâmica de circulação da água doce e salina, (Duxbury & Duxbury, 1997).

Geomorfologicamente distinguem-se quatro tipos de estuários básicos:

- 1) Vales fluviais submersos;
- 2) Estuários formados por barragens;
- 3) Estuários tipo fiord;
- 4) Estuário tipo delta fluvial (formados por processos tectónicos);

### **Vales Fluviais Submersos (drowned river valleys)**

Lauff, (1967) define como sendo estuários clássicos da geografia física, chamando-lhes “*estuários de percursos de água da planície costeira*”. São geralmente os mais encontrados ao longo da linha da costa, com uma planície costeira relativamente larga, e geralmente confinados ao regime geológico local. Em muitos estuários da planície costeira, o fundo do rio não se eleva acima do nível do mar por uma distância considerável do lado da terra a partir do ponto do qual os últimos vestígios do sal derivado do mar podem ser misturados. Como resultado da desembocadura do estuário da planície costeira, a salinidade normalmente decresce uniformemente de 30‰ à 0,1‰, (Lauff, 1967).

### **Estuários Formados por Barragens (Bar-built estuaries)**

Estes estuários podem também ser chamados de “vales fluviais submersos”, uma vez que eles experimentam cortes durante a idade de gelo e conseqüente inundação. Entretanto, novas sedimentações têm mantido um ritmo com a inundação e eles têm uma barreira característica perpendicular a sua foz. Esta barreira é normalmente a “break-point bar” formada onde as ondas se arrebatam na praia e por estes serem bem desenvolvidos, a taxa de maré deve ser restrita e disponível grandes quantidades de sedimentos.

Conseqüentemente, estuários formados por barragens naturais, são geralmente associados com deposições costeiras. Estes estuários têm geralmente poucos metros de profundidade e por vezes têm extensivas lagoas e riachos rasos dentro da desembocadura. Devido a restrita área seccional, as velocidades de corrente podem ser maiores na boca do estuário, mas em partes largas mais para o interior elas diminuem rapidamente.

O fluxo do rio é maior e sazonalmente variável, e grandes quantidades de sedimentos são carregados pelo rio durante as inundações. A forma do estuário é governada pelo regime do rio na fase de inundação, e estes estuários são geralmente encontrados em zonas tropicais ou em regiões costeiras onde a deposição de sedimentos é activa, (Dyer, 1997; Lauff, 1967).

O fluxo do rio é maior e sazonalmente variável, e grandes quantidades de sedimentos são carregados pelo rio durante as inundações. A forma do estuário é governada pelo regime do rio na fase de inundação, e estes estuários são geralmente encontrados em zonas tropicais ou em regiões costeiras onde a deposição de sedimentos é activa, (Dyer, 1997; Lauff, 1967).

### Estuário Tipo Fjord

Geralmente com uma secção transversal em forma de U, são originados pelos glaciares e são bastante profundos (300 ou 400)m como mostra a figura 01 abaixo. Eles normalmente têm uma entrada rasa, ou um cume submerso perpendicular a boca do estuário formada pela terminal de depósito do glaciar. A entrada marca o limite do avanço do glaciar em direcção ao mar. Muitos Fjords têm rios entrando na nascente e expondo as características estuarinas na camada superior, (Lauff, 1967; Duxbury & Duxbury, 1997).

Nos Fjords, a circulação é restrita e assim eles são bastante distintos dos outros. Tendem por vezes a ser bem estratificados e a circulação é restrita pela sua entrada que reduz o fluxo da água do mar dentro e fora do estuário. Consequentemente, há uma tendência das águas do fundo estagnarem-se e tornarem-se anóxicas<sup>(2)</sup>. As condições anóxicas causam aumento da concentração de sulfato de hidrogénio produzido devido a certas bactérias aneróbicas.

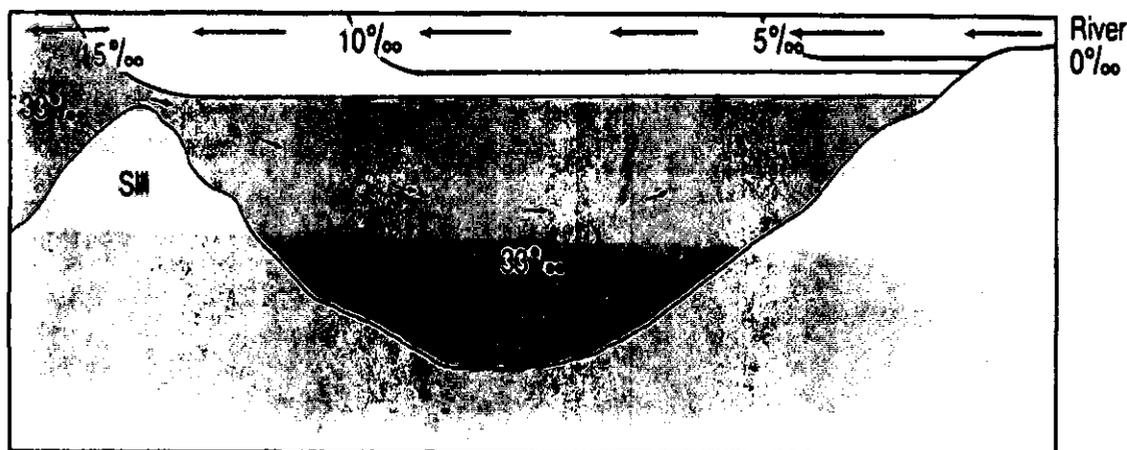


Figura 01: Estuário do Tipo Fjord. Fonte: Duxbury & Duxbury, (1997)

<sup>(2)</sup> Deficiência de oxigénio

### **Estuários Tipo Delta Fluvial (Formados por Processos Tectônicos)**

Esta quarta categoria é um tipo de classificação “*catch-all*” para estuários não claramente incluídos noutras três divisões. As feições costeiras formadas pelas falhas e subsidência local e tendo um excessivo fluxo de água doce, são cobertos por esta categoria. Outra aproximação para a classificação dos estuários, é a consideração do processo físico dominante associado com o movimento e mistura no estuário, (Lauff, 1967; Dyer, 1997).

Dos tipos de estuários apresentados acima, o Incomati é do tipo vale fluvial submerso devido a suas características tais como a proximidade a costa e a distribuição da salinidade.

### **3.3 Limites de Um Estuário**

Como foi anteriormente definido, o estuário é uma bacia costeira semi-fechada onde a água do rio se mistura com a água do mar. Sendo uma zona de mistura, é de esperar que seja difícil delimitá-lo, pois as propriedades da água tendem assintoticamente para os valores nos seus extremos (marinho a jusante e do rio a montante). Em zonas sujeitas a maré, a dificuldade de delimitação é ainda maior devido ao escoamento na fronteira com o mar ser alternado.

### **3.4 Critérios de Delimitação**

A salinidade é um indicador da água do mar e não só, por isso pode ter um papel preponderante na delimitação do estuário. Ela não é no entanto o único parâmetro utilizável para esse fim, nem é sempre o mais adequado. Os estuários com caudais fluviais pequenos comportam-se como lagoas costeiras, sendo a água no seu interior sobretudo de origem marinha. Um critério baseado exclusivamente na salinidade poderia colocar o limite de jusante no interior do próprio estuário.

Pelo contrário, quando o caudal do rio é muito grande, uma parte importante de mistura ocorre no exterior do estuário, com que então um critério baseado exclusivamente na salinidade poderia colocar o limite do estuário longe da zona da costa de forma pouco realista, (Limites de um Estuário; Disponível em <http://www.limites de um estuarios.com>).

Os limites do estuário devem ser tais que as zonas de tempo de residência elevado e zonas de deposição devem ser consideradas zonas interiores. Isto significa que alguma mistura pode ocorrer fora do estuário. Estas zonas de mistura fora do estuário foram chamadas de "ROFI's: *Regions Of Freshwater Influence*" (Simpson, 1997). O conceito de ROFI assenta no facto de a maioria da mistura ocorrer no interior do estuário, mas também uma outra parte pode ocorrer fora do estuário em zonas que podem atingir centenas de quilómetros de comprimento, (Limites de um Estuário; Disponível em <http://www.limites de um estuario.com>).

