



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

**ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS**

Monografia para obtenção do grau de licenciatura em Geologia Marinha

*Aplicação dos diagramas de Hjulstrom e Pejrup no estudo da evolução das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais*

**Autor:**

Adérito Felisberto Maússe



**ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS**

Monografia para obtenção do grau de licenciatura em Geologia Marinha

*Aplicação dos diagramas de Hjulstrom e Pejrup no estudo da evolução  
das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais*

**Autor:**

Adérito Felisberto Maússe

**Supervisor:**

Msc. César António Mubango Hogueane

---

Quelimane, Novembro de 2017

## **Dedicatória**

Em primeiro lugar dedico esse trabalho a mim mesmo pela força de vontade, persistência, paciência e dedicação em adquirir conhecimento para elaboração do presente trabalho de pesquisa, a minha mãe **Felismina Langa**, meus irmãos (Eufrásia Maússe, Teófilo Maússe, Epifânia Maússe, Neusa Maússe, Leotéria Langa e Felicidade Maússe) sobrinhos (Tanselly, Marley, Keyssel e Cindy), pelo amor incondicional, apoio moral e confiança que têm depositado em mim durante toda minha carreira estudantil.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradecer a Deus todo poderoso, pela concepção da vida e por ter me proporcionado protecção, força, saúde e inspiração para que eu pudesse evoluir intelectualmente e realizar o presente estudo.

Agradeço de forma profunda e imensurável a minha querida mãe Felismina Vasco Langa, ao meu pai Felisberto Maússe e meus queridos irmãos Eufrásia Maússe, Teófilo Maússe, Epifânia Maússe, Neusa Maússe, Leotéria Langa e Felicidade Maússe pelo amor, protecção, apoio moral e financeiro durante o período da minha formação.

Agradeço imensamente ao meu supervisor Msc. César Hogueane e a co-supervisora dr<sup>a</sup>. Carlota Alves pela compaixão, paciência, apoio moral, dedicação e conhecimento científico transmitido durante a elaboração do presente estudo. À Dr<sup>a</sup>. Valera Dias pela colaboração para realização das análises das amostras na UEM-Maputo.

Agradeço ao corpo docente da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras pelos conhecimentos científicos, deontológicos e sociais transmitidos durante o período da minha formação.

Agradeço aos membros do laboratório de sedimentologia do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane, especialmente ao Dr. Guenha, Dr. Emídio, à Dr<sup>a</sup>. Percina e ao Sr. Leonel, pela paciência e dedicação durante as análises das amostras.

Agradeço aos colegas e amigos, Flávio Jeje, Alberto Sibie, Candido Timba, Ernesto Tembe, Félix Sodasse pelo apoio durante a colecta das amostras, especialmente ao Erasnes que foi meu braço direito desde o início até fim deste trabalho. Ao Sr. Máquina e ao colega Nhacudima pela ajuda durante a concepção do testemunho de colecta de sedimentos. Ao colega Jonas Chambo pela ajuda na organização do presente trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas da turma de Geologia Marinha do ano 2014, Balbina, Flávio, Matola, Lourindo, Nilton, Guzia, Erasnes, Alberto, Camacho, Cécilio, Mércia, Catarina, Bonga, Germano, Norton, Agostinho, Xieo, Paulo, Edson, Raimundo, Jordão, Sérgio, Lucas, Fernando, Nelson pela amizade, cumplicidade, momentos de alegria e conhecimento transmitido durante os 4 anos de formação. A todos da turma de Oceanografia, Química, especialmente ao Fernando

Cachepe pela presença, apoio moral e compaixão, e Biologia do ano 2014, especialmente ao Orlando Macicame pelo apoio, incentivo e amizade.

Agradeço a Tia Saidia, Mingai Medida, Xiluva Sagra, Jesimiro Tamele, pelo amor, carinho, hospedagem, protecção e a presença nos momentos felizes e tristes ao longo dos 4 anos de formação.

Agradeço de forma especial ao Jesimiro pela amizade, interação académica, apoio moral e pelos momentos super felizes vividos, ao Amade José Amade pela amizade, motivação e troca de experiência independentemente da distância que nos separa, à Erica Lena Cumbane pelo apoio, afecto, incentivo, carinho e pelos momentos vividos.

Agradeço ao Adriano Muhate, Dinis, Jamisse, Abdul Mugabe, Tony e Custódio pelo incentivo e apoio.

Agradeço a todos que não foram mencionados, que de certa forma colaboram, até mesmo com palavras simples de moral e conforto.

## **Declaração de honra**

Eu, Adérito Felisberto Maússe declaro por minha honra que a pesquisa intitulada Aplicação dos diagramas de Hjulstrom e Pejrup no estudo da evolução das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais, nunca antes foi publicada e constitui fruto do meu esforço e empenho originado por uma pesquisa científica, tendo sido obedecidas todas as regras de investigação, e devidamente indicadas as fontes consultadas.

O autor:

---

(Adérito Felisberto Maússe)

## **Resumo**

A presente pesquisa teve como objectivo principal descrever a variação das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais num passado geológico recente, através da conjugação dos parâmetros estatísticos granulométricos, Diagramas de Hjulstrom (1935) e Pejrup (1988). As amostras de sedimentos foram colectadas em dois pontos ao longo do canal estuarino com recurso a testemunhos de sedimentos adaptados a partir de tubos de PVC, onde para obtenção dos resultados apresentados, as mesmas foram submetidas a análises granulométricas no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane (UEM) usando as técnicas de crivagem e pipetagem. No geral, a classe granulométrica de areia foi a que apresentou maior domínio na distribuição granulométrica em profundidade de ambos testemunhos, governada pela presença de areia muito fina. Embora tenha se observado variações ligeiras nas velocidades das correntes estimadas a partir do Diagrama de Hjulstrom (1935), a análise do Diagrama de Pejrup (1988) permitiu classificar o Estuário dos Bons Sinais como um ambiente altamente hidrodinâmico ao longo do tempo abrangido por este estudo.

**Palavras-chaves:** Hidrodinâmica estuarina; Diagrama de Hjulstrom; Diagrama de Pejrup; Estuário dos Bons Sinais.

## **Abstract**

The present study addresses the variations of the energetic conditions of Bons Sinais Estuary through the very recent past geologic time using statistical parameters of sediments and the combination of Hjulstrom (1935) and Pejrup (1988) Diagrams. The sediment core samples were collected in two different points along the estuary, and were further analyzed in terms of its grain size distribution along the core in the Laboratory of Sedimentology of the Department of Geology of the Eduardo Mondlane University. The results of this study shows that the most dominant sediment is very fine sand. Although the velocity of the currents estimated by the Hjulstrom Diagram (1935) shows slight variations, the analysis of the Pejrup Diagram (1988) allowed us to classify the BonsSinais Estuary as an Highly Hidrodinamic environment.

**Key-words:** Estuarine Hydrodynamics; Hjulstrom Diagram; Pejrup Diagram; Bons Sinais Estuary.

### Tabela de abreviaturas

<b>Simbolo</b>	<b>Significado</b>
%	Porcentagem
$\sigma$	Desvio padrão
$\Phi$	Phi
°C	Grau célsius
BP	Bairro dos Pescadores
cm	Centímetros
cm/s	Centímetros por segundos
ESCMC	Escola Superior Ciências Marinhas e Costeiras
g	Grama
GPS	Sistema de Posicionamento Global
h	Hora
km	Quilómetro
m	Metro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mz	Diâmetro Médio
P	Ponte
PVC	Policloreto de Vinil
UEM	Universidade Eduardo Mondlane

## Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de distribuição de fácies estuarina e o grau de influência das correntes fluviais e de maré (Fonte: Silva, 2012).....	6
Figura 2: Diagrama de Hjulstrom (Fonte: Yokoyama, 2012).....	10
Figura 3:a) Diagrama de Shepard (adaptado de Pejrup, 1988); b) Diagrama de Pejrup (Fonte: Pejrup, 1988).....	12
Figura 4: Localização da área de estudo (Fonte: Google earth) .....	13
Figura 5: a) GPS Astro 60, equipamento usado para georreferenciar os pontos de amostragem; b) Colecta das amostras com recurso ao testemunho de sedimentos no fundo do canal do Estuário dos Bons Sinais .....	15
Figura 6: a) Corte dos tubos de PVC; b) Amostras de sedimentos prontas para o confeccionamento em sacos plásticos.....	16
Figura 7: a) Balança XS-210 com precisão de 0,001 g, usada para pesar as amostras; b) Estufa WT Binder, usada para secar amostras; c) Oxidação da matéria orgânica. ....	17
Figura 8: Peneiras granulométricas, usadas para a crivagem das amostras .....	18
Figura 9: Colecta das fracções granulométricas dos sedimentos pelíticos (silte e argila) .....	19
Figura 10: Distribuição granulométrica total em profundidade -Testemunho P .....	21
Figura 11: Distribuição granulométrica total em profundidade -Testemunho BP.....	22
Figura 12: Distribuição granulométrica em intervalos de 10 cm de profundidade- Testemunho P. ....	24
Figura 13: Distribuição granulométrica em intervalos de 10 cm profundidade- Testemunho BP. ....	24
Figura 14: Estimativa da velocidade das correntes com base no Diagrama de Hjulstrom - Testemunho P.....	27
Figura 15: Estimativa da velocidade das correntes com base no Diagrama de Hjulstrom - Testemunho BP.....	27
Figura 16: Diagrama triangular, modificado de Pejrup (1988) com a representação das amostras dos testemunhos P e BP colectadas no Estuário dos Bons Sinais.....	29

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Comportamento do diâmetro médio e desvio padrão em profundidade dos testemunhos P e BP.....	26
Tabela 2: Coordenadas geográficas dos pontos de colecta de sedimentos dos testemunhos P e BP.....	39
Tabela 3: Granulação, profundidade de colecta e tempo utilizados na pipetagem. ....	39

## Índice

Dedicatória.....	i
Agradecimentos .....	ii
Declaração de honra.....	iv
Resumo .....	v
Abstract.....	vi
Tabela de abreviaturas .....	vii
Lista de Figuras.....	viii
1. Introdução .....	1
1.1. Objectivos.....	3
2. Revisão da Literatura.....	4
2.1. Contextualização do termo Estuário .....	4
2.2. Dinâmica e fácies sedimentares em estuários .....	5
2.3. Parâmetros estatísticos .....	6
2.3.1. Diâmetro Médio (Mz).....	7
2.3.2. Desvio padrão ( $\sigma$ ) .....	7
2.4. Erosão, Transporte, e Deposição de sedimentos- Diagrama de Hjulstrom (1935).....	8
2.5. Hidrodinâmica com base no Diagrama de Pejrup (1988) .....	10
3.1. Área de estudo.....	13
3.2. Materiais.....	14
3.2.1. Trabalho de Campo.....	14
3.2.2. Trabalho de Laboratório .....	14
3.3. Métodos.....	14
3.3.1. Procedimento de campo e amostragem.....	14
3.3.2. Procedimento Laboratorial.....	15
3.4. Processamento e Análise dos dados .....	20
3.4.1. Distribuição granulométrica.....	20

3.4.2.	Análise dos parâmetros estatísticos .....	20
3.4.3.	Confecção de diagramas .....	20
4.	Resultados.....	21
4.1.	Caracterização granulométrica.....	21
4.2.	Análise dos parâmetros estatísticos.....	25
4.3.	Estimativa da velocidade das correntes com base no diagrama de Hjulstrom (1935) ...	26
4.4.	Classificação da Hidrodinâmica com base no diagrama de Pejrup (1988).....	28
5.	Discussão .....	30
5.1.	Caracterização granulométrica.....	30
5.2.	Parâmetros estatísticos e Velocidade média das correntes.....	31
5.3.	Hidrodinâmica inferida com base no diagrama de Pejrup .....	32
6.	Conclusão .....	34
7.	Recomendações .....	34
8.	Referências Bibliográficas.....	35
	Anexos .....	39

## 1. Introdução

A palavra estuário é derivada do adjetivo latim *aestuarium*, cujo significado é maré ou onda abrupta de grande altura, fazendo referência a um ambiente altamente dinâmico, com mudanças constantes em resposta às forçantes naturais (Miranda *et al.*, 2002). Entretanto, são considerados como ambientes de transição entre o continente e o oceano onde um ou vários rios encontram o mar, na qual a dinâmica e a distribuição das propriedades químicas, biológicas e sedimentares são controladas por processos hidrodinâmicos marinhos e continentais (Perillo, 1996). Do ponto de vista geológico são feições efêmeras, por serem ambientes propensos à deposição (Quaresma *et al.*, 2009).

