



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

PEDRO PAULO DE FREITAS

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DO ESTUÁRIO DO RIO COCÓ,
FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.**

**FORTALEZA
2013**

PEDRO PAULO DE FREITAS

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DO ESTUÁRIO DO RIO COCÓ,
FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.**

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes.

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini.

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

-
- O48a Freitas, Pedro Paulo de.
Aspectos hidrodinâmicos do estuário do rio Cocó, Fortaleza, Ceará, Brasil /
Pedro Paulo de Freitas. – 2013.
48 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências
do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2013.
Orientação: Profa. Dra. Maria Oziléa Bezerra Menezes.
1. Circulação estuarina. 2. Estuários semi-árido. I. Título.

CDD 551.4618

PEDRO PAULO DE FREITAS

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DO ESTUÁRIO DO RIO COCÓ,
FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.**

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes

Aprovada em __/__/_____.

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria Ozilea Bezerra Menezes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini (Co-Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Célia Maria de Freitas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela inspiração e fortalecimento espiritual imprescindível para o meu crescimento e desenvolvimento intelectual e pessoal.

A minha amada e estimada Mãe, que lutou bastante para me proporcionar condições de chegar até aqui; estando em todos os momentos ao meu lado educando e apoiando, participando ativamente da minha formação profissional e pessoal. Tudo o que consegui até hoje devo a ela.

A minha namorada, Andreia Alves, pelo companheirismo, compreensão, paciência e amor.

Meus amigos e parte da família, Margareth e Irlano, que me deram suporte nessa caminhada até aqui.

A Profª. Drª. Ozilea pela amizade, orientação, ensinamentos e dedicação para que o trabalho obtivesse sucesso.

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini (Guto), por todo conhecimento passado dentro e fora de sala de aula e pela ajuda imprescindível para as atividades de campo.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo pelos ensinamentos, conselhos e amizade. A ajuda do Prof. Dr Jader Profª. e da Drª. Lidriana Pinheiro, que nos apoiou de forma fundamental para a viabilidade econômica e operacional do trabalho.

Aos meus colegas de curso Andréa “Presidente”, Andréa da Consolação “Consas”, Bruno Catunda “Cacão”, Bruno Moreira “Sem Vergoinho”, Cecília Perdigão “Pitilha”, Clarissa Dantas, Italo Gois “Gosão”, Jailton Nogueira “Jota”, José Filho “Zezão - Nênas”, Lucas Antunes “Chico Bento”, Liana Pacheco “Li”, Pedry Frederico “Pedrxys”, Rayza Araruna “Vila” e Rodolfo Teixeira, pela grande amizade construída.

Ao Marcos Vinicius e Pedro Moraes que me auxiliaram de livre e espontânea vontade no campo.

Ao Gleidison pela disponibilização de tempo para me ajudar na confecção do mapa.

Ao apoio da Companhia de Polícia Militar Ambiental do Estado do Ceará (CPMA), representada pelo soldado Kleverton de Sousa Moraes e o cabo José Raimundo Honorato Filho.

“O conhecimento nos faz responsáveis”. (Che Guevara)

RESUMO

Este trabalho avalia a hidrodinâmica e a variabilidade das propriedades hidrológicas do estuário do rio Cocó (Fortaleza, Ceará). Foram realizadas duas campanhas de 25 horas em condições distintas de maré, sizígia e quadratura, no período seco e de ventos fortes, para coletar dados de velocidade e direção das correntes, variação do nível da água e dados de superfície e fundo de salinidade, temperatura e material particulado em suspensão (MPS). Para a aquisição dessas informações, fez-se uso de um Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (PACD) da marca *NorTek*®, dois equipamentos de registro de condutividade e temperatura (CT) da marca *JFE*®, 50 garrafas *pet* (coleta de água em superfície e fundo a cada uma hora para determinação de MPS), uma garrafa de *Van Dorn* e um GPS (*Global Positioning System*) *Garmin*®. As velocidades das correntes de enchente foram mais intensas do que as de vazante, tanto em sizígia como em quadratura. Essa diferença é constatada no cálculo de duração da enchente (mais rápida) e da vazante (mais lenta). A salinidade e a temperatura apresentaram comportamento homogêneo entre a superfície e o fundo nas duas campanhas, embora na quadratura, maiores diferenças foram registradas, devido a menor amplitude de maré e, conseqüente menor mistura. A variação da concentração de MPS apresentou uma relação direta com a onda de maré, aumentando a concentração na superfície e fundo durante a enchente e diminuindo durante a vazante. A partir desses dados foi calculado o transporte de material particulado, o número de Richardson e os parâmetros adimensionais de circulação para construção do diagrama de Hansen & Rattray (1966). Como resultado desses cálculos respectivamente, obteve-se que o estuário do rio Cocó é um importador de MPS em condição de sizígia e quadratura, com maior transporte negativo na quadratura. Além disso, o estuário comportou-se como altamente turbulento em ambas as condições de maré, embora na quadratura tenham ocorrido momentos em que a estratificação superou a turbulência. O estuário foi classificado como tipo 1a ou verticalmente homogêneo.