### **Limite a Montante**

O limite de montante de um estuário é pouco importante em termos de gestão uma vez que, de qualquer modo, o estuário é o destino final da generalidade dos produtos transportados pelo rio. Em estuário sujeitos a maré, esta é normalmente sentida alguns quilómetros a montante da penetração salina gerando um escoamento alternado nesta zona, com tempos de residência que dependem do caudal do rio e da morfologia do canal.

Admitindo o tempo de residência como um factor importante para a definição dos limites do estuário então, espera-se que o limite superior se localize entre o limite de propagação da maré dinâmica e o limite de propagação da maré salina. A matéria particulada floclula em zonas de salinidade superior a 2‰ e por isso na montante da maré salina não há deposição de materiais finos, nem acumulação de poluentes. Assim, em termos de acumulação de poluentes, o limite superior poderia ser o limite da penetração da água salgada (Limites de um Estuário; Disponível em <http://www.limites de um estuario.com>).

### **Limite a Jusante**

As características de escoamento de alguns estuários são do tipo alternado devido à maré. Durante a enchente a água que entra no estuário é em parte água que saiu na vazante anterior e a água do mar que se mistura com a água do estuário. Deste processo de mistura resulta a distribuição de salinidades no seu interior. O limite de jusante do estuário deverá incluir a zona de mistura cuja água tem grande probabilidade de voltar a entrar no estuário durante a enchente. Estas regiões são facilmente identificáveis através da circulação, mas dificilmente através das propriedades da água. (Limites de um Estuário; Disponível em <http://www.limitesdeumestuário.com>).

### **3.5 Circulação Estuarina, Tipos e Características**

A hidrodinâmica estuarina primariamente condiciona a distribuição e o transporte de materiais no sistema (ex: matéria orgânica particulada, sedimentos, nutrientes, poluentes, clorofila, larvas) e seu conhecimento é fundamental para o entendimento de vários processos ecológicos, geológicos, físicos, químicos e para a manutenção da qualidade da água (Kjerfve *et al.*, 1982; Leussen & Dronkers, 1988; Kjerfve, 1990).

Nos sistemas estuarinos, os processos de mistura, circulação e estratificação são basicamente governados por três parâmetros: a descarga de água doce, as correntes de maré e pela transferência de momentum através do cisalhamento do vento em sua superfície; os quais somam-se as influências exercidas pela geometria do corpo estuarino, pela salinidade e padrões de circulação da região costeira adjacente, (Kjerfve, 1990; Miranda, 1996; Pickard & Emery, 1990).

Estes parâmetros condicionam a circulação gravitacional (baroclínica e barotrópica), a circulação residual e as correntes geradas pelo vento. Geralmente um destes padrões de circulação predomina num determinado sistema estuarino, entretanto dois ou três tipos podem ser observados simultaneamente ou sazonalmente num mesmo estuário (Kjerfve, 1990).

Em estuários onde as descargas de água doce e a acção de ondas geradas pelo vento são relativamente baixos, a circulação é basicamente guiada pelas correntes de maré (Day *et al.*, 1989) e, dados de correntes e propriedades durante um ou mais ciclos de maré, permitem obter os valores de exportação e/ou importação de água e materiais do sistema (Kjerfve *et al.*, 1982). Entretanto, a grande variabilidade temporal e espacial destes parâmetros e dos processos a eles associados, torna o estudo dos padrões de circulação e distribuição de propriedades nos sistemas estuarinos bastante complexos, (Kjerfve *et al.*, 1982).

Nos sistemas estuarinos, o transporte de massa (ex: material particulado em suspensão), nem sempre ocorre na mesma direcção do fluxo principal da água, devido aos processos de mistura (advectivos e difusivos) (Kjerfve, 1990; Day *et al.*, 1989). A dispersão e a advecção de massas de água e de suas propriedades decorre de vários processos que envolvem o movimento oscilatório das marés, difusão molecular (geralmente pequena), gradientes de densidade, cisalhamento lateral entre massas de diferentes velocidades de corrente, fricção com o fundo e difusão turbulenta (viscosidade do fluido) (Kjerfve & Wolaver, 1988; Day *et al.*, 1989; Kjerfve, 1990).

Durante um ciclo de maré (marés enchente e vazante), geralmente, observa-se uma forte relação entre as velocidades das correntes, o transporte e as concentrações do material particulado em suspensão (Ward, 1981; Nichols, 1986; Baird *et al.*, 1987; Kjerfve & Wolaver, 1988; Dyer, 1988; Jonge & Beusekon, 1995). Variações destes padrões podem ser observadas em ambientes vegetados, onde se verifica uma alta deposição de sedimentos, em função do trapeamento de partículas e estabilização do substrato pela vegetação, (French *et al.*, 1993; Jonge & Beusekon, 1995). A assimetria na velocidade das correntes de maré, quando integrada no tempo, primariamente condiciona o transporte líquido do material em suspensão em uma determinada direcção do corpo estuarino (exportação ou importação) (Ward, 1981; Dyer, 1988).

### Estuário com características de um Cunha Salina

As características de cunha salina, ocorrem dentro da desembocadura do rio, fluindo directamente no mar. A água doce do rio flui rapidamente para o mar na superfície, enquanto que a água densa do mar tende a fluir a montante ao longo do fundo do rio. Esta água do mar, estende-se formando uma cunha no rio e em caso de ausência completa de fricção na superfície de contacto, permanece horizontal, como se pode ver na figura 02, (Duxbury & Duxbury, 1997).

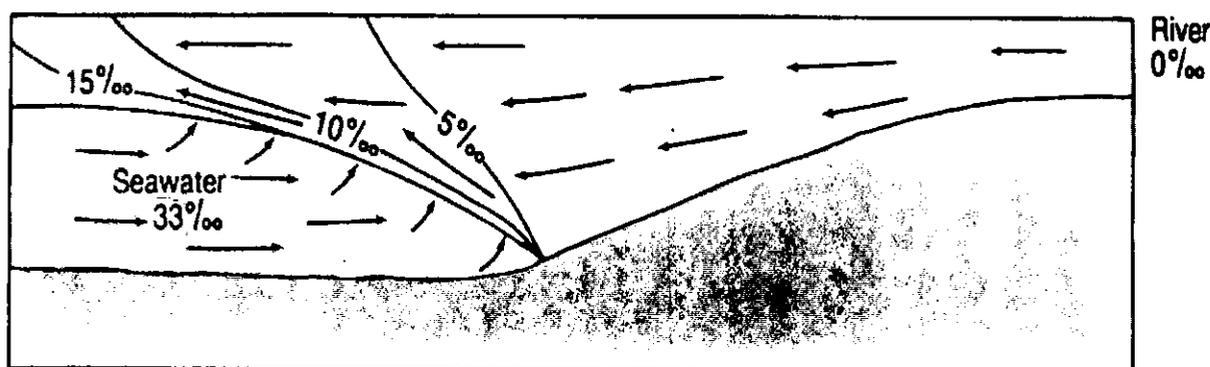


Figura 02: Cunha Salina Estuarina. Fonte Duxbury & Duxbury, (1997).

O gradiente de densidade na superfície de contacto quantificando uma descontinuidade, reduz a turbulência e mistura para um nível muito baixo. O efeito da força de Coriolis, causa uma inclinação a juzante na superfície de contacto para a direita no hemisfério norte virando em direcção ao mar. Veja figura 03.