A sua origem está associada a inundação dos vales na zona costeira, devido a subidas do nível relativo do mar (Dalrymple *et al.*, 1992), onde grande parte destes ambientes formaram-se durante o máximo transgressivo registado no Holoceno acerca de 15000 anos antes do presente (Walker e James, 1992).

A variação dos níveis energéticos em estuários assim como em outros ambientes deposicionais, envolvem ciclos de baixa e alta frequência que podem variar de escalas de tempo de segundos à anos, regidas pela acção das marés, ventos, regime fluvial e correntes (Uncles *et al.*, 1994), bem como à escalas de tempo de vários milhões de anos, regidas por forçantes de longo período de tempo tal como tectonismo e eustasia (Walker e James, 1992).

A evolução destes ambientes é marcada por variação textural no perfil estratigráfico (Paulo e Castro, 2001) e o estudo detalhado da textura do sedimento expressa pelo seu diâmetro permite a reconstituição das condições energéticas pelo facto desta componente reflectir, em grande medida, na característica dos processos hidrodinâmicos que actuaram durante o período de deposição dos sedimentos (Suguio, 1980).

O diagrama ternário triangular de Pejrup (1988) é comumente usado como ferramenta para o estudo da hidrodinâmica dos ambientes deposicionais, principalmente em estuários, devido a facilidade de representação gráfica, distinção precisa entre diferentes tipos de sedimentos e as características hidrodinâmicas nas quais os mesmos foram submetidos durante do processo de deposição (Dias, 2004).

Corrêa (2005) aplicou o diagrama de Pejrup associado a textura sedimentar para interpretar a hidrodinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA, onde o classificou espacialmente como sendo um ambiente com hidrodinâmica que varia de alta à baixa energia em diferentes trechos ao longo do estuário. Marcon e Corrêa (2011) aplicaram o diagrama de Pejrup para inferir sobre a evolução temporal da hidrodinâmica sedimentar dos Depósitos Quaternários da Região do Médio Alto Uruguai, onde as análises granulométricas associadas ao diagrama de Pejrup (1988) indicaram que a deposição dos sedimentos ocorreu sob regime de baixa energia.

No Estuário dos Bons Sinais já foram realizadas várias pesquisas de importância socioeconômica e científica para o país. Contudo há escassez de estudos referentes a sua geologia. António (2012) estudou a hidrodinâmica do Estuário dos Bons Sinais com recurso à instrumentos oceanográficos a uma escala temporal relativamente curta. Neste estudo, caracterizou-se as principais forçantes da hidrodinâmica do Estuário dos Bons Sinais, sem classificar e nem inferir sobre sua evolução temporal.

Desta forma, devido a escassez e importância da informação referente a evolução da hidrodinâmica, bem como pela falta de estudos ligados a área de geologia neste estuário, o presente estudo visa descrever a variação temporal das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais com base na distribuição do tamanho de sedimentos em profundidade, usando a conjugação dos parâmetros estatísticos granulométricos, diagramas de Pejrup (1988) e Hjulstrom (1935).

Vale destacar que o presente estudo, distingue-se de muitos realizados em ambientes estuarinos por fazer a conjugação dos diagramas de Hjulstrom (1935) e Pejrup (1988) como ferramenta para o estudo da evolução temporal da hidrodinâmica do Estuário dos Bons Sinais desde um passado geológico recente até o presente.

Estudos referentes a evolução temporal das condições energéticas com base na distribuição do tamanho das partículas sedimentares em ambientes deposicionais são de extrema importância, pelo facto de servirem como uma componente base na previsão dos processos actantes, em virtude da evolução no passado recente ser analisada numa perspectiva de compreensão da evolução futura (Frazão, 2003), onde a partir desta previsão tendo em conta os processos de erosão, transporte e deposição é possível adoptar medidas futuras de manutenção de canais portuários (Paulo, 2009) e instalação de obras de engenharia, bem como infra-estruturas, pois grande parte da concentração urbana e indústrias estão assentes nas proximidades de grandes estuários (Miranda *et al.*, 2002).

Além disso, pesquisas como estas, podem ser importantes para conhecer o papel da hidrodinâmica no controle da distribuição dos minerais em ambientes deposicionais, pelo facto dos mesmos estarem em grande instância associados aos sedimentos (Venkatramanan *et al.*, 2014).

## **1.1.Objectivos**

### **1.1.1. Objectivo Geral:**

- Descrever evolução temporal da variação das condições energéticas do Estuário dos Bons Sinais desde um passado geológico recente até o presente.

### **1.1.2. Objectivos Especificos:**

- Caracterizar o tipo e granulometria dos sedimentos em profundidade;
- Analisar os parâmetros estatísticos (diâmetro médio e desvio padrão);
- Estimar a velocidade das correntes durante o período de deposição através do Diagrama de Hjulstrom (1935);
- Classificar a hidrodinâmica do estuário dos bons sinais com base no Diagrama de Pejrup (1988).

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1. Contextualização do termo Estuário

O estudo dos estuários, palavra que deriva do latim *aestuarium* (cujo significado é maré ou onda abrupta de grande altura), foi iniciado há 120 anos por pesquisadores escandinavos (Miranda *et al.*, 2002, citado por Silva, 2012).

Os estuários são ambientes marcados por constante e intensa exploração desde os meados do século XIX, pelo facto de serem por excelência ambientes favoráveis à concentração de indústrias, facilidade do transporte hidroviário e desenvolvimento humano, onde cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor da Terra estão localizadas nas proximidades dos mesmos. Geralmente são ambientes que possuem um amplo desenvolvimento de actividades económicas, devido à facilidade de distribuição e logística da produção (Miranda *et al.* 2002).

Segundo Dalrymple *et al.* (1992), a origem destes ambientes está associada a inundação dos vales na zona costeira, devido a subidas do nível relativo do mar (transgressão). A descida do nível relativo do mar (regressão) tende a destruir a existência dos estuários, fazendo com que eles se transformem em deltas (Boggs, 2005).

Os estuários possuem peculiaridades físicas, químicas e biológicas e geológicas, o que reflecte o grande interesse de várias áreas ligadas a investigação desses ambientes. Em geral, as definições propostas para estes ambientes são de acordo com componentes tais como salinidade, características sedimentares, processos físicos actuantes (ondas e /ou marés), mecanismos deposicionais dominantes (Frazão, 2003) e de acordo com a importância ecológica (Diamond, 2009, citado por Catelani, 2013).

Ketchum (1983) define estuários de acordo com as funções vitais que esses ambientes proporcionam para os organismos vivos. Para este autor, estuários são locais que constituem o habitat natural de aves, mamíferos e peixes, é o ambiente de desova e de criação de várias comunidades biológicas e, também, desempenham um papel importante nas rotas migratórias de peixes de valor comercial.

Segundo Cameron e Pritchard (1963) o termo estuário é definido com base no teor de salinidade, no qual “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com interligação livre com o oceano

aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

Na definição proposta por Dalrymple *et.al*, (1992), que por sua vez, é mais abrangente no contexto geológico, estuários são considerados como ambientes de transição onde há interação de processos marinhos e continentais, e que filtram sedimentos resultantes destes processos. No entanto, o conceito aplausivo para os estes autores, seria: “Estuário é a parte voltada para o mar de um sistema de vales inundados, os quais recebem sedimentos de fontes fluviais e marinhas, contendo fácies influenciada pela maré, ondas e processos fluviais.”

## **2.2. Dinâmica e fácies sedimentares em estuários**

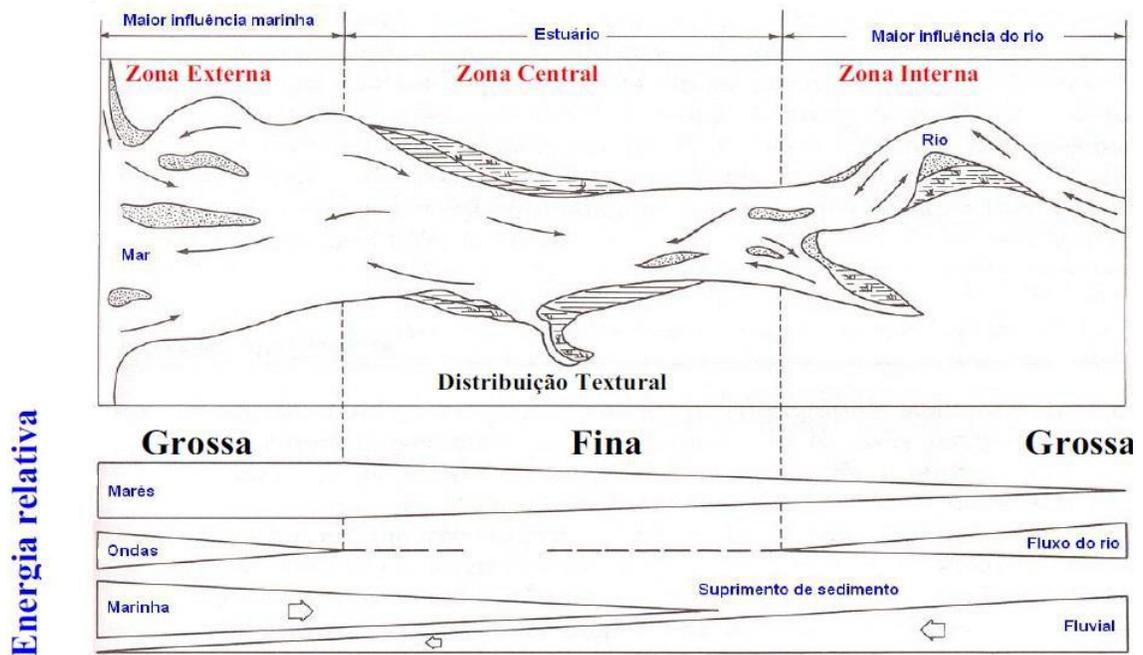
A dinâmica dos sedimentos está, intimamente relacionada à velocidade do fluido. Em ambientes estuarinos, onde há a transição entre o continente e o oceano a dinâmica sedimentar tende a ser ainda mais intensa devido à influência e conjugação de processos comumente associados à mobilização, transporte e deposição de sedimentos (Neves, 2013).

A circulação da água, processos de mistura e estratificação nesses ambientes são controlados pelos agentes: ventos, ondas e marés incidentes, descarga dos rios e correntes (Dyer, 1995), e estes por sua vez, são responsáveis pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos (dinâmica sedimentar) em estuários (Neves, 2013).

As classes primárias de sedimentos encontradas dentro de um estuário, resultante da dinâmica dos agentes anteriormente mencionados são areia, silte e argila, onde areia possui maior velocidade de sedimentação dessas três classes. Argila e silte, permanecem dentro da coluna de água por um período mais longo que a areia por causa de suas baixas velocidades de sedimentação (Simmons, 2012).

O modelo de fácies sedimentares característicos de ambientes estuarinos e a influência da hidrodinâmica das forçantes fluviais e marinhas subdivide os estuários em três zonas distintas (Figura 1) (Dalrymple *et al.* 1992), nomeadamente:

- ✓ Zona externa – correspondente ao domínio marinho, com acção das ondas junto a embocadura, alta energia das correntes de maré e a baixa actuação da corrente fluvial, ocorrendo a deposição de fácies de sedimentos de granulação grossa.
- ✓ Zona central – há predomínio da atenuação da energia total (rio, ondas e maré), de montante e jusante para a porção central do estuário, sendo depositadas fácies de sedimentos mais finos de origem marinha e fluvial.
- ✓ Zona interna – correspondente ao domínio fluvial, com baixa influência da energia das marés e maior deposição de sedimentos de granulação grossa.



**Figura 1:** Modelo de distribuição de fácies estuarina e o grau de influência das correntes fluviais e de maré (Fonte: Silva, 2012).