Palavras-Chave: Hidrodinâmica estuarina. Estuário raso. Verticalmente Homogêneo.

ABSTRACT

This study evaluates the hydrodynamics of the Cocó river estuary (Fortaleza, Ceará). Two 25-hour campaigns were carried out in different tide conditions during summer time. Water level variation and current speed and direction data were acquired using an Nortek Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Surface and bottom salinity and temperature data were collected using an Nortek Conductivity and Temperature (CT). Surface and Bottom water were collected every hour in order to determine Suspended particulate matter (SPM). Based on the flood time, it was show that the flood current were more intense than the ebb, both during spring and neap tide. The salinity and temperature from surface to bottom showed an homogeneous behavior during most of the time in both campaigns, although during neap tide, small differences were recorded due to the low tidal range and consequent lower mix present on the Cocó river. The variation of the SPM concentration presented a direct correlation with the tidal waves, increasing at the surface and the bottom during floods and then decreasing during ebb tide. The dataset has been used to estimate the transport of particulate material, the Richardson number and the dimensionless circulation parameters to construct the Hansen & Rattray (1966) diagram. These results show that the Cocó river estuary is an importer of SPM in spring and neap tidal conditions, with larger negative transport in neap tides. Furthermore, the estuary behaved as highly turbulent in both tidal conditions, although during neap tide the stratification overcame the turbulence in few situations. The Cocó river estuary was classified as type 1a or vertically homogeneous.

Keywords: Estuarine hydrodynamics. Shallow estuary. Vertically Homogeneous.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa de localização do ponto de coleta.....	20
Figura 2 -	Embarcação utilizada nas duas campanhas.....	21
Figura 3 -	PACD e CT acoplado a estrutura metálica para fundeio....	22
Figura 4 -	CT amarrado a bóia.....	22
Figura 5 -	Garrafa de <i>Van Dorn</i>	23
Figura 6 -	Correlação entre REA e MPS médio.....	28
Figura 7 -	Comparação do MPS obtido pelo método gravimétrico e através do sinal acústico do ADCP.....	29
Figura 8 -	MPS durante a Sizígia a partir do sinal acústico do ADCP.....	29
Figura 9 -	MPS durante a Quadratura a partir do sinal acústico do ADCP.....	30
Figura 10 -	Velocidade longitudinal (sizígia).....	34
Figura 11 -	Velocidade longitudinal (quadratura).....	35
Figura 12 -	Variabilidade da velocidade, salinidade, temperatura e MPS com a onda de maré de sizígia.....	36
Figura 13 -	Variabilidade da velocidade, salinidade, temperatura e MPS com a onda de maré de quadratura.....	37
Figura 14 -	Sistema integrado do abastecimento de água da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).....	39
Figura 15 -	Transporte de Material Particulado em Suspensão (sizígia).....	41
Figura 16 -	Transporte de Material Particulado em Suspensão (quadratura).....	41
Figura 17 -	Número de Richardson na sizígia.....	44
Figura 18 -	Número de Richardson na quadratura.....	44
Figura 19 -	Diagrama Hansen & Rattray na sizígia.....	46