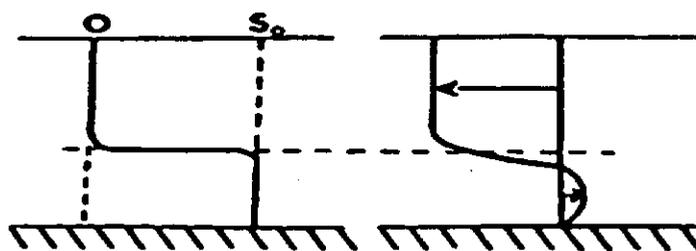


Figura 03: Perfil Típico de salinidade e Velocidade de um estuário de Cunha salina. Fonte: Lauff (1967).

O fluxo líquido da superfície em direcção ao mar é um movimento rápido de água do rio, devido a grande descarga de água doce forçada para dentro da camada fina acima da cunha salina. A cunha salina move-se a montante na maré enchente ou quando o fluxo do rio é baixo e move-se a jusante na maré vazante ou quando o fluxo do rio é maior. (Pickard & Emery, 1990; Duxbury & Duxbury, 1997).

### Estuário Parcialmente Misturado

Os estuários parcialmente misturados, ocorrem sob condições onde a profundidade e o fluxo do rio são baixos e o fluxo das marés é maior do que em estuários estratificados. Todos estes factores contribuem no aumento da mistura da água doce e com a salgada e a estratificação é menor. A diferença da salinidade entre a superfície e o fundo pode ser por volta de 20‰. As misturas causam ressurgência de uma parte da água para a superfície onde esta flui de volta ao mar, como mostra a figura 04 (McCormick & Thiruvathukal, 1981; Duxbury & Duxbury, 1997).

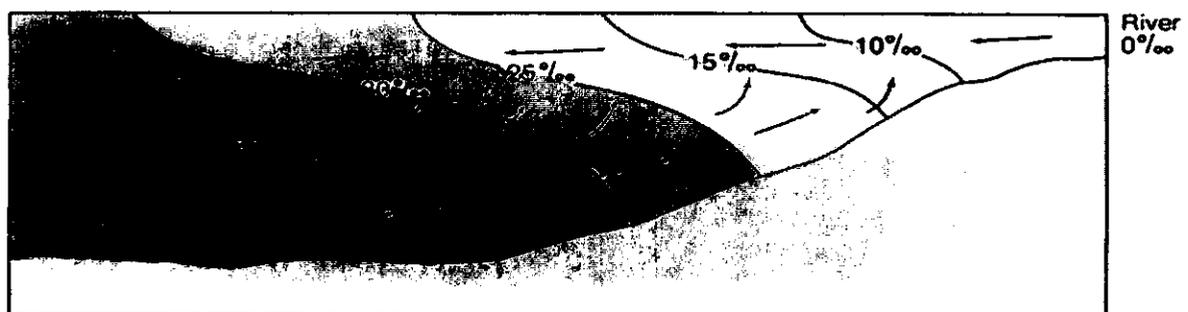


Figura 04: Estuário Parcialmente Misturado. Fonte: Duxbury & Duxbury, (1997).

A água salina move-se para dentro de um estuário parcialmente misturado pela difusão, mais significativamente pela advecção e o influxo da água do mar na profundidade. Este tipo de estuário tem um fluxo forte superficial da água doce, e um influxo forte da água do mar na profundidade. A água do mar é misturada na subida e combinada com a água do rio pela turbulência da corrente de maré e pelo entrainment <sup>(3)</sup> para produzir um fluxo superficial em direção ao mar que é maior do que o fluxo da água do rio por si só. Veja figura 05 esquemática abaixo.

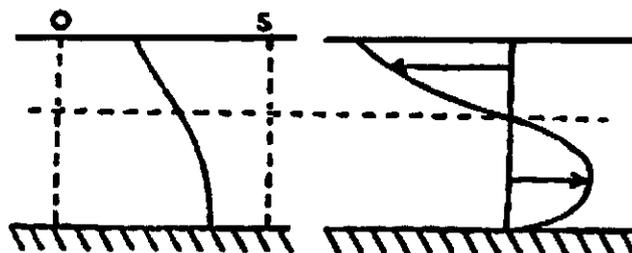


Figura 05: Perfil Típico de Salinidade e Velocidade de um estuário Parcialmente misturado. Fonte: Lauff (1967).

<sup>(3)</sup> Processo irreversível causando um movimento ascendente da água do mar sem nenhum movimento descendente correspondente da água doce.

### Estuário Completamente Misturado

Ocorre devido a força das marés e baixo fluxo do rio, criando um fluxo líquido lento em toda a profundidade em direcção ao mar. A mistura devido a forte turbulência da maré é completa se a salinidade da água for uniforme em toda a profundidade, e decresce do oceano para o rio. Se o fluxo do rio for menor, o fluxo da maré maior, e o estuário for raso e estreito, a mistura vertical pode ser quase completa e a diferença vertical na salinidade geralmente será menor que 4‰. (McCormick & Thiruvathukal, 1981). Veja figura 06 abaixo.

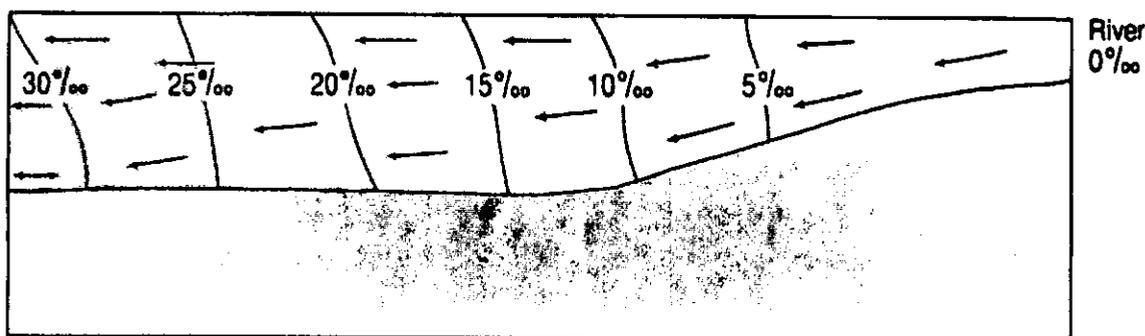


Figura 06: Estuário Completamente Misturado. Fonte: Duxbury & Duxbury, (1997).

Não há quase transporte na profundidade de água do mar, mas em lugar disso, há transferência da salinidade internamente pela difusão. As linhas quase verticais da salinidade constante, movem-se em direcção ao mar na maré vazante ou quando o fluxo do rio é maior e em direcção a montante na maré enchente ou quando o fluxo do rio é menor. (Duxbury & Duxbury, 1997).

Se a velocidade de movimento da camada de água doce em direcção ao mar excede um certo valor crítico, as ondas internas formadas na superfície de contacto, tendem a quebrar-se na crista, resultando em um entrainment da água do mar na camada superficial, como mostra a figura 07.

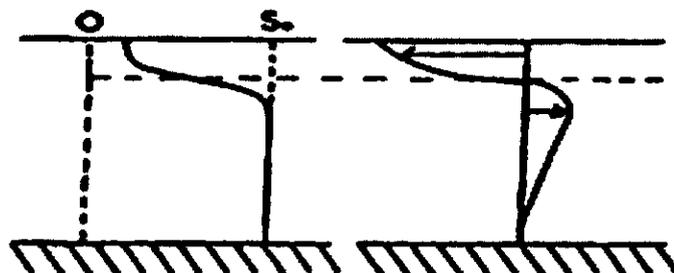


Figura 07: Perfil Típico de Salinidade e Velocidade de um Estuário Completamente Misturado. Fonte: Lauff (1967).

A salinidade da água na camada superior, aumenta devido ao entrainment, e o seu volume também aumenta dado que este aumenta em direcção ao mar. Este movimento, normalmente resulta num aumento considerável da velocidade de fluxo do que aumento na espessura da camada. A salinidade da camada profunda é quase inalterada, mas há um movimento lento de água a montante do rio para compensar a perda pelo entrainment (Duxbury & Duxbury, 1997).