### 2.3. Parâmetros estatísticos

O estudo da distribuição granulométrica de sedimentos e de seus valores estatísticos como seleção, diâmetro médio, assimetria e curtose, permitem a interpretação dos ambientes de sedimentação (Suguio, 1980). Entretanto, a análise dos parâmetros estatísticos visa na compreensão da dinâmica dos mecanismos que actuam dentro das etapas de deposição, transporte e classificação dos depósitos sedimentares (Silva, 2012).

### 2.3.1. Diâmetro Médio (Mz)

O diâmetro médio, é um parâmetro de tendência central que fornece informações, em média, das partículas que constituem uma distribuição granulométrica (mais ou menos grosseiras, quando são comparadas duas ou mais distribuições), que geralmente está relacionado com a energia cinética média ou níveis energéticos do ambiente deposicional (Folk e Ward, 1957; Dias, 2004). Além disso, este parâmetro também está relacionado com a fonte de suprimento de sedimentos (Folk, 1974; Poçano, 1985).

De acordo com Folk e Ward (1957) a expressão Matemática para o calculo do diâmetro médio é dada por:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (\text{equação 1})$$

#### Onde:

Mz – Diâmetro médio;

$\Phi_{16}$  – Percentil 16;

$\Phi_{50}$  – Percentil 50;

$\Phi_{84}$  – Percentil 84.

### 2.3.2. Desvio padrão ( $\sigma$ )

O desvio padrão é referente ao grau de dispersão dos dados da distribuição granulométrica em torno do valor médio. Seu significado geológico diz respeito à capacidade das correntes em selecionar um determinado sedimento (Costa, 2007) e depende, de: (i) tamanho do material fornecido ao ambiente, (ii) características das correntes - correntes de resistência relativamente constante, seja baixa ou alta, darão melhor seleção de sedimentos em relação as correntes que variam rapidamente (Folk, 1974). No entanto, o termo seleção refere-se à organização das partículas, durante o transporte de acordo com seus tamanhos, gravidades específicas e forma (Braga *et al.*, 2007), e por sua vez está directamente relacionada as condições de constância ou a irregularidade dos níveis energéticos (Dias, 2004).

Folk e Ward (1957) afirmam que a seleção de sedimentos é melhor nas faixas de areia, decaindo para seleção pobre nos sedimentos finos. Segundo os mesmos autores, a expressão Matemática para o cálculo do desvio padrão é dada por:

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} - \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (\text{equação 2})$$

**Onde:**

$\sigma$  – Desvio padrão;

$\Phi_{84}$  – Percentil 84;

$\Phi_{16}$  – Percentil 16;

$\Phi_{95}$  – Percentil 95;

$\Phi_5$  – Percentil 5.

Para descrição do grau de seleção de sedimentos em torno da média, Folk e Ward (1957) estabeleceram a seguinte escala qualitativa:

$\sigma < 0,35$  muito bem selecionado

$0,35 < \sigma < 0,50$  bem selecionado

$0,50 < \sigma < 1,00$  moderadamente selecionado

$1,00 < \sigma < 2,00$  mal selecionado

$2,00 < \sigma < 4,00$  muito mal selecionado

$\sigma > 4,00$  extremamente mal selecionado

#### **2.4. Erosão, Transporte, e Deposição de sedimentos- Diagrama de Hjulstrom (1935)**

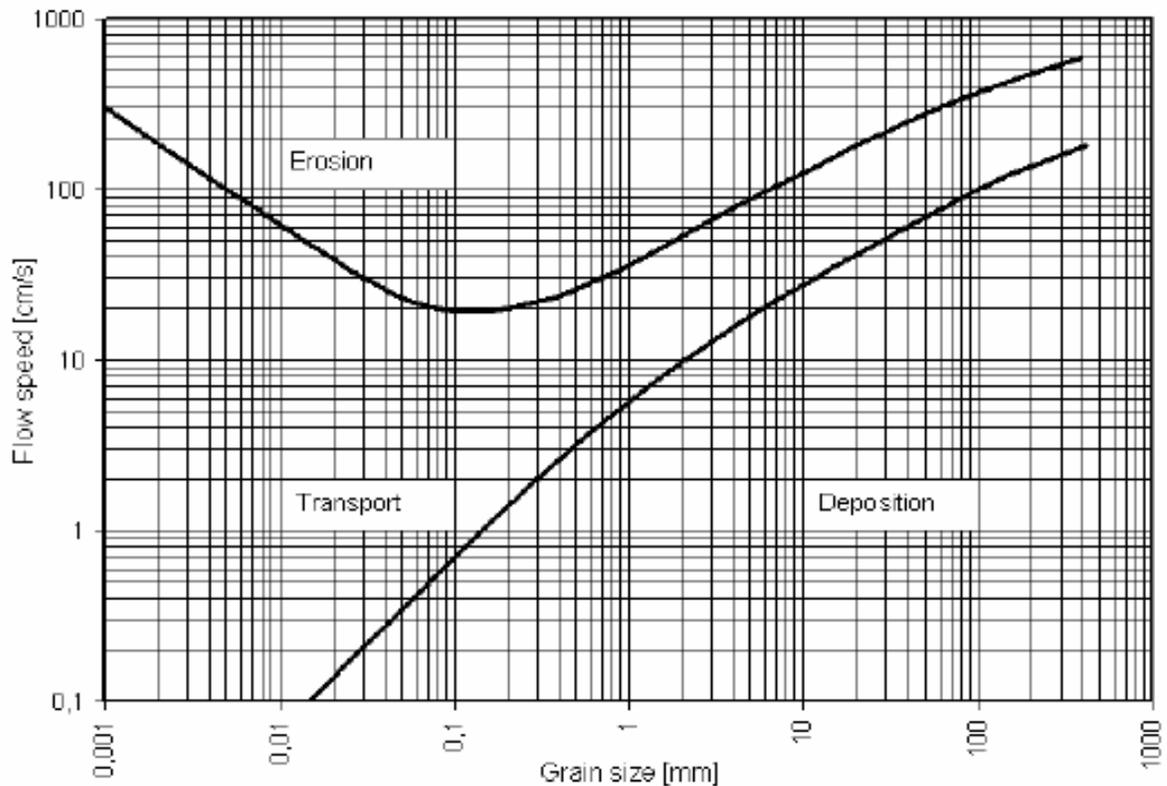
Os sedimentos que chegam ao curso de água apresentam diferentes granulometrias e passam por diferenciados processos de transporte sendo este determinado pelas condições energéticas locais (Silva, 2008). Em virtude da variação hidrodinâmica dos processos de circulação, os estuários assim como outros ambientes deposicionais estão propensos a ocorrência de processos de erosão, transporte e deposição (Van Rijn, 1993).

A erosão só irá ocorrer quando a tensão tangencial no fundo for superior a tensão tangencial crítica de erosão superficial (Alves, 2009, citado por Oliveira, 2010), onde os sedimentos são removidos

do leito, e a quando deste processo ocorre o transporte dos mesmos, na qual podem ocorrer por rolamento e saltação (que inclui os grãos da carga de fundo) e por suspensão (que inclui toda a carga mantida no alto pela turbulência do fluido) dependendo da velocidade das correntes incidentes no meio (Leeder, 1982).

É importante salientar que a velocidade da corrente necessária para colocar um determinado detrito em movimento (erosão), deve ser maior em relação aquela necessária para mantê-lo em movimento (transporte) (Yokoyama, 2012). De acordo com Leeder (1982), a deposição só irá ocorrer quando o grão de sedimento superar a inércia do fluido.

Filip Hjustrom (1935) propôs um diagrama (Figura 2) que apresenta curvas experimentais, nas quais relacionam a velocidade média crítica do fluido e o diâmetro das partículas, onde à uma certa velocidade das correntes, partículas com um determinado diâmetro irão erodir, transportar e depositar. De forma a interpretar e compreender o diagrama de Hjulstrom, Boggs (2005) afirma que “velocidade crítica de arrasto para grãos maiores que cerca de 0,05 mm aumenta gradualmente com o aumento do tamanho médio de grãos enquanto que a velocidade de arrastamento de grãos consolidados correspondentes aos sedimentos de argila e silte, que por sua vez, são menores que 0,05 mm aumenta com a diminuição do tamanho do grão”. Por outro lado, a deposição de sedimentos menores que 0.05 mm ocorre em condições de baixa velocidade das correntes quando comparadas à partículas de sedimentos maiores que 0.05 mm.



**Figura 2:** Diagrama de Hjulstrom (Fonte: Yokoyama, 2012).

O diagrama de Hjulstrom é comumente usado por geólogos e hidrologistas para verificar as condições de processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos em rios, assim como em outros ambientes deposicionais.

No estudo realizado por Silva (2008), foi possível com base no diagrama de Hjulstrom observar as faixas de velocidade de corrente nas quais os sedimentos do fundo foram erodidos, transportados e depositados.

Silva (2016), em seu estudo laboratorial usou o diagrama de Hjulstrom para prever, a partir da velocidade média do escoamento, se os grãos de sedimentos bioclásticos estavam em iminência de serem depositados, transportados ou erodidos.

## 2.5. Hidrodinâmica com base no Diagrama de Pejrup (1988)

As classificações simplistas baseadas na classe textural dominante, não são como é evidente suficientemente precisas, pois que, em geral num sedimento estão presentes várias classes, não

obstante uma pode ser normalmente dominante. No entanto, permite desde logo, extrair um conjunto valioso de ilações sobre a sua génese e as características da dinâmica sedimentar a que esteve sujeito (Dias, 2004).

Segundo Dias (2004), pelo facto de se tornar difícil a representação gráfica de qualquer classificação de várias classes texturais optou-se pela utilização de diagramas ternários triangulares, onde a partir das descrições baseadas em critérios derivados das razões entre classes texturais, bem como as nomenclaturas associadas, permitem a distinção precisa entre diferentes tipos de sedimentos e as características hidrodinâmicas nas quais os mesmos foram submetidos durante do processo de deposição, diminuindo deste modo as ambiguidades e facilitando a comunicação e discussão das observações e dos resultados na comunidade científica.

Shepard (1954) considerado como o “Pai da Geologia Marinha” propôs um diagrama triangular (Figura 3a), que por sua vez, é o mais usado para a classificação de sedimentos e distinção de diferentes fácies deposicionais. É importante salientar que o diagrama proposto pelo autor acima mencionado, não faz menção as ilações referentes a hidrodinâmica, isto é, é um esquema puramente voltado a descrição das fácies sedimentares (Dias, 2004).

Pejrup (1988) discute o esquema proposto por Shepard (1954) para classificação dos ambientes estuarinos, pelo facto das amostras individuais no diagrama de Shepard (1954) (Figura 3a) serem agrupadas em forma elíptica, onde os eixos longos das elipses não são paralelos a nenhuma das linhas.

No entanto, considerando que os ambientes estuarinos contém elevadas concentrações de lama, a classificação de Shepard (1954) torna-se inadequada para classificar os sedimentos destes ambientes. Pejrup (1988) ressalta ainda que a classificação dos sedimentos estuarinos por meio de parâmetros estatísticos derivados da distribuição do tamanho de grãos pode ser problemática porque uma grande quantidade de argila nas amostras dificulta a computação. Em vez disso, pode-se usar um diagrama triangular baseado nas razões de areia, silte e argila.

Contudo, com base nas controvérsias anteriormente descritas, Pejrup (1988) propôs um novo diagrama triangular (Figura 3b) para a classificação de sedimentos estuarinos, segundo as condições hidrodinâmicas actantes durante o processo de deposição dos sedimentos baseando-se na concentração de argila.