Figura 20 - Diagrama Hansen & Rattray na quadratura.....	46
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do coeficiente de absorção acústica da água em função da frequência e salinidade.....	27
Tabela 2 - Resumo dos resultados da sizígia.....	33
Tabela 3 - Resumo dos resultados da quadratura.....	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Classificação dos estuários.....	14
1.2	Área de estudo.....	16
1.3	Objetivos.....	19
1.3.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	19
1.3.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	19
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1	Tratamento dos dados.....	23
2.1.1	<i>CTs.....</i>	23
2.1.2	<i>ADCP.....</i>	23
2.2	Sincronização dos dados.....	25
2.3	Material Particulado em Suspensão (MPS).....	25
2.3.1	<i>Calibração do PACD para determinação de MPS.....</i>	25
2.4	Cálculo do transporte de Material Particulado em Suspensão (MPS).....	30
2.5	Número de Richardson.....	31
2.6	Diagrama de Hansen & Rattray (1966).....	31
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.1	Transporte do Material Particulado em Suspensão (MPS).....	40
3.2	Estratificação x Turbulência.....	43
3.2	Classificação do estuário de acordo com Diagrama de Hansen & Rattray (1966).....	45
4	CONCLUSÕES.....	48
5	REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

A Zona Costeira do Ceará (ZCC) estende-se por 573 km de linha de costa, abrangendo uma área de 20.120 km², possuindo diversas paisagens e feições características, como praias arenosas, campos de dunas, lagoas costeiras, falésias, tabuleiros litorâneos, rios e estuários com manguezais. (ZCC, 2003).

Os estuários são ambientes transicionais na interface continente-oceano, apresentando papel importante no fluxo de materiais. A palavra estuário é derivada do adjetivo *aestuarium*, cujo significado é maré ou onda abrupta de grande altura, fazendo referência a um ambiente altamente dinâmico, com mudanças constantes em resposta a forçantes naturais (MIRANDA *et.al.*, 2002).

São ambientes geologicamente recentes (menos de cinco mil anos), formados por alterações seculares do nível do mar de natureza eustática (variações do volume de água dos oceanos) ou isostática (variações do nível da crosta terrestre), bem como por processos de origem tectônica (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Existe um grande número de definições para estuários, as quais variam de acordo com a abordagem do ambiente. Partindo de uma definição clássica, Cameron & Pritchard (1963) define estuário como um corpo de água costeiro, semifechado, com uma ligação livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Essa abordagem caracteriza o estuário dentro de uma visão física, embora não inclua explicitamente a maré na definição.

A definição de estuário é expandida por Dione (1963), o qual define o estuário como uma reentrância do mar que atinge o vale de um rio até o limite de influência da maré. A partir disso, ele divide o ambiente estuarino em três setores: estuário inferior ou marinho (região próxima da desembocadura); estuário médio (porção na qual ocorre mistura da água marinha e fluvial); e estuário superior ou fluvial (dominante presença de água doce, mas submetido à ação da maré).

Ao se deslocar pelos setores estuarinos, pode-se observar mudanças nas condições hidrográficas e hidrodinâmicas em função das variáveis: aporte fluvial, maré, e morfologia, que por sua vez são afetadas pelo clima e por interferências antrópicas.

A definição de Kjerfve (1987) aborda a variabilidade dos processos regionais, tais como fatores climáticos, sedimentação e hidrodinâmica, que são responsáveis pela formação e caracterização geomorfológica e fisiográfica de um estuário. Desse modo, estuário é definido como um ambiente costeiro, o qual está conectado de forma restrita com o oceano aberto. A partir disso, o ambiente estuarino é dividido em três zonas: zona de rio (ZR), zona de mistura (ZM) e zona costeira (ZC). A zona de rio consiste no setor fluvial do estuário, apresentando salinidade zero, embora exista influência da maré; a zona de mistura é a região onde ocorrem os processos de interação e mistura da água marinha e fluvial; e a zona costeira é a porção mais a jusante do estuário, estendendo-se até a frente da pluma estuarina. A posição de cada região não é fixa, podendo variar de acordo com as condições de vazão, vento, maré e circulação costeira adjacente.

O trabalho de Dyer (1997, p.6) apresenta o que seria a definição mais satisfatória de estuário, consistindo em uma adaptação à de Cameron & Pritchard (1963), definindo estuário como:

“um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite de influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

1.1 Classificação dos estuários

Levando-se em consideração as variáveis climáticas, hidrográficas, topográficas e oceanográficas são estabelecidos critérios para a classificação dos corpos estuarinos.