De acordo com o tipo de circulação, o estuário do Incomati é do tipo parcialmente misturado transitando para completamente misturado. Estas características são justificadas pelo perfil ou distribuição da salinidade ao longo do estuário cujas isolinhas são verticais.

### 3.6 Princípios Básicos de Circulação e Mistura

Os princípios básicos que controlam a circulação e mistura, são expressos pela equação de movimento da água e pela equação de continuidade de volume da água e de massa de sal (Lauff, 1967).

Consideremos o eixo cartesiano com OX e OY no plano horizontal perto da superfície livre, OX sendo ao longo do estuário, positivo em direcção ao mar, OY perpendicular ao estuário e OZ decrescente. Consideremos ainda  $u$ ,  $v$ ,  $w$  como sendo as componentes da velocidade média no ponto  $(x, y, z)$  no tempo  $t$ , então as equações de movimento podem ser escritas:

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\alpha \left\{ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right\} \quad (01)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\alpha \left\{ \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right\} \quad (02)$$

$$0 = -\alpha \frac{\partial p}{\partial z} + g \quad (03)$$

Onde:

$$\left( \frac{D}{Dt} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial t} \right) + \left[ u \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) \right] + \left[ v \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] + \left[ w \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) \right]$$

$f = 2\omega \sin \phi$  é o parâmetro de Coriolis

$p$  — é a pressão;

$g$  — é a aceleração devido a gravidade;

$\alpha$  — é volume específico ( $\alpha = \frac{1}{\rho}$ ;  $\rho$  é densidade);

$\tau_{xy}$  — é o stress no plano perpendicular para OX actuando na direcção OY.

Nestas equações, as componentes de stress  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ , etc., sempre um resultado dos stresses turbulentos, excepto perto dos limites; os stresses devido a viscosidade molecular são vários de magnitude pequena.

Então se  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ , são as componentes da velocidade turbulenta em qualquer instante,  $\tau_{xx}=\rho\langle u'^2 \rangle$ ,  $\tau_{xy}=\rho\langle u'v' \rangle$ , etc. Onde  $\langle \rangle$  a média sobre o tempo levado para calcular a velocidade média. Os restantes termos, Coriolis e a aceleração podem ser omitidos.

A equação de continuidade de volume é:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (04)$$

A equação de conservação do sal pode ser escrita de seguinte maneira:

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (05)$$

Onde:

$K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  são os coeficientes de difusão na direcção x, y, z respectivamente. Como no caso da viscosidade estes coeficientes podem ser omitidos.

Em qualquer estuário, assume-se que as velocidades transversais são muito pequenas comparando com as velocidades ao longo do estuário, sendo assim os termos envolvendo v na equação acima pode ser omitidos.

Da equação (03) pode se obter a equação hidrostática, a pressão  $p$  à profundidade  $z$  é da por:

$$p = p_a + g \int_{-\zeta}^z \rho dz \quad (06)$$

Onde:

$p_a$  é a pressão atmosférica;

$\zeta$  - é a elevação da superfície em relação a nível médio do mar. Assumindo que  $p_a$  é uniforme então:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g \rho_s \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (07)$$

Onde:

$\rho_s$  - é a densidade na superfície. A densidade  $\rho$  é função da salinidade  $S$ , temperatura  $\theta$  e pressão, assim:

$$\rho = \rho(S, \theta, p) \quad (08)$$

Em qualquer estuário, a variação da densidade ( $\rho$ ) em função da pressão ( $p$ ) podem ser omitidos, e muitas vezes a dependência em função da temperatura potencial é de pequena importância comparando com a dependência em  $S$ . Nesse caso é suficiente tomar a densidade ( $\rho$ ) como sendo uma função linear de  $S$ . Sendo assim:

$$\rho = \rho_0 + aS \quad (09)$$

Onde:  $a$  é uma constante.

A solução completa do problema da circulação estuarina poderia resolver-se envolvendo as equações de (01) a (05) com (07) e (08) ou (09). As componentes da velocidade dependem dos gradientes de pressão, que são funções da distribuição da densidade. A densidade é função da salinidade e a distribuição da salinidade depende da velocidade, completando assim o sistema.

Em muitos estuários, os processos de mistura são condicionados pela combinação da turbulência gerada internamente, pela turbulência gerada na fronteira que varia de magnitude no espaço e no tempo e pela difusão. O perfil da salinidade que define estuário estratificado, parcialmente e completamente misturado é resultante desta turbulência.

Abraham (1980), mostrou que em estuários completamente misturados a turbulência é primariamente gerada na fronteira do mesmo e em estuário estratificados a turbulência é gerada na interface (Dyer, 1997).

### 3.7. Tempo de Residência

O tempo de residência (ou de renovação) da água no interior do estuário é definido como o tempo necessário para que a água doce proveniente do rio chegue ao mar. O tempo de residência da água doce no estuário pode ser calculado como a razão entre o volume de água doce existente no interior do estuário e o caudal do rio. O cálculo do tempo de residência a partir de dados de campo requer o conhecimento da distribuição espacial de salinidade, e em alguns casos a suposição de que toda a água doce existente no interior do estuário é proveniente do rio e que a distribuição de salinidade não dependia do tempo na altura em que foi medida.

O tempo de residência da água no interior do estuário permite a deposição da matéria particulada e o consumo de grande parte dos nutrientes descarregados directamente pelo rio ou provenientes da mineralização da matéria orgânica depositada nos sedimentos, (Disponível em [http://www.estuarios/importancia\\_dos\\_estuarios.com](http://www.estuarios/importancia_dos_estuarios.com)). O tempo de residência  $T = V_f / R$  onde  $V_f$  é a quantidade total de água do rio acumulada em o estuário ou numa secção do mesmo e  $R$  é o escoamento do rio. O tempo de residência varia rapidamente com menor variação do escoamento do rio, e varia lentamente com maior variação do escoamento do rio.

Vários são os modelos idealizados para o cálculo da taxa na qual a água do rio é descarregada de um estuário, e por esse meio estimar a taxa de remoção de poluentes introduzidos no estuário. Mais adiante são apresentados métodos e modelos para o cálculo de tempo de residência propostos em Dyer, (1997) e Lauff, (1967). Neste caso é usada a água doce como sendo o determinante.

### 3.7.1 Método de Fração de Água Doce

Consideremos:

R como sendo o caudal ou fluxo de água doce;

F o volume total de água doce acumulada no estuário;

$S_0$  a salinidade da água na boca do estuário, disponível devido a mistura;

S a salinidade em qualquer ponto dentro do estuário;

A fração de água doce contida nesse segmento do estuário é dada por:

$$f_i = \frac{S_0 - S_i}{S_0} \quad (10)$$

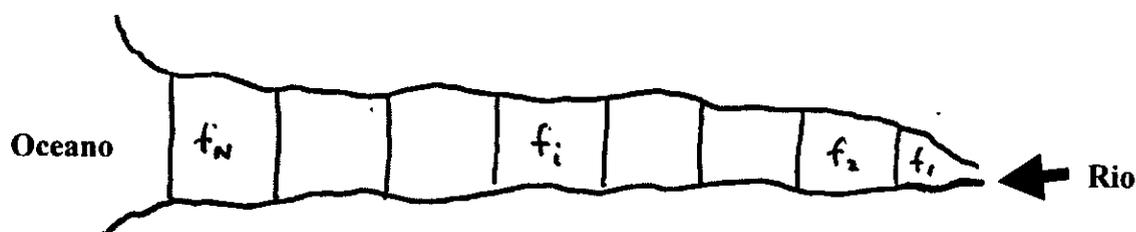


Figura 08: Representação esquemática de um estuário dividido em segmentos.