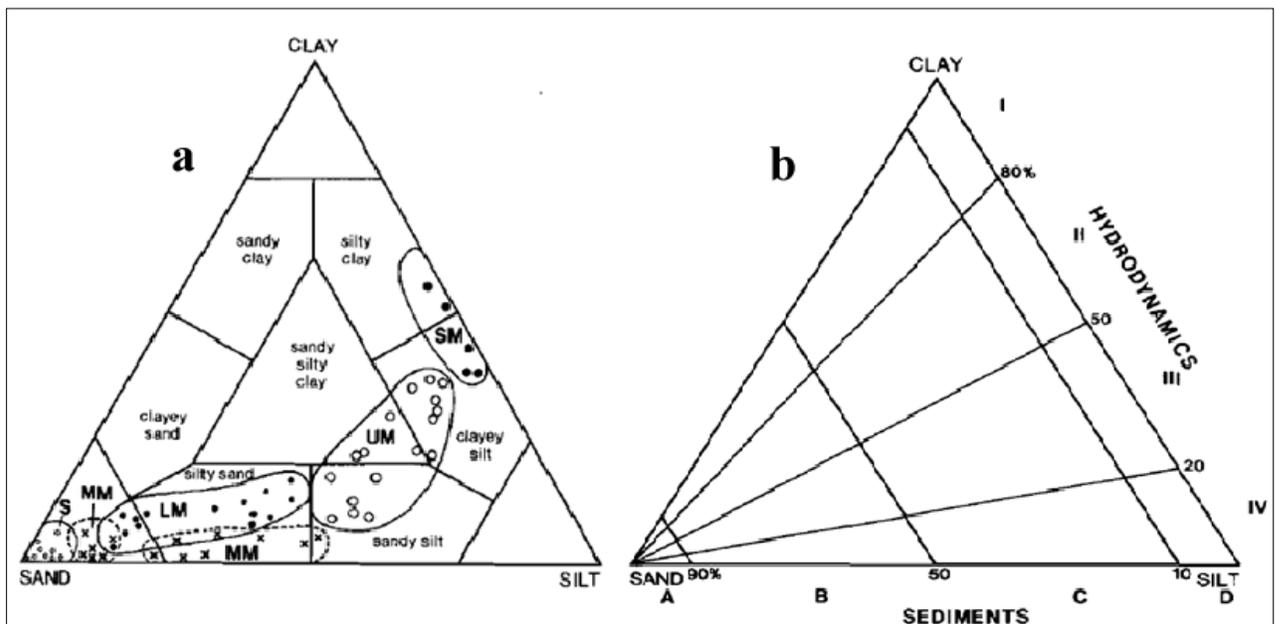
O método baseia-se na construção de um triângulo que é subdividido com base nos valores percentuais de teores de argila e areia. Sedimentos que contém teores de argila superior a 80%, na fracção de lama, raramente

são encontrados e caracterizam ambientes de baixa energia. A presença de 20% de teor de argila, na fracção de lama, é utilizada para caracterizar ambientes de energia mais elevada e a faixa intermediária que corresponde a 50% de teor de argila, na fracção lama, é utilizada para dividir a faixa média do diagrama em duas partes iguais (Pejrup, 1988).

Entretanto, o triângulo encontra-se dividido em quatro secções denominadas I a IV (figura 3b). A secção I indica condições hidrodinâmicas muito calmas, raramente encontradas em estuários, e as secções II a IV indicam condições hidrodinâmicas cada vez mais intensas (Corrêa, 2005)

A divisão do diagrama é também efectuada a partir do conteúdo de areia, representando as secções A, B, C e D (Figura 3b). A linha de 10% de areia foi escolhida por Pejrup (1988), pelo motivo que tal conteúdo de areia em sedimentos lamosos é insignificante em termos de dinâmica ao passo que a linha de 90% de areia foi escolhida devido à perda do carácter coesivo por sedimentos com tal características. Finalmente a linha de 50% de areia foi escolhida para dividir o grupo central em duas partes iguais (Corrêa, 2005).

Desta maneira Pejrup (1988) divide o diagrama em 16 grupos (Figura 3b), nomeados por letras que indicam o tipo de sedimento e por números que indicam as condições hidrodinâmicas reinantes durante a deposição.



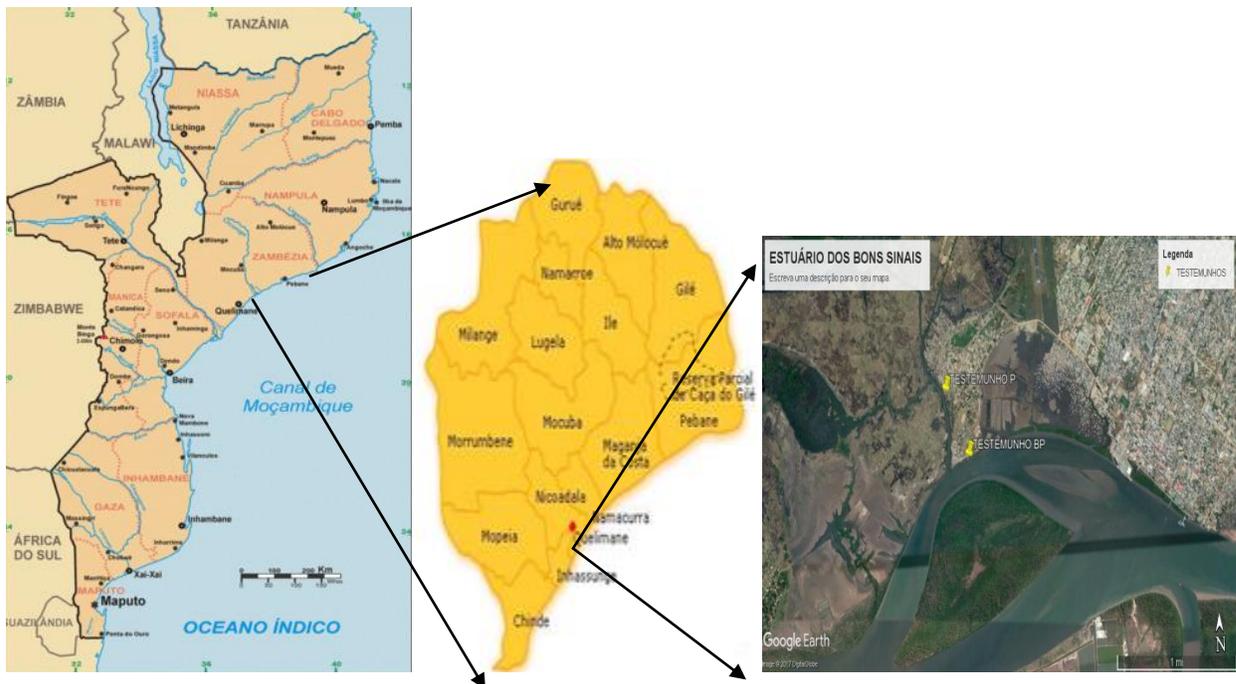
**Figura 3:** a) Diagrama de Shepard (adaptado de Pejrup, 1988); b) Diagrama de Pejrup (Fonte: Pejrup, 1988)

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Área de estudo

O Estuário dos Bons Sinais encontra-se localizado na zona centro de Moçambique nas coordenadas 17°52' 24.04" Sul e 036°51' 26.79" Este, na Província da Zambézia, onde faz fronteira a Oeste com a cidade de Quelimane e a Este com o distrito de Inhassunge (Chaia, 2015). O estuário possui uma profundidade média de cerca de 12 m, comprimento de cerca de 30 km e largura média de cerca de 2 km, totalizando uma área estimada em cerca de 60 km<sup>2</sup> limitada pela vegetação de floresta de mangal ao longo das margens do canal principal e secundário (Timba, 2014).

A região apresenta clima tropical húmido caracterizado por estações secas e chuvosas com temperaturas médias anuais que variam de 24 à 26°C e o fundo é caracterizado por material argiloso (Focheiro, 2014). A hidrodinâmica do estuário é fortemente influenciada pela acção das ondas e marés caracterizadas como sendo semi-diurnas, correntes e descargas dos rios Cua Cua e Licuari (António, 2012).



**Figura 4:** Localização da área de estudo (Fonte: Google earth)

## **3.2. Materiais**

### **3.2.1. Trabalho de Campo**

Para a colecta de sedimentos de fundo em profundidade no Estuário dos Bons Sinais, foi empregue o uso de amostrador vertical (adaptado a partir de tubos de PVC na ESCMC), martelo, GPS *Astro 60*, máquina fotográfica, tábua de madeira e escadote.

### **3.2.2. Trabalho de Laboratório**

A análise laboratorial foi baseada no uso de: estufa de aquecimento *WT Binder* (150°C), provetas de vidro de 1000 ml, pipeta graduada de 25 ml, copo graduado de 600 ml, balança electrónica digital *XS-210* com precisão de 0,01 g, termómetro, ácido clorídrico (HCl), água destilada, dispersante (Pirofosfato de Sódio -  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e máquina fotográfica.

## **3.3. Métodos**

### **3.3.1. Procedimento de campo e amostragem**

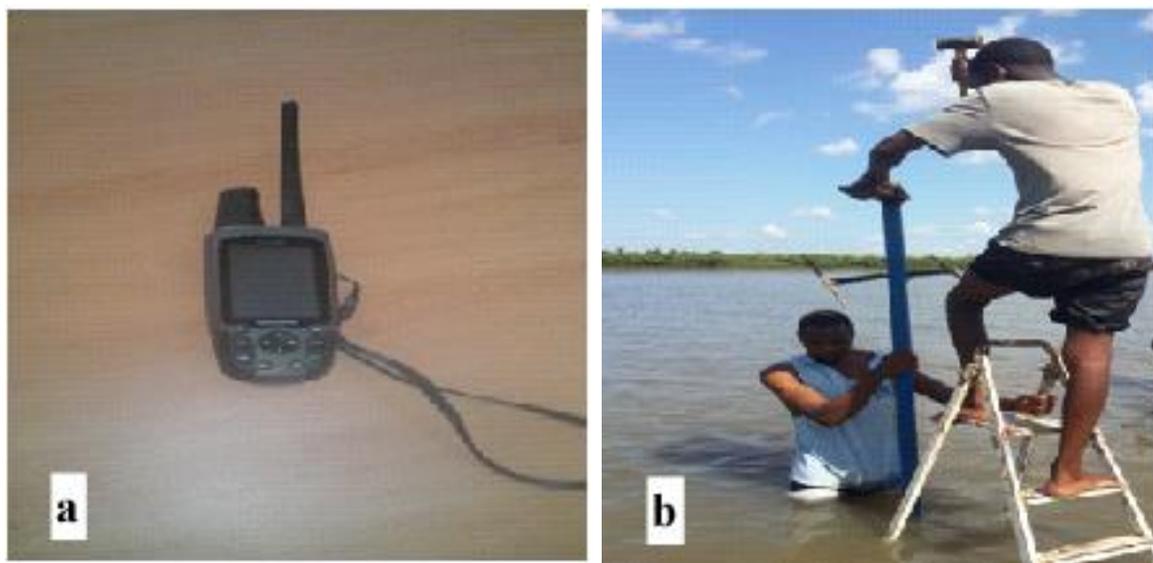
O procedimento de campo teve como finalidade a colecta das amostras de sedimentos de fundo em profundidade para posterior análise laboratorial, com o propósito de obter-se o conhecimento sobre a distribuição textural de sedimentos em profundidade presente no Estuário dos Bons Sinais.

A colecta foi realizada com auxílio de amostrador vertical em 2 pontos ao longo do estuário, onde os mesmos foram georreferenciados com GPS (Figura 5a).

Utilizaram-se tubos de PVC com diâmetro de 5 cm e comprimento de 2.5 m de forma a compensar a espessura do substrato em relação superfície da coluna de água para obtenção de maior profundidade de amostragem. Foram colectados 2 testemunhos designados BP (Bairro dos Pescadores) e P (Ponte) de 80 e 100 cm respectivamente (Figura 4), por cravação vertical com auxílio de escadote para elevação da altura, tábua de madeira e martelo para facilitar a cravação ao fundo (Figura 5b).

Os pontos de amostragem apresentam uma distância de espaçamento de 677 m e foram escolhidos aleatoriamente tendo em conta a estrutura do amostrador vertical que não permite a colecta das amostras em locais onde a profundidade da coluna de água é altamente espessa, e ainda pela facilidade de recuperação do testemunho. Antes porém, para a colecta das amostras de sedimentos,

considerou-se locais que sempre ficam submersos de água com o intuito a garantir o predomínio dos processos sedimentares e a não exposição das fácies sedimentares, para tal as amostras foram colectadas durante o período da vazante da maré viva nos dias 10 e 13 de Junho de 2017 em profundidades distintas (80 e 100 cm), devido à dificuldade de cravação dos testemunhos até ao fundo do canal do Estuário.