Quanto ao balanço de água, o ambiente estuarino pode ser classificado como positivo, inverso e baixo fluxo. (VALLE-LEVINSON, 2010). Os estuários positivos são os que apresentam adição de água doce (descarga fluvial, precipitação e degelo) superior a perda por evaporação ou congelamento.

Os estuários inversos são tipicamente encontrados em regiões áridas, nas quais as perdas por evaporação excedem a adição de água doce por precipitação e descarga. Eles são denominados inversos em razão ao aumento da densidade da água em direção ao continente.

Os estuários de baixo fluxo também ocorrem em regiões de altas taxas de evaporação, entretanto com pequena influencia da descarga do rio. Durante a estação seca e quente, os processos de evaporação podem causar a formação de uma Zona de Salinidade Máxima (ZSM). Da ZSM em direção ao continente a densidade da água decresce de modo similar a um estuário positivo. Da ZSM em direção ao oceano, a densidade da água aumenta como um estuário inverso. Ou seja, A ZSM atua como barreira do fluxo a jusante do rio e da intrusão salina do fluxo marinho (VALLE-LEVINSON, 2010).

Quanto à geomorfologia, os estuários são classificados como: planície costeira, fiorde, construído por barra e tectônicos (PRITCHARD, 1952).

Os estuários de planície costeira são estuários formados durante o processo de transgressão marinha no Holoceno; são geralmente rasos, localizados em regiões tropicais e subtropicais, sendo comuns no Brasil e nordeste brasileiro (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Os fiordes foram formados em regiões de altas latitudes que durante o pleistoceno estavam cobertas por calotas de gelo, as quais efetivaram um processo erosivo intenso ocasionando a formação de vales de rios profundos com um fundo rochoso alto na entrada, denominado soleira (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Estuários construídos por barra foram formados por inundação de vales primitivos de rios durante a transgressão marinha, entretanto por sedimentação recente apresentam barras na desembocadura (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Os demais estuários são formados por outros processos, tais como processos tectônicos, fraturas, falhas e até mesmo erupções vulcânicas (Dyer, 1997).

Quanto à estrutura vertical de salinidade os estuários são classificados como: altamente estratificados ou cunha salina, moderadamente estratificados e verticalmente homogêneos (Pritchard, 1955; Cameron & Pritchard, 1963).

Estuários de cunha salina apresentam grandes descargas fluviais e pequenas amplitudes de maré, por esse motivo a existência de uma preponderante picnoclina no perfil vertical de salinidade. (VALLE-LEVINSON, 2010). Nesses estuários ocorre o processo de entranhamento, que promove a subida de água salgada das camadas inferiores para a superfície, promovendo mistura (Cameron & Pritchard, 1963).

O estuário moderadamente estratificado resulta de condições de moderada a forte maré e de fraca a moderada descarga fluvial. Nele é possível identificar uma fraca picnoclina e um fluxo de intercâmbio mais vigoroso devido a mistura entre a água fluvial e marinha (VALLE-LEVINSON, 2010).

Por sua vez, o estuário verticalmente homogêneo é comum de regiões de grandes amplitudes de maré e fraca descarga fluvial, apresentando desse modo perfil vertical de salinidade praticamente uniforme e fluxos unidirecionais com a profundidade (VALLE-LEVINSON, 2010).

Esse tipo de estuário pode apresentar estratificação lateral ou não. Os com variação lateral apresentam uma grande razão entre a largura e profundidade, além de a força de Coriolis exercer papel fundamental na estratificação, aumentando salinidade na margem esquerda do estuário e concentrando água doce do lado direito, no hemisfério norte. O estuário sem estratificação lateral apresenta canais estreitos, o que promove cisalhamento lateral e condições homogêneas. (MIRANDA *et.al.*, 2002, p.102).

1.2 Área de Estudo

Ao longo da costa setentrional brasileira entre o Rio Grande do Norte e o Piauí apresenta uma climatologia semi-árida, onde se encontram dezenas de pequenos estuários.

O Estado do Ceará, inserido neste contexto, apresenta bacias hidrográficas diretamente impactadas por barragens e pelo clima semi-árido, o que proporciona reflexos na hidrodinâmica de seus estuários. Esses podem ser considerados com características tipicamente estuarinas de circulação e mistura somente no período chuvoso (MORAES & PINHEIRO, 2011).