Fonte: Apontamentos de Oceanografia Costeira, (2003)

$$F_i = f_i * d_i$$

A quantidade de água doce acumulada é dada pela expressão abaixo obtendo-se F por uma integração numérica:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i d_i \quad (11)$$

Assumindo um estado de equilíbrio dinâmico, então R também representa a taxa de água doce que pode ser removida do estuário. Sendo assim, o tempo de remoção t é dado por:

$$t = \frac{F}{R} \quad (12)$$

Metade deste tempo é por vezes considerado como sendo metade de tempo de mistura do estuário. O tempo de residência calculado nestes termos, pode ser aplicado rigorosamente para um poluente se este for introduzido no estuário do mesmo modo que a água doce. Portanto, se o poluente for introduzido noutra parte do estuário, o tempo de residência deste pode ser diferente.

### 3.7.2 Modelo de duas Camadas

Neste modelo assume-se que a troca de água entre o estuário e o mar é devida advecção, sendo desprezada a difusão horizontal. Uma ilustração esquemática pode-se ver na figura 09 abaixo:

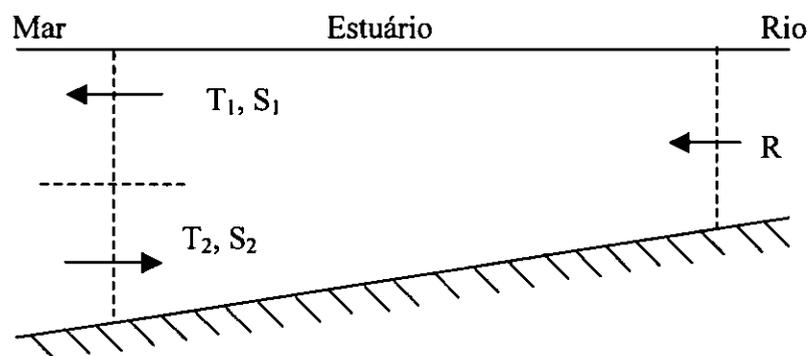


Figura 09: Modelo de duas camadas de troca de água entre um estuário e o mar. Fonte: LAUFF, (1967).

Da figura acima consideremos:

$V_1$  - Volume de água transportada na camada superficial;

$S_1$  - Salinidade da água que sai;

$V_2$  e  $S_2$  as quantidades correspondentes para a água que entra da camada subsuperficial;

Então expressando as condições de continuidade da água e do sal respectivamente tem-se:

$$V_1 - V_2 = R \quad (13)$$

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad (14)$$

Sendo assim:

$$V_1 = \frac{S_2 R}{S_2 - S_1} \quad \text{e} \quad V_2 = \frac{S_1 R}{S_2 - S_1} \quad (15)$$

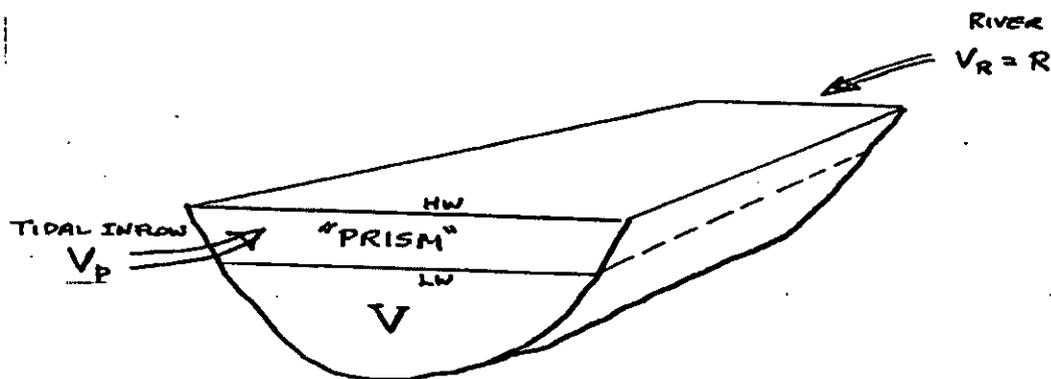
Se as áreas da secção transversal das duas camadas são conhecidas, a velocidade média pode ser calculada. Se  $V$  for o volume total contida no estuário, o tempo residencial será dado por:

$$t = \frac{V}{V_1} = \frac{V(S_2 - S_1)}{S_2 R} \quad (16)$$

Neste caso, supoe-se que toda a água que entra na camada inferior  $R$  é completamente misturada com a água dentro do estuário antes de ser removida. Se o poluente acima referido tiver uma densidade menor que a densidade da água do estuário, este poderá permanecer na camada superior e ser removido do estuário muito rapidamente.

### 3.7.3 Métodos de Segmentação e de Prisma de Maré

Os dois métodos acima descritos, fazem o uso das observações de salinidade e o fluxo do rio e não consideram o movimento das marés. Se estes estiverem presentes, é considerado o método de prisma de marés, podendo ser aplicado para as condições médias sobre um ou mais períodos de maré, admitindo implicitamente os efeitos das marés nos processos de troca, como ilustra a figura 10 abaixo.



**Figura 10:** Esquema de um prisma de marés

Fonte: Apontamentos de Oceanografia Costeira, (2003)

Neste método, assume-se que toda a água que entra no estuário durante a maré enchente, mistura-se completamente com a água do estuário e o volume do prisma é igual ao volume da água do mar e o volume do escoamento do rio. Na maré vazante, o mesmo volume de água é removido e a água doce contida no estuário é igual ao incremento do escoamento do rio.

Se:

$V_p$  - for o volume total do estuário no nível baixo da água;

$V_0$  - for o volume de água que entra na maré enchente (volume entre marés);

$T$  - período de maré;

Então, uma fração  $\frac{V_p}{V_0 + V_p}$  do volume médio de água é removida em cada maré, sendo assim o

tempo de residência  $t$  nos períodos de maré é dado por:

$$t = \frac{V_0 + V_p}{V_p} * T \quad (17)$$

Este método só pode dar um limite inferior ao tempo de residência, porque a suposição de que em cada maré a água é completamente misturada, não pode ser justificada.

Ketchum em (1951), modificou o método aproximado de prisma de maré, dividindo o estuário em segmentos; os comprimentos são determinados pela "excursão" das partículas de água durante a maré. A segmentação, assume que na maré enchente, o volume baixo de maré de um segmento desloca-se completamente do segmento seguinte em direcção à terra, tornando o volume alto da maré naquele segmento, ou o comprimento de cada segmento à excursão de cada maré. Assume-se ainda que há mistura completa dentro de cada segmento e define-se uma taxa de troca, (Lauff, 1967; Dyer, 1997).

Se:

$V_n$  - é o volume baixo da maré do n-ésimo segmento;

$P_n$  - o volume correspondente entre marés;

$R$  - a descarga do rio por cada período de maré;

A taxa de troca é definida como sendo:

$$r_n = \frac{P_n}{P_n + V_n} \quad (18)$$

Pode-se mostrar que o volume de água acumulada no segmento é:

$$Q = \frac{R}{r_n} \quad (19)$$

O tempo de residência em cada segmento pode ser calculado dividindo o volume de água doce em cada segmento pela descarga do rio por maré, e a soma de todos os segmentos dará o valor do tempo de residência do estuário, como se pode ver na expressão abaixo:

$$t_n = \frac{V_n}{R} \quad (20)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{V_n}{R} \quad (21)$$

Onde  $n$  é o número de segmentos.

## CAPÍTULO IV

### 4. Análise de Resultados, Conclusão Limitações e Recomendações, Ref. Bibliográfica

#### 4.1 Análise e Discussão dos Resultados

Para o cálculo do tempo de renovação da água no estuário do Incomati, foram considerados dois dos três métodos propostos, nomeadamente modelo de fracção de água doce e prisma de marés, dado que o modelo de duas camadas só se aplica para estuários estratificados (cunha salina). Portanto, o estuário do Incomati é parcialmente misturado transitando para completamente misturado.