**Figura 5:** a) GPS Astro 60, equipamento usado para georreferenciar os pontos de amostragem; b) Colecta das amostras com recurso ao testemunho de sedimentos no fundo do canal do Estuário dos Bons Sinais

### 3.3.2. Procedimento Laboratorial

Após a colecta das amostras de sedimentos, os testemunhos de PVC foram armazenados no laboratório de solos da ESCMC na posição vertical durante 2 dias, de modo que a água presente entre os espaços vazios (poros) de sedimentos fosse extraída.

Depois da extracção da água contida nos espaços vazios, foi utilizada a serra eléctrica para cortar os tubos PVC longitudinalmente em duas partes iguais (Figura 6a) e em seguida, as amostras foram confeccionadas em sacos plásticos (Figura 6b) e etiquetadas de acordo com a localização do ponto de colecta e a profundidade com um espaçamento de 10 cm ao longo da secção vertical de cada testemunho.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de sedimentologia do Departamento de Geologia, localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane - Maputo para análise granulométrica de sedimentos.

A análise granulométrica foi realizada através de técnicas de pipetagem e crivagem. As fracções finas de silte e argila foram determinadas por pipetagem que é baseada na velocidade de sedimentação das partículas segundo intervalos de tempo estabelecidos com base na lei de Stokes (Folk, 1974). As fracções de areia foram determinadas por crivagem, de acordo com os critérios estabelecidos por Suguio (1973) e Folk (1974).



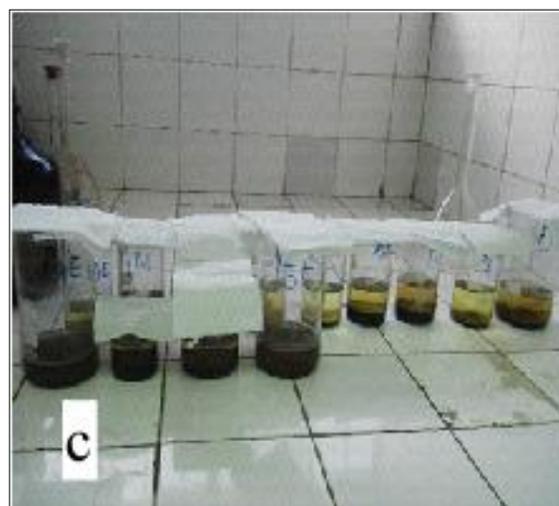
**Figura 6:** a) Corte dos tubos de PVC; b) Amostras de sedimentos prontas para o confeccionamento em sacos plásticos

### 3.3.2.1.Preparação das amostras

Segundo Vaasma (2008), quando os sedimentos finos contém elevadas concentrações de matéria orgânica pode ocorrer agregação de compostos orgânicos aos grãos detríticos, interferindo nos resultados finais granulométricos. Desta forma, a preparação das amostras foi baseada na oxidação da matéria orgânica e separação dos sedimentos pelíticos da areia, onde foram pesadas 20g de amostras de sedimentos em intervalos de 10 cm de profundidade de ambos testemunhos na balança electrónica digital (Figura 7a) e posteriormente seguiu o processo de oxidação da matéria orgânica, na qual as amostras foram submetidas em solução constituída por 1,5 l de água destilada e 3% de

ácido clorídrico num período de permanência de 24h (Figura 7c). Após a oxidação, as amostras foram submetidas à secagem na estufa a uma temperatura de 60°C durante 24h (Figura 7b).

Após a secagem, as amostras passaram pelo procedimento de separação dos pelitos (silte e argila) da areia em água corrente (destilada) com uso de peneira granulométrica de malha correspondente à 0.05 mm, onde o material retido na malha que conseqüentemente é maior que 0.05 mm foi colocado na estufa a temperatura de 60°C para posterior crivagem e o material que passou da malha foi colocado em provetas para posterior análise a partir da técnica de pipetagem.



**Figura 7:** a) Balança XS-210 com precisão de 0,001 g, usada para pesar as amostras; b) Estufa WT Binder, usada para secar amostras; c) Oxidação da matéria orgânica.

### 3.3.2.2.Procedimento de Crivagem

Na técnica de análise granulométrica por crivagem podem ser usados crivos com dimensões que variam de 9.50 à 0.063 mm (Muller, 1967). Desta forma, após a secagem na estufa, o material de fracção maior que 0.050 mm foi submetido ao jogo de peneiras com malhas de 1.4, 0.710, 0.500, 0.355, 0.250, 0.180, 0.125, 0.075 e 0.063 mm tendo em conta a escala granulométrica de Wentworth (1992). O jogo de peneiras foi montado em ordem crescente (debaixo para cima) sobre um prato de fundo e agitado manualmente (Figura 8).

O material retido em cada peneira foi pesado com balança digital para obtenção das quantidades de fracções de areia de cada amostra.



**Figura 8:** Peneiras granulométricas, usadas para a crivagem das amostras

### 3.3.2.3.Procedimento de Pipetagem

Após a colocação de sedimentos da classe granulométrica de silte e argila nas provetas, adicionou-se 25 ml de dispersante (Pirofosfato de Sódio) e completou-se o volume adicionando água destilada até 1000 ml. Posteriormente, foi medida a temperatura da solução com termómetro para se estabelecer a profundidade de colecta.

As fracções foram colectadas em função de tempo e profundidade (Tabela 3- Anexo), onde primeiramente, as provetas foram agitadas manualmente para manter os sedimentos em suspensão e a quando da interrupção do movimento, com auxílio de cronómetro teve o início de contagem de tempo de sedimentação. Desta forma, foram colectadas cinco alíquotas de 25 ml com pipeta graduada correspondentes as fracções granulométricas de 0.050, 0.032, 0.016, 0.008 e 0.002 mm e colocadas em recipientes de vidro (Figura 9)

O material pipetado colocado em recipientes de vidro foi inserido na estufa a uma temperatura de 60°C, e após ter secado foi pesado na balança digital. A partir dos pesos obtidos, foram feitas as diferenças das fracções 0.050-0.032, 0.032-0.016, 0.0016-0.008, 0.008-0.002 e 0.002 mm- concentração do agente dispersante, para o cálculo das concentrações das fracções correspondentes à 0.050, 0.032, 0.016, 0.008 e 0.002 mm respectivamente.



**Figura 9:** Colecta das fracções granulométricas dos sedimentos pelíticos (silte e argila)

### **3.4. Processamento e Análise dos dados**

#### **3.4.1. Distribuição granulométrica**

Após a obtenção dos pesos das fracções granulométricas (areia, silte e argila), os mesmos foram convertidos em valores percentuais e digitados em planilhas do programa computacional electrónico denominado *Software Microsoft Excel 2007*, para o plot de gráficos de distribuição granulométrica em profundidade.

#### **3.4.2. Análise dos parâmetros estatísticos**

Os resultados das análises granulométricas, convertidos em valores percentuais foram extrapolados para programa computacional electrónico denominado *Software Sysgran 3.0*, com o objectivo de determinar os parâmetros estatísticos (diâmetro médio e desvio padrão) descritos por Folk e Ward (1957) a partir das equações 1 e 2.

#### **3.4.3. Confeção de diagramas**

Os valores do parâmetro estatístico diâmetro médio foram usados para estimar a velocidade de correntes no período de deposição dos sedimentos com base no diagrama de Hjulstrom (1935), onde para o plot de gráficos referentes a estimativa de velocidade das correntes foi usado o programa computacional electrónico denominado *Software Microsoft Excel 2007*. Vale ressaltar que o escopo do diagrama de Hjulstrom (1935) no presente estudo não está centrado nos mecanismos de transporte e erosão, mas sim de deposição por ser a mais detalhadamente estudada, pois é nesta fase que são formados e preservados os registos dos eventos geológicos sedimentares (Suguio, 1980).

O diagrama de Hidrodinâmica de Pejrup (1988), foi plotado com base nos resultados das análises granulométricas tendo em contada o teor de areia e argila, e este por sua vez, foi editado com o programa computacional electrónico de edição denominado *Canvas 9.0*.

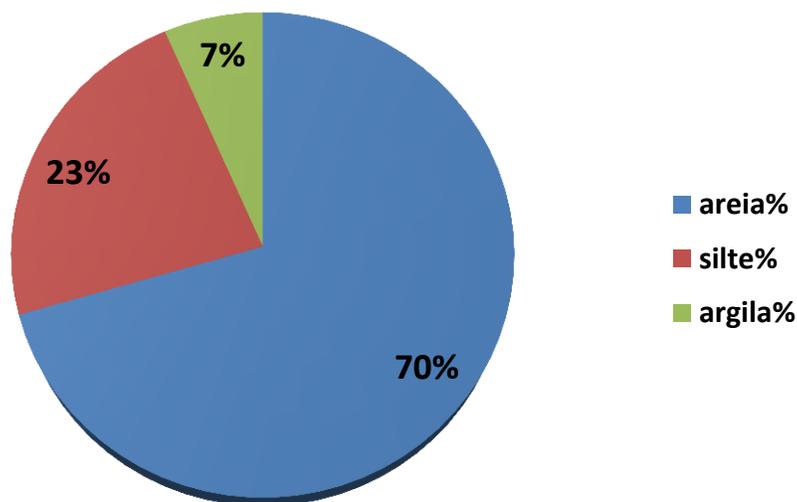
## 4. Resultados

### 4.1. Caracterização granulométrica

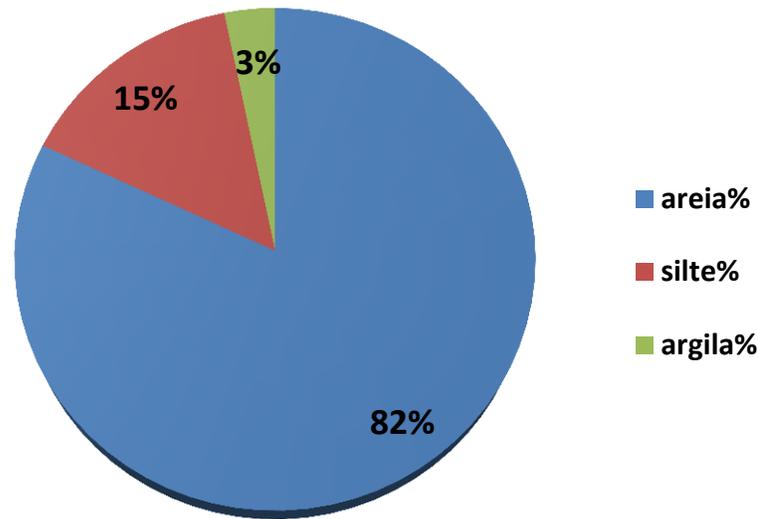
As amostras de sedimentos dos testemunhos P e BP com 100 e 80 cm de profundidade respectivamente, colectadas no Estuário dos Bons Sinais, foram analisadas quanto à textura (tipo e tamanho de sedimento), e o padrão de distribuição granulométrica em profundidade foi caracterizado por areia, silte e argila.

A classe granulométrica de areia foi a que apresentou maior domínio no testemunho P (Figura 10) com 70%, seguido de silte com 23% e argila com 7%. O mesmo se sucede para o testemunho BP, onde areia apresentou maior domínio com 82%, seguido de silte com 15% e argila com 3% (Figura 11).

Notavelmente, o testemunho P apresentou menores concentrações de areia e maiores de silte e argila, quando comparado com o testemunho BP, como pode ser observado a partir da comparação das Figuras 10 e 11.



**Figura 10:** Distribuição granulométrica total em profundidade -Testemunho P



**Figura 11:** Distribuição granulométrica total em profundidade -Testemunho BP

A distribuição granulométrica de sedimentos em intervalos de profundidade de 10 cm para o testemunho P (Figura 12) foi marcada por valores máximos de concentração de silte no intervalo de 0-20 cm de profundidade com uma média de 52.68%. No intervalo de 20-100 cm de profundidade, foi observado um padrão de tendência decrescente na concentração da mesma classe granulométrica, embora tenha se registado ligeiros padrões de aumento da concentração nos intervalos de 50-60 e 80-90 cm de profundidade. O valor mínimo da concentração foi registado no intervalo de 90-100 cm de profundidade com 8.24%.