**Tabela 02: Dimensões do Estuário;**

Nº da Secção	Comp. (m)	Larg. Média(m)	Prof. Média (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	2000	3874	1.90	$1.742*10^7$
2	2455	2500	2.40	$1.473*10^7$
3	2273	1572	1.00	$3.573*10^6$
4	2273	788	1.55	$2.776*10^6$
5	2182	666	2.60	$3.764*10^6$
6	2272	470	3.20	$3.460*10^6$
7	2727	520	2.20	$3.176*10^6$
8	2455	364	3.20	$2.860*10^6$
9	2727	273	3.30	$2.449*10^6$
10	2636	319	5.10	$4.305*10^6$
11	2273	455	5.30	$5.512*10^6$

**Tabela 03: Dimensões Médias do Estuário;**

Comprimento Total do Estuário (m)	26000
Volume Total da Água no Estuário (Mm <sup>3</sup> )	61.30
Largura Média do Estuário (m)	1072.8
Profundidade Média do Estuário (m)	3.0

### **Resultado dos Modelos:**

#### **➤ Modelo de Fracção de Água Doce**

Neste modelo foi necessário determinar o volume do estuário. Para a determinação do volume, o estuário foi dividido em secções e enumerado, figura 11 em anexos, determinando-se assim as dimensões de cada secção como se pode ver na tabela 02 acima.

Para determinar a profundidade média de cada secção, foi considerada a figura 12 em anexos que representa o perfil do fundo do estuário sendo posteriormente medida a profundidade. Da tabela 2 acima, somando-se os volumes parciais de cada secção obteve-se o volume total do estuário, que é de  $6.13 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ , a profundidade média é de 3m e o comprimento é de 26000 m apresentados na tabela 03 acima.

Também foi determinado a fracção de água doce contida em cada secção e a respectiva quantidade de água doce acumulada, usando para tal as equações 10 e 11. Na tabela 5 em anexos são apresentados dados dos escoamentos do rio usados para o cálculo do tempo de residência.

Na tabela 04 abaixo são apresentados os valores médios da fracção (f) de água doce contido em cada segmento, o escoamento (R) do rio para cada mês de observação, a quantidade (F) de água doce acumulada no estuário e os respectivos tempos de renovação (t) da água:

**Tabela 04: Fracção de água doce e tempo de renovação da água no Incomati;**

	30/Abril/02	29/Junho/02	02/Agosto/02	22/Março/03	05/Maio/03	12/Junho/03
$f_1(\%)$	06.0	04.9	02.6	03.8	01.4	01.1
$f_2(\%)$	27.7	16.1	06.8	02.3	02.0	02.1
$f_3(\%)$	51.7	26.6	28.9	02.9	07.5	03.3
$f_4(\%)$	56.0	39.1	40.1	03.0	15.4	13.1
$f_5(\%)$	80.7	55.4	34.5e	07.3	32.5	30.6
$f_6(\%)$	88.8	74.3	49.4e	11.2	42.5	42.4
$f_7(\%)$	93.4	91.7	64.2	15.6	51.4	51.0
$f_8(\%)$	91.1e <sup>4</sup>	96.7	69.2	25.5	66.7	65.4
$f_9(\%)$	92.3e	94.2e	66.7e	33.8	75.9	73.3
$f_{10}(\%)$	91.7e	95.5e	81.6	35.1	83.0	83.3
$f_{11}(\%)$	92.0e	94.8e	96.4	54.5	88.1	86.9
$\Sigma F(Mm^3)$	31.32	27.11	21.01	7.951	17.72	17.24
$R(m^3/s)$	29.08	17.28	16.9	14.56	12.02	12.4
$t(dias)$	12	18	14	6	17	16

#### ► Modelo de Prisma de Marés

Neste modelo, foi considerado o período das marés como sendo igual à  $12,42hr = 44.712s$ , uma vez que as marés no estuário do rio Incomati são de carácter semi-diúrno. Foi necessário determinar o volume de água que entra em cada período de maré.

Para o tal, partindo dos valores da amplitude da maré prevista na maré viva e maré morta, e a amplitude de maré observada na estação 22, foi possível desenhar o prisma e determinar o volume desse prisma para a maré viva e maré morta. Fazendo-se a diferença destes dois volumes determinou-se o volume  $V_p$  de água que é removido do estuário em cada período de maré.

<sup>4</sup> e- Valor estimado

Com base no volume  $V_p$  de água removida do estuário em cada período, determinou-se o volume  $V_0$  do estuário no nível mais baixo subtraindo o volume total do estuário pelo volume  $V_p$ ; posteriormente determinou-se o tempo de renovação da água com base na equação (17). Na tabela 05 abaixo são apresentados os resultados dos cálculos e do tempo de residência ( $t$ ) usando o modelo de prisma de maré.

**Tabela 05: Tempo de residência da água a partir de modelo de prisma de marés;**

	Março/02	Junho/02	Janeiro/03
Vol. da água na Maré Viva ( $Mm^3$ )	36.45	31.30	36.45
Vol. da água na Maré Morta ( $Mm^3$ )	18.45	18.61	2.463
$V_p$ ( $Mm^3$ )	18.00	12.69	33.99
$V_0$ ( $M m^3$ )	43.30	48.61	27.31
Fracção de água removida (%)	0.034	0.048	0.018
Tempo de Renovação $t$ (dias)	2	2.5	1

## 4.2 Conclusão, Limitações e Recomendações

### Conclusão

Dos resultados obtidos neste trabalho usando os métodos de fracção de água doce e prisma de marés que são aplicados para estuários parcialmente e completamente misturados pode-se concluir o seguinte:

- Há renovação da água no estuário do Incomati, e que o tempo mínimo de renovação da água varia de 1 a 2.5 dias e o tempo máximo varia de 6 a 17 dias;
- O tempo ideal de renovação da água no Incomati a ser considerado é de 17 dias, pelo facto de que, para o cálculo deste tempo foi usado o modelo de fracção de água doce que toma em consideração todos os factores/parâmetros físicos que condicionam o processo de mistura nos estuários;
- Tratando-se da qualidade da água, conclui-se que o método de prisma de marés é o mais eficaz uma vez que as marés renovam a água no estuário em menor tempo, dado que a hidrodinâmica no Incomati é dominada pelas marés;
- Os factores que contribuem para a renovação da água no estuário são a hidrodinâmica do próprio estuário, os processos de mistura, que são condicionados pelos efeitos das marés e o escoamento do rio, cuja contribuição do rio é inferior em relação ao efeito das marés;

### **Limitações**

Na realização do presente trabalho, foram encontradas limitações que adiante apresentamos:

- Para traçar o perfil do fundo do estuário foram considerados dados obtidos do CTD (instrumento usado para medir salinidade, temperatura e profundidade), mas que nalguns casos o instrumento pode não ter atingido o fundo;
- Para a determinação do volume total do estuário fizeram-se aproximações;
- Na determinação do prisma de maré, foi considerado que a diminuição da altura da maré ao longo do estuário é linear;
- Dificuldades na delimitação do estuário por não se saber o ponto limite até onde se faz sentir o efeito das marés;
- Falta de dados nalgumas secções, que para completar os dados das secções foi necessário estimar;
- O modelo de prisma de marés assume que toda a água que entra na maré enchente mistura-se completamente com a água do estuário e o volume da água do mar é igual ao volume do prisma de maré, e na maré vazante esta mesma água é totalmente removida. De facto, não há mistura completa da água no estuário devido as marés porque nem sempre o efeito delas se faz sentir em todo o estuário;

### **Recomendações**

- A continuação de estudos nesta área, poderá de certo modo ajudar na melhoria dos resultados obtidos, sobretudo se for analisada a influência da época do ano, no tempo de renovação da água no estuário do rio Incomati;
- Dado que os estuários constituem um habitat vital para espécies marinhas e são importantes na filtração de sedimentos e poluentes que provem dos rios, o autor recomenda às entidades gestoras das barragens ao longo do rio Incomati a observância dos caudais mínimos necessários para que o tempo de renovação da água seja adequado para a manutenção da qualidade da água;
- A determinação do tempo mínimo de renovação da água para a manutenção da qualidade da água no estuário do Incomati, constituiria um marco importante de investigação nesta área, com que então o autor sugere um estudo de género nos futuros trabalhos;
- Os resultados deste trabalho são uma análise preliminar da estimativa do tempo de renovação da água no estuário do rio Incomati, com que então, não se pretende que estes sejam uma exposição completa e exaustiva de conclusões a serem tomados em conta, mas sim uma iniciação sobre a matéria.