A classe granulométrica de areia (Figura 12) apresentou um padrão de aumento de concentração em profundidade, com suaves declínios nos intervalos de 30-40, 50-60 e 80-90 cm de profundidade. Os picos mínimos foram observados no intervalo de 0-20 cm de profundidade com uma média de 36.22%, e máximos nos intervalos de 70-80 e 90-100 cm de profundidade com uma média de 88.23%.

Notavelmente, a classe de argila, foi a que apresentou menor proporção quando comparadas com as outras classes, onde as maiores concentrações foram registadas no intervalo de 0-40 cm, no qual

o pico máximo verificou-se no intervalo de 30-40 cm de profundidade com 15.26%. No intervalo de 40-100 cm foram registados valores de concentrações abaixo de 5% de argila, onde o pico mínimo foi observado no intervalo de 70-80 cm com 0.11% (Figura 12).

A distribuição granulométrica de sedimentos em intervalos de profundidade de 10 cm de espaçamento para o testemunho BP (Figura 13), aponta para um aumento de concentração de areia no intervalo de 10-20 cm, seguido de um padrão de tendência decrescente no intervalo de 20-60 cm, e verifica-se um aumento significativo das concentrações na profundidade de 60-70 cm, seguido de um decréscimo no intervalo de 70-80 cm de profundidade. Os valores máximos de concentração da mesma classe granulométrica foram registados nos intervalos de 10-20 e 60-70 cm de profundidade com uma média de 89.86%, e os valores mínimos foram observados nos intervalos de 0-10 e 50-60 cm de profundidade com uma média de 72.8%.

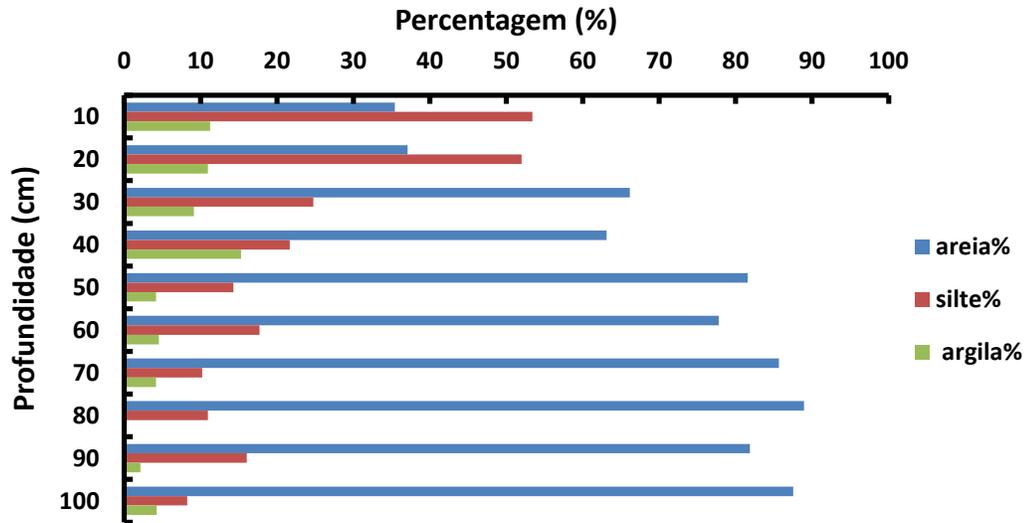
A classe granulométrica de silte (Figura 13) apresentou padrões de tendência de aumento e decréscimo de concentração inverso aos da areia, isto é, nos intervalos em que areia apresentou padrões de tendência de decréscimo, silte apresentou padrões de tendência de aumento de concentração e vice – versa. Os valores máximos de concentração foram registados nos intervalos de 0-10 e 50-60 cm de profundidade com uma média de 22.99%, e o valor mínimo foi observado no intervalo de 10-20 cm com uma concentração de 7.13%.

A classe granulométrica de argila (Figura 13) apresentou concentrações muito baixas, onde ao longo de todo testemunho foram registados valores menores que 4.45%, com exceção do intervalo de 30-40 cm, que por sua vez, apresentou o valor máximo da concentração com 8.2%. Não obstante, os valores mínimos da concentração da mesma classe, foram observados no intervalo de 60-80 cm com uma média de 0.1%.

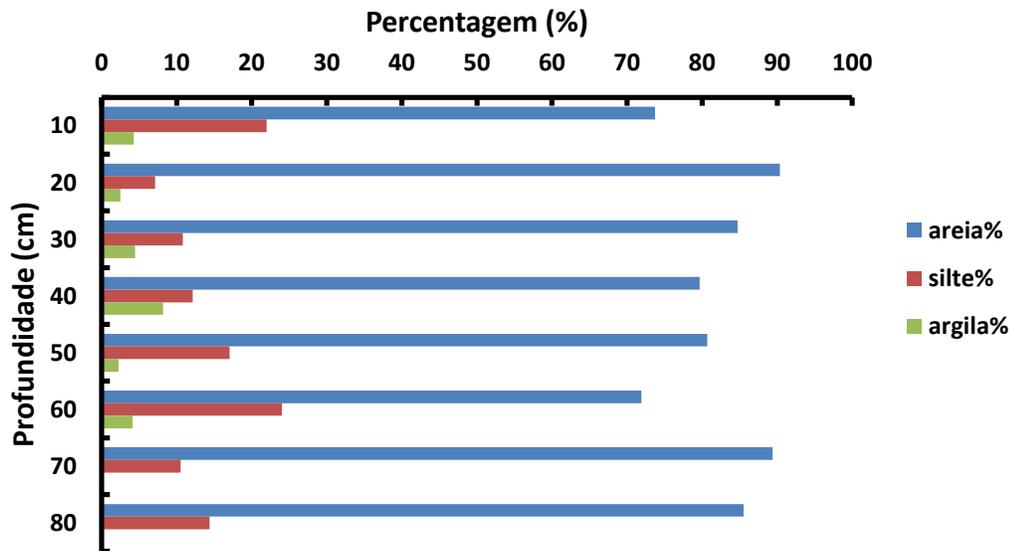
De forma genérica, a distribuição granulométrica em intervalos de profundidade com espaçamento de 10 cm, mostra que o testemunho BP (Figura 13) apresentou domínio de areia em todos intervalos ao longo da profundidade, diferentemente do testemunho P (Figura 12) no qual teve exceção de domínio da mesma classe no intervalo de 0-20 cm de profundidade, onde apresentou maiores concentrações da classe granulométrica de silte.

Em ambos testemunhos, na medida que a classe granulométrica de areia apresentava tendências de aumento de concentração, a classe granulométrica de silte apresentava padrões de decréscimo de

concentração e vice-versa. No que se refere aos sedimentos da classe de argila, as concentrações foram notavelmente baixas.



**Figura 12:** Distribuição granulométrica em intervalos de 10 cm de profundidade- Testemunho



**Figura 13:** Distribuição granulométrica em intervalos de 10 cm profundidade- Testemunho BP.

#### 4.2. Análise dos parâmetros estatísticos

A distribuição do diâmetro médio para o testemunho P, apresentada na Tabela 1, aponta o domínio para classe de silte grosso ( $4.57-4.60\Phi$ ) no intervalo de 0-20 cm de profundidade, e no intervalo de 20-100 cm, o diâmetro médio foi marcado pelo domínio de areia muito fina apresentando variações no intervalo de  $3.92-3.12\Phi$ , onde os valores máximos foram registrados no intervalo de 60-100 cm com um padrão de tendência de aumento de diâmetro médio em relação aos intervalos antecedentes, embora tenham sido observadas ligeiras diminuições no intervalo de 70-90 cm e aumento de 90-100 cm. O pico máximo foi registrado no intervalo de 90-100 cm de profundidade com  $3.12\Phi$ .

O comportamento do desvio padrão para o testemunho P (Tabela 1) apresentou um padrão de seleção que varia de pobremente selecionado à moderadamente selecionado. No intervalo de 0-60cm a seleção foi pobre, e no intervalo de 60-100cm a seleção foi moderada.

A distribuição do diâmetro médio para o testemunho BP (Tabela 1), indicou exclusivamente o domínio de sedimentos da classe de areia muito fina ao longo de todo testemunho com variações no intervalo de  $3.69-3.22\Phi$ . Os valores máximos foram observados nos intervalos de 60-70 cm com  $3.22\Phi$  e 10-30 cm de profundidade com um padrão constante de  $3.23\Phi$ .

O desvio padrão para o testemunho BP (Tabela 1) foi marcado por seleção pobre nos intervalos de 0-10, 30-40 e 50-60 cm e por seleção moderada no restante do testemunho.

Os valores de diâmetro médio apresentaram variações em profundidade para ambos testemunhos (P e BP), com domínio total de areia muito fina para o testemunho BP, e domínio da mesma classe para o testemunho P com exceção do intervalo de 0-20cm de profundidade.

O comportamento de desvio padrão com seleção pobre foi registrado para valores menores da distribuição de diâmetro médio, onde para o testemunho P foi observado no intervalo de  $3.29-4.60\Phi$  e para o testemunho BP foi observado no intervalo de  $3.42-3.69\Phi$ .

**Tabela 1:** Comportamento do diâmetro médio e desvio padrão em profundidade dos testemunhos P e BP

Testemunhos	Profundidade (cm)	Diâmetro médio ( $\Phi$ )	Desvio padrão ( $\Phi$ )
<b>P</b>	0-10	4.60	1.70
	10-20	4.57	1.89
	20-30	3.64	1.47
	30-40	3.92	1.77
	40-50	3.29	1.03
	50-60	3.39	1.20
	60-70	3.20	0.77
	70-80	3.23	0.64
	80-90	3.22	0.85
	90-100	3.12	0.89
<b>BP</b>	0-10	3.43	1.11
	10-20	3.23	0.56
	20-30	3.23	0.81
	30-40	3.42	1.13
	40-50	3.36	0.90
	50-60	3.69	1.18
	60-70	3.22	0.62
	70-80	3.35	0.75

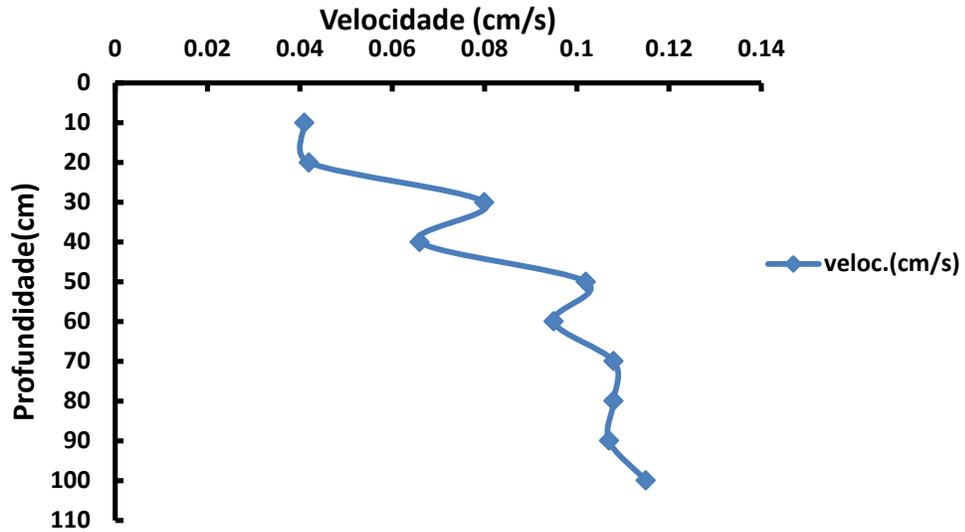
#### 4.3. Estimativa da velocidade das correntes com base no diagrama de Hjulstrom (1935)

As figuras 14 e 15 ilustram a variação da velocidade das correntes em profundidade estimadas a partir do diagrama Hjulstrom para os testemunhos P e BP respectivamente.

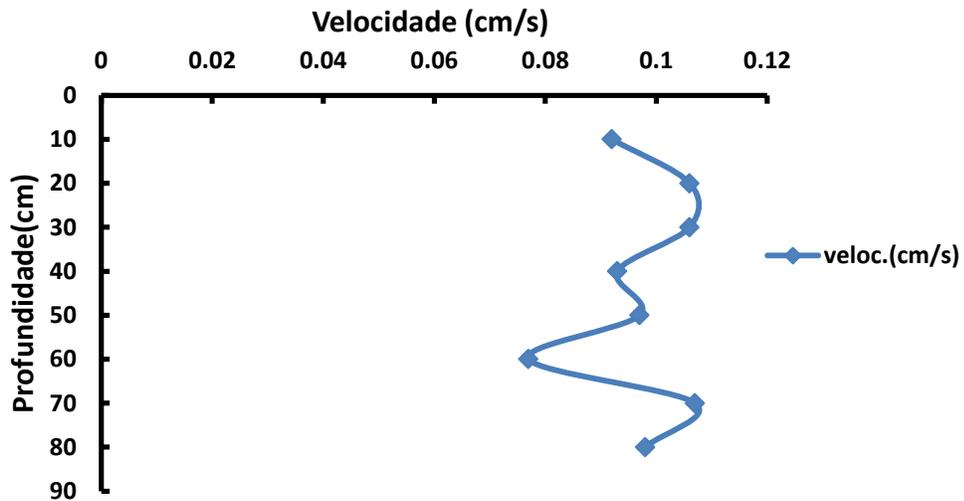
Na Figura 14 (testemunho P), é possível observar que os valores mínimos da velocidade foram registados no intervalo de 0-20 cm de profundidade com uma média em torno de 0.0415 cm/s. No intervalo de 20-60 cm de profundidade a curva da velocidade apresentou oscilações de seus valores e a partir do intervalo de 60-100 cm de profundidade os valores de velocidade das correntes apresentaram tendência de aumento, onde o valor máximo foi registado no intervalo de 90-100cm com cerca de 0.115cm/s.

A curva de velocidade das correntes para o testemunho BP (Figura 15) apresentou oscilações de valores de velocidade das correntes em profundidade, assim como observado no testemunho P

(Figura 14), onde o pico máximo foi registado nos intervalos de 60-70 cm com velocidades de cerca de 0.107cm/s. O pico mínimo foi registado no intervalo de 50-60 cm de profundidade com velocidades em torno de 0.077cm/s.



**Figura 14:** Estimativa da velocidade das correntes com base no Diagrama de Hjulstrom - Testemunho P

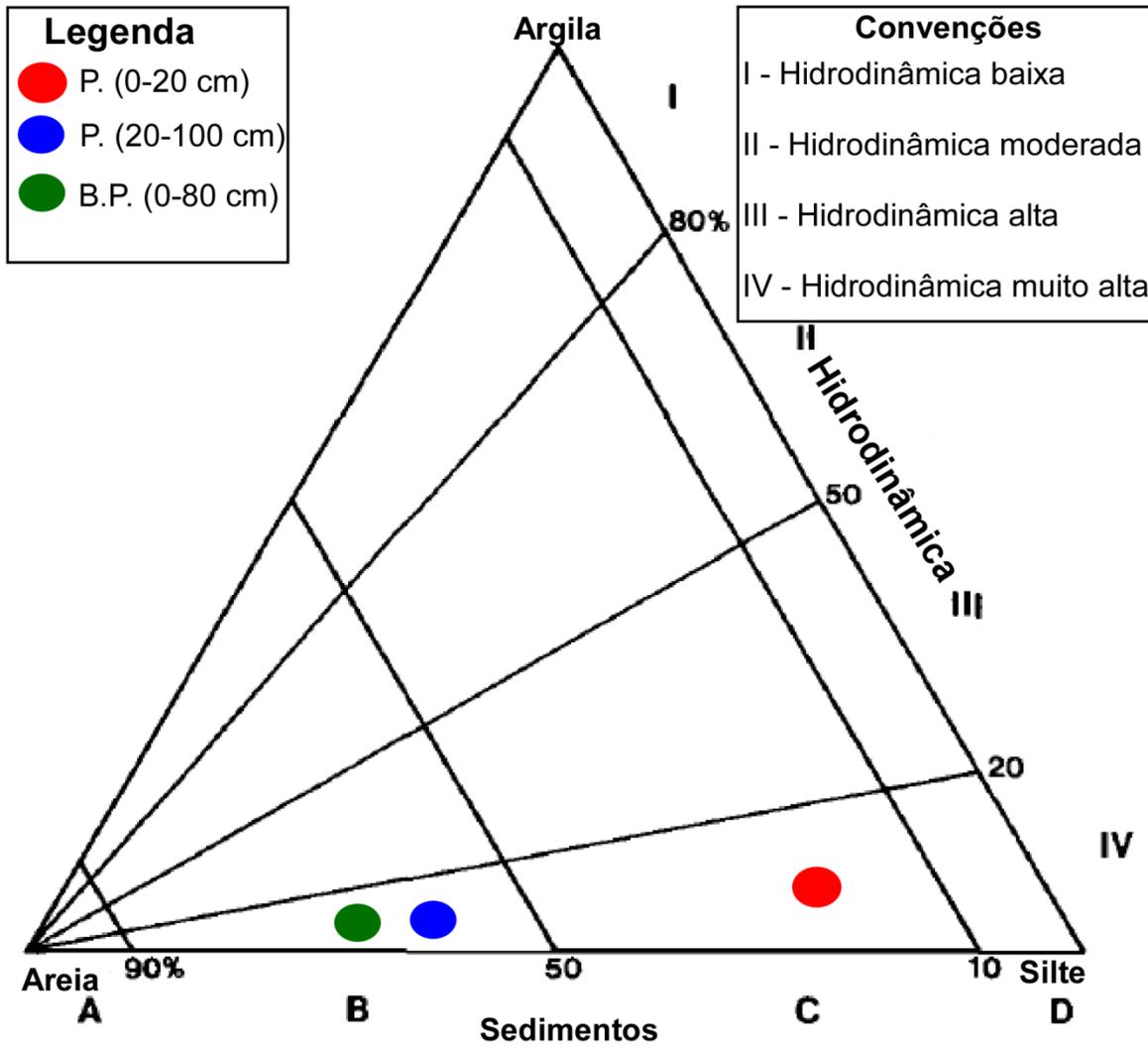


**Figura 15:** Estimativa da velocidade das correntes com base no Diagrama de Hjulstrom - Testemunho BP.

#### **4.4. Classificação da Hidrodinâmica com base no diagrama de Pejrup (1988)**

O diagrama de Pejrup (1988) foi plotado com base nos resultados de distribuição granulométrica de sedimentos em intervalos de profundidade de 10 cm ilustrados nas Figuras 12 e 13, onde areia e argila foram as classes granulométricas que foram levadas em consideração conforme estabelecido por Pejrup (1988) para classificação da hidrodinâmica de ambientes estuarinos. No testemunho P as amostras no intervalo de 0-20 cm de profundidade posicionaram-se no grupo IV-C, que correspondem a faixa de 10 a 50% de areia, e no intervalo de 20-100 cm de profundidade, as amostras posicionaram-se no grupo IV-B, que possuem entre 50 a 90% de areia (Figura 16). No testemunho BP diferentemente do testemunho P, as amostras posicionaram-se no grupo IV-B ao longo de todo testemunho, que possuem entre 50 a 90% de areia.

Os resultados acima descritos indicam o registo de condições de hidrodinâmica muito alta no Estuário dos Bons Sinais desde um passado recente até o presente, embora haja diferenças nas concentrações de areia, argila e silte, conforme ilustra a Figura 16.



**Figura 16:** Diagrama triangular, modificado de Pejrup (1988) com a representação das amostras dos testemunhos P e BP colectadas no Estuário dos Bons Sinais.

## 5. Discussão

### 5.1. Caracterização granulométrica

A distribuição granulométrica de ambos testemunhos colectados no Estuário dos Bons Sinais, conforme apresentado nas figuras 10 a 13, foi caracterizada por três classes granulométricas nomeadamente: areia, silte e argila.

Em virtude da área de estudo compreender a um complexo estuarino, as classes granulométricas acima mencionadas entram em concordância com os padrões de distribuição descritos por Dalrymple *et al.* (1992) referente as fácies sedimentares e com os resultados de estudos realizados por Silva (2012), Corrêa (2005) e Oliveira (2015) em ambientes estuarinos. A partir das literaturas observadas, esta concordância possivelmente esteja associada às fontes e os mecanismos hidrossedimentológicos que os estuários têm em comum, pelo facto destes ambientes filtrarem, em grande medida, fácies sedimentares de origem continental e marinha, onde as descargas fluviais são responsáveis pelo transporte e deposição de sedimentos pelíticos (silte e argila) e areia em estuários bem como a acção das ondas e correntes de marés condicionarem para o transporte de sedimentos de areia das zonas de ante-praia até estuário adentro, na qual os mesmos são depositados.

Vale ressaltar que as classes granulométricas de maior domínio irão depender da intensidade das forças hidrodinâmicas que actuam nestes ambientes. Contudo, o maior domínio da classe de areia na distribuição granulométrica dos testemunhos P e BP (Figuras 10 a 13), reflecte que o regime das condições energéticas num passado recente foi alto pelo facto da ocorrência de menores concentrações de sedimentos pelíticos (silte e argila), que por sua vez depositam-se sob regime de baixa hidrodinâmica.

De acordo com o estudo realizado por Genz (2006), os sedimentos pelíticos em estuários podem ser depositados pelo processo de floculação resultante da mistura de águas fluviais e marinhas que apresentam diferença de cargas iónicas, culminando deste modo para o aumento da densidade e rápida decantação. É bem provável, que as concentrações de sedimentos pelíticos observadas na distribuição granulométrica dos testemunhos, tenham sido resultado do processo anteriormente descrito.

Além disso, Corrêa (2005) em seu estudo associou o processo de floculação resultante da mistura de água doce e salgada com locais de alta profundidade, onde as intensidades das correntes são notavelmente baixas, permitindo de forma mais eficiente na capacidade de agregação das partículas pelíticas. Embora os períodos de maré reversa (transição da maré enchente para vazante) sejam episódicos e de curta duração na ordem de segundos e/ou até poucos minutos, olhando na perspectiva do autor acima mencionado é bem provável que o processo de floculação tenham sido registado em grande predomínio nestes períodos, pelo facto de observar-se o fenómeno que se conhece pelo nome de estofo de maré “*slack water*” onde não há corrente (Frazão, 2003), e de acordo com o clássico diagrama de Hjulstrom (1935) uma vez floculadas e depositadas, para a processo de erosão e transporte as partículas pelíticas devem sofrer influência de altas velocidades de correntes em relação aos períodos de deposição das mesmas.

## **5.2. Parâmetros estatísticos e Velocidade média das correntes**

A partir da relação feita entre resultados referentes ao diâmetro médio apresentados na Tabela 1 e as figuras 14 e 15 correspondentes a velocidade média das correntes, foi possível observar que para cada intervalo em profundidade, na medida que os valores da velocidade das correntes aumentam, os valores de diâmetro também tendem a aumentar, e vice-versa. A relação feita entre as variáveis diâmetro médio e velocidade das correntes entra em concordância com as condições dos resultados encontrados por Corrêa (2005) e Oliveira (2015), onde os sedimentos de diâmetro médio maior e menor foram encontrados em locais que possuem altas e baixas velocidades de correntes respectivamente.

Os mesmos autores associam a variação de diâmetro médio, e conseqüentemente a variação da velocidade das correntes, com as forçantes que contribuem em maior predomínio para os processos sedimentológicos em ambientes estuarinos, nomeadamente: correntes fluviais e de marés. Entretanto, pelo facto do estuário dos Bons Sinais compreender a um complexo estuarino onde também é governado em grande medida pelas correntes fluviais e de marés, é bem provável que a variação da intensidade hidrodinâmica das mesmas forçantes ao longo do tempo tenha sido responsável pela variação da velocidade das correntes e valores de diâmetro médio de sedimentos observados nas figuras 14 e 15 e na tabela 1 respectivamente.

Segundo Folk (1974), o grau de seleção de sedimentos (desvio padrão) está intimamente relacionado com o tamanho das partículas e os resultados referentes ao desvio padrão apresentados

na Tabela 1 apontam para selecção pobre nos intervalos de 3.29-4.60 $\Phi$  e 3.42-3.69 de diâmetro médio para os testemunhos P e BP, respectivamente.