#### 4.3 Referência Bibliográfica

- ❖ BAIRD, D.; WINTER, P. E. D. & WEND, G., 1987. The flux of particulate material through a well-mixed estuary. Continental Shelf Research, Vol. 7 (11/12).
- ❖ DAY Jr., J. W.; HALL, C. A. S.; KEMP, W. M. & YAÑEZ-ARANCIBIAS, A. 1989. Estuarine Ecology. John Wiley & Sons, inc, New York.
- ❖ DUXBURY, Alyn C.; DUXBURY Alison B. 1997 An Introduction to the World's Oceans. 5<sup>th</sup> edition WCB/McGraw-Hill, USA.
- ❖ DYER, K. R., 1997. Estuaries. A Physical Introduction 2<sup>nd</sup> John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 IUD, England. Pp195.
- ❖ DYER, K. R., 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: Physical Process in Estuaries. J. DRONKERS & W. V. LEUSSEN (Eds). Spring-Verlag, New York.
- ❖ FRENCH, J. R.; CLIFFORD, N. J. & SPENCER, T., 1993. High frequency flow and suspended sediment measurements in a tidal wetland channel. In: Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport. N. J. Clifford; J. R. French & J. Hardisty (Eds). John Wiley & Sons Ltd.
- ❖ GROEN M.; October-1993 Report-Rapid Assessment Technique for Salt Intrusion in Alluvial Estuaries Steady State Model. In: Case Study Incomati Estuary. Maputo.
- ❖ HOGUANE, António M.; MOTTA, H.; PERREIRA, Marcos A. M. 2002 Proceedings of the II National Conference on Coastal Zone Research U.E.M, Maputo.
- ❖ [Http/WWW. Estuários/Importância dos Estuários](http://www.estuários.com). Com
- ❖ [Http/WWW. Limites de um Estuário](http://www.limites.com). Com
- ❖ JONGE, V. N. & VAN BEUSEKON, J. E. E., 1995. Wind-and-tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the EMS estuary. Limnol Ocenogr., vol 40 (4).
- ❖ KENNISH, M. J., 1986. Ecology of Estuaries. Physical and Chemical aspects, vol I.
- ❖ KJERFVE, B., 1990. Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove Ecosystems. UNESCO/UNDF Regional Project "Mangrove Ecosystems in Asia and Pacific" (RAS/78/002 e RAS/86/120).
- ❖ KJERFVE, B.; PROEHL, J. A.; SCHWING, F. B.; SEIM, H. E. & MAROZAS, M., 1982. Temporal and Spatial Considerations in Measuring Estuarine Water Fluxes. In: Estuarine Comparations. V. S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York.

- ❖ KJERFVE, B. & McKELLAR, Jr., H. N., 1980. Time series measurements of estuarine material fluxes. In: Estuarine Perspectives. U V. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York.
- ❖ KJERFVE, B. & WOLANDER, 1988. Sampling Optimization for Studies of Tidal Transport in Estuaries. American Fisheries Society Symposium, Vol 3.
- ❖ KNOX, G. A. 1986. Estuarine Ecosystems: A Systems approach, Vol I.
- ❖ LAUFF, George H., 1967. Estuaries. American Association for the Advancement of Science, Washington, D. C.
- ❖ LEUSSEN, W. V. & DRONKERS, J., 1988. Physical Process in Estuaries. An Introduction in: Physical Processes in Estuaries. J. DRONKERS & W. V. LEUSSEN (Eds). Spring-Verlag, New York.
- ❖ LEUSSEN, W. V., 1988. Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs. A Review. In: Physical Process in Estuaries. J. DRONKERS & W. V. LEUSSEN (Eds). Spring-Verlag, New York.
- ❖ McCORMICK, J. M.; THIRUVATHUKAL, J. V. 1981. Elements of Oceanography. 2<sup>nd</sup> edition, USA.
- ❖ MIRANDA, L. B. 1996. Cinemática e Dinâmica de Estuários. Apostila do curso de Pós Graduação em Oceanografia Física do Instituto Oceanográfico de São Paulo, Brasil.
- ❖ MITSCH, W. J. & GOSSELINK, J. G. 1986. Wetlands. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- ❖ NICHOLS, M. M., 1986. Effects of Fine Sediment Resuspension in Estuaries. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. A. J. Mehta (Ed.), Spring-Verlag, New York.
- ❖ PICKARD, George, L.; EMERY, William J. 1990 Descriptive Physical Oceanography An Introduction. Anthony Rowe Ltd, Great Britain.
- ❖ WARD, L. G., 1981. Suspended-material transport in Marsh tidal Channels, Kiawah Island, South Carolina. Marine Geology, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Vol 40.

**ANEXOS**

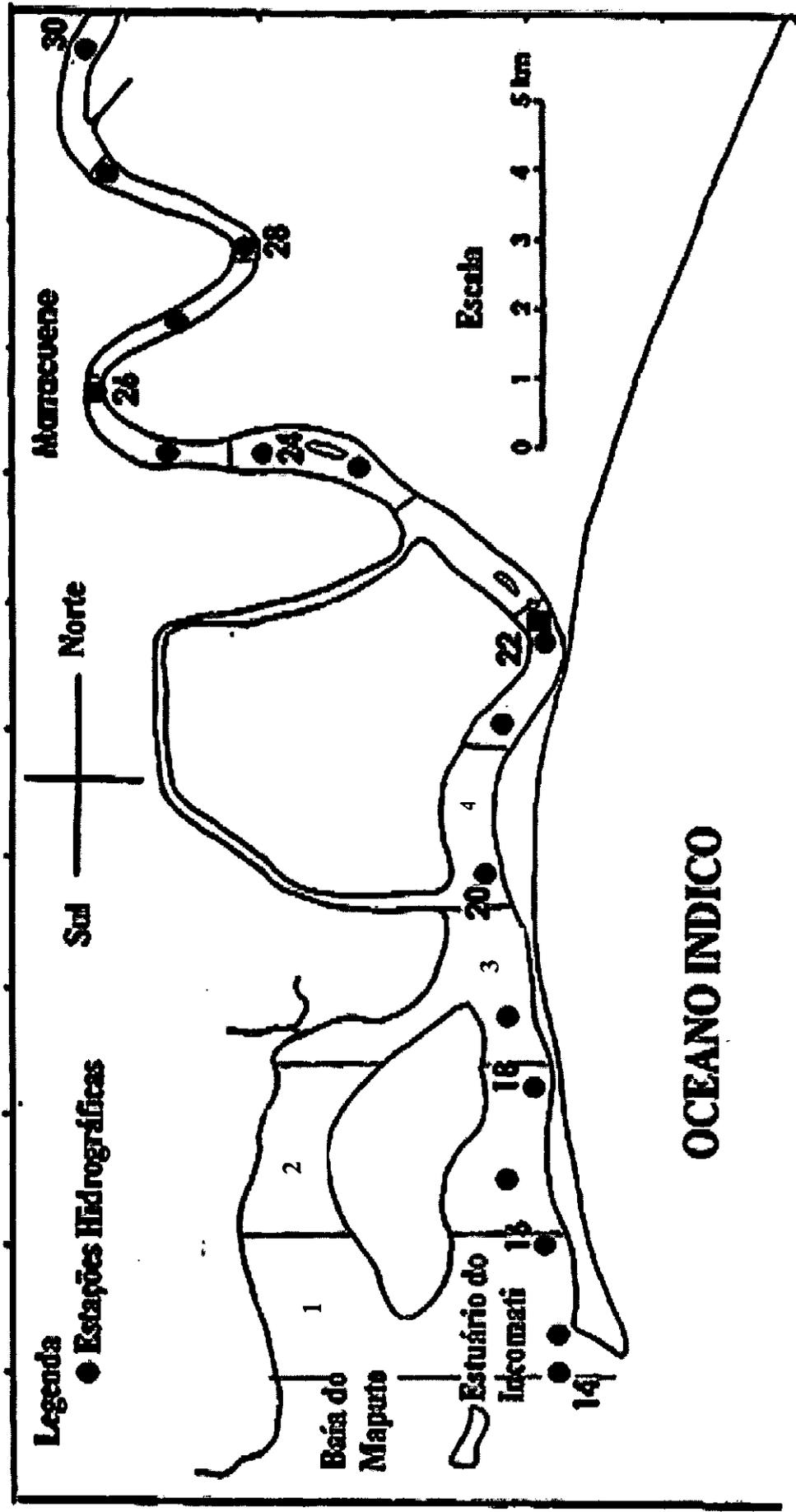


Figura 11: Figura ilustrativa das Estações de observação marcadas no estuário do rio Incomate. Fonte: Hogueane et al., 2002

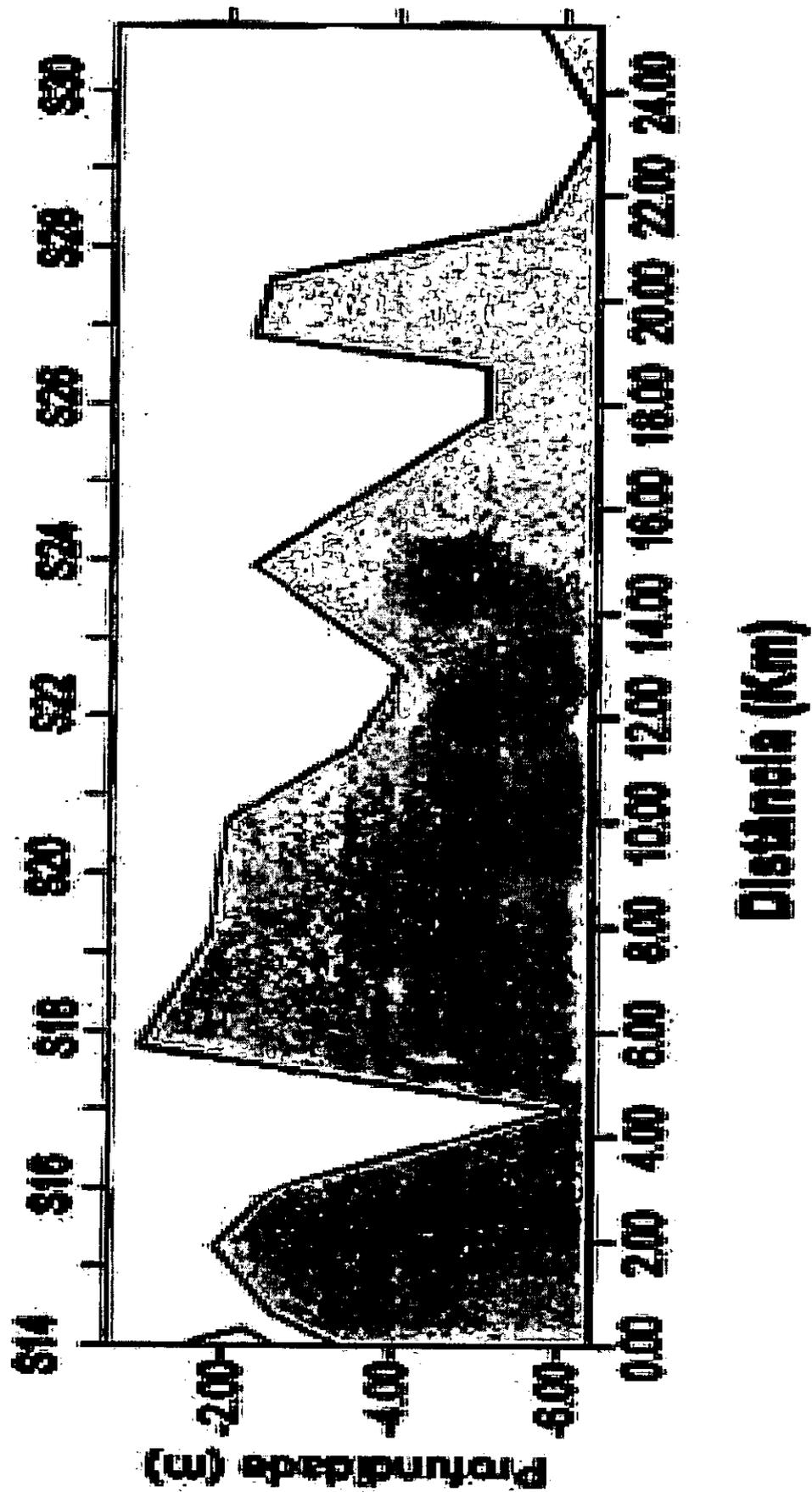


Figura 12: Perfil do fundo do Estuário do Rio Incomati. Fonte Macuiane (2003)

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1983										0.01	63.72	44.52
1984	172.29	561.53	63.76	67.25	21.88	14.78	35.74	23.72	14.57	11.31	43.72	59.86
1985	34	517	121.67	39.75	26.05	18.32	13.77	7.17	7.36	2.27	18.94	11.87
1986	34.52	64.81	27.55	61.31	31.09	10.2	5.39	2.83	1.82	1.19	2.37	3.5
1987	41.82	14.72	25.69	28.54	3.63	2.07	1.69	1.51	4.44	60.55	41.26	107.03
1988	78.95	62.39	195.54	45.69	16.99	7.37	10.63	3.83	19.66	36.78	18.89	26.54
1989	43.78	159.5	145.75	22.25	14.4	18.54	9.54	6.45	4.29	3.53	41.52	147.39
1990	23.12	42.92	40.61	31.58	16.44	8.5e <sup>1</sup>	6.54	5.11	4.62	6.78	3.78	19.66
1991	100.06	179.82	124.95	60.67	32.6	27.16	19.39	10.31	7.65	2.9	14.93	8.98
1992	5.55	7.16	2.91	1.08	2.95	4.59	4.17	4.71	3.94	2.31	5.23	42.64
1993	19.55	7.21	95.13	10.8	4.63	3.64	3.62	1.9	2.68	2.49	2.53	3.68
1994	6.23	4.12	3.31	3.66	3.75	3.68	3.83	3.99	4.84	5.51	5.19	7.43
1995	6.46	10.53	4.57	5.47	5.25	4.95	4.7	4.58	4.15	2.88	2.78	27.76
1996	193.34	675	547.69	143.69	95.55	61.87	52.65	45.35	29.99	28.77	26.89e	50.58
1997	46.36	42.26	38.16	34.06	29.95	25.85	21.83	14.91	25.47	13.48	22.96	57.88
1998	45.91	22.47	35.19	12.22	8.93	8.12	7.18	6.58	6.49	26.21	59.46	227.73
1999	154.43	366.27	187.68	60.81	34.54	27.27	29.33	9.52	7.98	27.35	33.65	86.74
2000	559.28	1654.83	957.67	680.92	346.56	254.59	142.8	96.06	97.46	88.84	252.94	349.36
2001	149.21	149.78	105.93	92.02	55.65	28.75	21.29	17.89	15.98	20.01	199.83	419.48
2002	140	95.77	32.43	29.08	21.08	17.28	16.9	15.56	15.37	15.76	19.15	22.67
2003	21.88	15.27	14.56	12.02	12.4	10.5						

Tabela 06: Dados de caudais em m<sup>3</sup>/s na estação hidrométrica de Magude (E-43). Registro de 20 anos (1983-2003). Fonte: DNA

<sup>1</sup> Valor estimado.