Os intervalos acima mencionados correspondem aos valores de diâmetro médio que apresentam um padrão de tendência granulométrica mais fina na distribuição, este facto comprova os resultados observados por Folk e Ward (1957), onde a selecção torna-se pobre em sedimentos mais finos devido a característica bimodal de classes granulométricas que esta tendência apresenta (mistura de areia muito fina e silte, devido ao carácter coesivo de partículas muito finas).

É afirmativo dizer com base na relação feita entre os resultados das Figuras 14 e 15, e Tabela 1 que correspondem a velocidade das correntes e desvio padrão respectivamente, que a variação de selecção de pobre à moderada está associada ao regime de baixa à alta velocidade das correntes respectivamente. Este fenómeno provavelmente, deve-se ao facto de correntes que possuem maiores velocidades terem a melhor capacidade de selecção de sedimentos em torno da distribuição granulométrica em relação às correntes que possuem menores velocidades, que por sua vez, tem a menor capacidade de selecção de sedimentos.

Vale ressaltar, que resultados similares aos apresentados no presente trabalho foram encontrados por Silva (2012) e Oliveira (2015) sob condições hidrodinâmicas similares, em que a selecção pobre e moderada dos sedimentos em torno da media, foram encontrados em locais que possuem baixas e altas velocidades de correntes respectivamente.

De acordo com Oliveira (2015), o padrão de selecção pobre pode estar associado a mais de um processo deposicional, desta forma é provável que a selecção pobre encontrada no presente estudo seja resultado de mais de um processo deposicional, devido à característica que os ambientes estuarinos apresentam, onde são maioritariamente influenciados por variações de processos deposicionais marinhos e continentais.

### **5.3.Hidrodinâmica inferida com base no diagrama de Pejrup**

Com base no diagrama de Pejrup (1988) ilustrado na figura 16, os resultados das amostras de sedimentos analisadas quanto à textura (tipo e tamanho de sedimentos), pertencentes aos grupos IV-B e IV-C para os testemunhos P e BP, revelam de acordo com as convenções estabelecidas por Pejrup (1988) que o Estuário dos Bons Sinais apresentou-se como um ambiente com fortes condições hidrodinâmicas desde um passado recente até o presente, embora tenham sido registadas ligeiras variações nas velocidades das correntes apresentadas nas Figuras 14 e 15.

Resultados semelhantes aos do presente estudo, foram encontrados nos estudos realizados por Corrêa (2005), Oliveira (2015) e Silva (2012), onde o grupo IV foi registado em locais sob condições de altas velocidades de correntes que não possibilitam a deposição de sedimentos da classe de argila em elevadas concentrações.

## 6. Conclusão

Com base nos resultados obtidos e a discussão feita ao longo do estudo, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- ✓ A distribuição granulométrica de sedimentos em profundidade é caracterizada por 3 classes: areia, silte e argila, sendo areia a classe granulométrica que apresenta maior domínio e argila a que apresenta menor domínio;
- ✓ O diâmetro médio indica que a classe textural com maior predomínio é areia muito fina;
- ✓ Observou-se uma relação entre o selecionamento, diâmetro médio e a velocidade das correntes;
- ✓ Embora tenha se constatado ligeiras variações nas velocidades das correntes estimadas com base no diagrama de Hjulstrom (1935), o Diagrama de Pejrup (1988) indica que o Estuário dos Bons Sinais comportou-se como um ambiente sob elevadas condições hidrodinâmicas ao longo do tempo abrangido por este estudo.

## 7. Recomendações

Para os próximos estudos recomenda-se que:

- ✓ Se melhore o testemunho de colecta de sedimentos, de modo a permitir que se obtenha maior profundidade de colecta das amostras;
- ✓ Se faça um estudo relacionando a variação das condições energéticas e a variação mineralógica, com mais pontos de amostragem ao longo do estuário;
- ✓ Se faça um estudo envolvendo a datação de modo a poder inferir-se sobre os possíveis eventos que contribuíram para variação das condições energéticas.

## 8. Referências Bibliográficas

- António, M. H. (2012). *Hydrodynamics of the BonsSinais Estuary*. Master thesis. Eduardo Mondlane University, Quelimane.
- Boggs, S., Jr. (2005). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. University of Oregon, Fourth edition, Upper Saddle River, New Jersey. 413 p.
- Braga, F. P., Pedro, W., Filho., Alves, M. A., & Pereira, L. C. (2007). *Morfologia e sedimentologia da praia de macromaré de Ajuruteua, Amazônia, Norte do Brasil*. Boletim Paranaense de Geociências., 60 (61): 11-30.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D.W. (1963). *Estuaries*. In: Hill, M. N. (editor). *The Sea*, Vol. 2. John Wiley & Sons, New York. pp 306–324.
- Catelani, P. A. (2013). *A Influência do Gradiente Ambiental do Estuário do Rio Macaé, RJ, na Composição da Ictiofauna: Uma Abordagem das Guildas Ecológicas*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Chaia, E. F. (2015). *Estudo da capacidade de retenção de Amônio e Nitrato no canal com floresta de mangal no estuário Bons Sinais*. Tese de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Corrêa, I. C. S. (2005). *Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA*. Pesquisas em Geociências., 32 (2): 109 – 118.
- Costa, S. (2007). *Caracterização Granulométrica e Diagnóstico Geoquímico dos Sedimentos de Fundo de Parte do Complexo Estuarino Guamaré – RN*. Tese de Bacharel. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., & Boyd, R. (1992). *Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 1130–1146.
- Dias, J. A. (2004). *A Análise Sedimentar e o Conhecimentos dos Sistemas Marinhos*. Universidade do Algarve, Faro. 84 p
- Dyer, K.R. (1995). *Sediment Transport Processes in Estuaries*. In: Perillo, G.M.E. (editor). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. *Developments in Sedimentology*, Elsevier. pp 423-449.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphills Publishing, USA. 182p.

- Folk, R.L., & Ward, W.C. (1957). *Brazos River Bar: a Study in the Significance of Grain Size Parameters*. Journal of Sedimentary Petrology., 27 (1): 3-26.
- Frazão, E. P. (2003). *Caracterização Hidrodinâmica e Morfosedimentar do Estuário Potengi e Áreas Adjacentes: Subsídios para Controle e Recuperação Ambiental no Caso de Derrames de Hidrocarboneto*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Genz, F. (2006). *Avaliação dos Efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre a Circulação Estuarina do Rio Paraguaçu*. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Brasil.
- Hjulstrom, F. (1935). Study of the morphological activity of rivers as illustrated by river fysis. Bulletin of Geological Institute, University of Uppsala., 25: 221-527.
- Ketchum, B. H. (1983). *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier, Amsterdam. 500p.
- Leeder, M. R. (1982). *Sedimentology: process and product*. Chapman; Hall, London. 342 p.
- Lima, M. W., Santos, M. L., Montelo, D. J., Nunes D. M., Alves I. C., & Silva, M. S. (2015). *Análise temporal da composição granulométrica de um estuário Amazônico, Pará, Brasil*. Scientia Plena., 11 (1): 2-11.
- Marcon, G. T. G., & Correa, I. C. S (2001). *Interpretação da dinâmica sedimentar dos depósitos quaternários da região do Médio Alto Uruguai, Rio Grande do Sul, Brasil, através da análise sedimentológica e do Diagrama de Pejrup*. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - ABEQUA - III Encontro do Quaternário Sul-Americano, 2011, Armação dos Búzios. XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA. pp 1-5.
- Miranda, L. B., Castro, B. M., & Kjerfve, B. (2002). *Princípio de Oceanografia Física de Estuários*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo. 424p.
- Muller, G. (1967). *Sedimentary Petrology: Methods in Sedimentary Petrology*. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 283p.
- Neves, L. C. (2013). *Dinâmica sedimentar de uma porção do banco arenoso na desembocadura do sistema estuarino dos rios Piraquê-Açú e Piraquê-Mirím, Aracruz – ES*. Tese de Licenciatura. Universidade Federal do Espírito Santo.

- Oliveira, A. O. (2015). *Caracterização Sedimentar e Aplicação do Diagrama de Pejrup para interpretação da Dinâmica em uma Enseada Estuarina na Lagoa dos Patos/Brasil*. *Geographia Meridionalis.*, 1 (2): 363– 384.
- Oliveira, E. M. (2010). *Erosão, Deposição e Transporte Sedimentar na Ria de Aveiro*. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro, Brasil.
- Paulo, F. Jr., & Castro, P. A. (2001). *Associação vertical de fácies e análise de elementos arquiteturais: concepções concorrentes e complementares na caracterização de ambientes aluviais*. *Revista Electrónica de Ciências da Terra.*, 1: 1-35.
- Paulo, V., Jr. (2009). *Ecofácies e Faciologia dos Sedimentos de Fundo da Baía de Vitória – E.S.* Tese de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Pejrup, M. (1988). *The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach*. In: Boer, P.L., van Gelder, A. e Nio, S.D. (editor). *Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies*. D. Reidel, Dordrecht. pp 289-300.
- Perillo, G. M. E. (1996). *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Elsevier, Amsterdam. 471 p.
- Ponçano, W.L. (1985). *Sedimentação Actual Aplicada a Portos no Brasil*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Quaresma, V. S, Paulo, V., Jr., & Bastos, A. C. (2009). *Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES*. *Revista Brasileira de Geofísica.*, 27 (4): 609-624.
- Shephard, F.P. (1954). *Nomenclature based on sand, silt and clay ratios*. *Journal of Sedimentary Petrology.*, 24: 151-158.
- Silva, F. A. (2012). *Análise do Comportamento Sedimentológico e Hidrodinâmico da Desembocadura Norte do Canal de Santa Cruz- PE*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Silva, F.R. (2016). *Mobilização e Transporte de Conchas Bivalves sob a ação de correntes*. Tese de Bacharel. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Silva, I. M. (2008). *Comparação dos Índices de Qualidade da Água e Usos do Factor de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os Sedimentos da Microbacia do Arroio*

- João Corrêa, São Leopoldo, RS, Brasil. Tese de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.*
- Simmons, G. (2012). *Characterization of Wave and Current Energy Levels in Estuarine Waters for Particulate Dispersion Studies: Case Study Winyah Bay, South Carolina*. Master Thesis. University of South Carolina.
  - Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. Editora Edgard Blucher, USP, São Paulo. 318 p.
  - Suguio, K. (1980). *Rochas sedimentares: Propriedades, gênese, importância e economia*. Edgard Blucher: Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo. 500 p.
  - Timba, I. L. (2014). *Propagação de Onda de Maré no Estuário dos Bons Sinais*. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
  - Uncles R.J., Barton M.L. & Stephens J.A. (1994). *Seasonal Variability of Fine-sediment Concentrations in the Turbidity Maximum Region of the Tamar Estuary*. Est. Coast. Shelf Sci., 38:19-39.
  - Vaasma, T. (2008). *Grain-size analysis of lacustrine sediments: a comparison of pre-treatment methods*. Estonian Journal of Ecology., 57 (4): 231-243.
  - Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications. Amsterdam. 629 p.
  - Venkatramanan S., Chung S.Y. & Ramkumar T. (2014). *Sediment transport patterns, hydrodynamic conditions and clay mineral distributions at Coleroon River Estuary, East Coast of India*. Disaster Advances., 7(7): 67-76.
  - Walker, R. G. & James, N. P. (1992). *Facies models: Response to sea level change*. St. John's, Nfld: Geological Association of Canada. 409p.
  - Wentworth, C.K. (1922). *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. Journal of Geology.,30(5):377-392.
  - Yokoyama, C. K. (2012). *Mobilidade sedimentar da plataforma continental do estado de São Paulo em função da propagação de ondas*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.

## Anexos

**Tabela 2:** Coordenadas geográficas dos pontos de colecta de sedimentos dos testemunhos P e BP

<b>Amostragem</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Testemunho-P	17°52'22.27"S	36°51'23.20"E
Testemunho-BP	17°52'42.09"S	36°51'33.61"E

**Tabela 3:** Granulação, profundidade de colecta e tempo utilizados na pipetagem.

diâmetro (mm)	profundidade de colecta (cm)	Tempo
0.050 - 0.032	20	Imediatamente
0.032 - 0.016	21	3min, 45s
0.016 - 0.008	21	15min
0.008 - 0.002	21	1h
<0.002	21	16h