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a hidrodinâmica e a variabilidade das propriedades hidrológicas do estuário do rio Cocó, localizado no município de Fortaleza, Ceará, durante o período seco, o qual se estende, no Estado do Ceará, de Julho a Novembro (Campos et al.2000).

O rio Cocó nasce na serra de Aratanha (Pacatuba – Ceará) e passa por três municípios, Pacatuba, Maracanaú e Fortaleza até desaguar no oceano Atlântico nos limites das praias do Caça e Pesca e Sabiaguaba, no litoral leste do estado do Ceará, na cidade de Fortaleza. Inicialmente recebe a denominação de riacho Pacatuba e, após receber as águas de outros tributários passa a se chamar riacho Gavião até a confluência com o riacho Alegrete, próximo ao 4º Anel Rodoviário, onde recebe a denominação de rio Cocó. (PESSOA, 2002).

Inserido na bacia hidrográfica metropolitana, drena uma área de aproximadamente 500 Km², desenvolvendo-se no sentido sul/norte por longo trecho de seu percurso de 50 Km, formando, em direção a foz, uma acentuada curva de sudoeste para leste. (SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS, 2010). Apresenta uma vazão média de 6 m³/h e um volume médio de material aportado de 7.131 m³/ano (ZCC, 2003).

O Plano Diretor de Drenagem divide a bacia do rio Cocó em três grandes sub-bacias. A primeira, com uma área de 91,3 Km² corresponde à parte superior do rio, controlada pelo açude do Gavião, localizado no Município de Pacatuba, onde o mesmo tem capacidade de 32,90 m³, com uma vazão afluente de 24,91 hm³/ ano (SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS, 2010); a segunda engloba tanto a área a jusante do açude, drenada pelo próprio Cocó, como aquela drenada pelo riacho Lameirão com uma área de 230,2 Km²; e a terceira compreende as áreas drenadas pelo rio Cocó e seu afluente rio Coaçu, com 195,7 Km². (AUTARQUIA MUNICIPAL DE FORTALEZA, 1987).

Do ponto de vista geomorfológico, a área da bacia do rio Cocó pode ser dividida em cinco unidades geoambientais: Planície Litorânea, Planície Flúvio-Marinha, Planície Fluvial Inundável, Planície Fluvial Não Inundável e Superfície de Tabuleiros. (AUTARQUIA MUNICIPAL DE FORTALEZA, 1987).

O clima predominante na microrregião onde está localizada a bacia de drenagem do rio Cocó, de acordo com a classificação de Köppen, é considerado como sendo do tipo AW' o que corresponde ao tropical chuvoso, quente e úmido, com chuvas concentradas no verão e outono. (IPLANCE, 1989, 1995).

A contaminação por efluentes industriais e domésticos, a má ocupação das margens, bem como o desmatamento da vegetação ciliar e de mangue são uns dos grandes problemas existentes na bacia. Estas problemáticas serviram de justificativas para a criação em 1986 de uma Área de Proteção Ambiental (APA) no rio Cocó, através do decreto Municipal de Fortaleza Nº 7.302. Posteriormente, por meio dos decretos estaduais Nº 20.253, de 05 de setembro de 1989 e Nº 22.587, 08 de Junho de 1993 foi delimitado uma área de 1.155,2 hectares no município de Fortaleza destinada à criação do Parque Ecológico do Cocó, o qual se estende da BR-116 à desembocadura. (SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Com a criação das unidades de conservação, o ecossistema manguezal do baixo curso do rio Cocó manteve-se preservado, embora sofra constantes pressões antrópicas referentes à má ocupação e especulação imobiliária. O manguezal do Rio Cocó em seus trechos preservados formam uma mata de mangues situados no centro de Fortaleza, onde várias espécies de moluscos, crustáceos, peixes, répteis, aves e mamíferos compõem cadeias alimentares com ambientes propícios para reprodução, desova, crescimento e abrigo natural. (SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Além da importância regional no que concerne ao ecossistema manguezal, existe um contexto global de ocupação urbana, tendo em vista que cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor da Terra estão localizadas nas proximidades dos estuários, o que faz com que esses ambientes sejam uma das mais valiosas regiões de nosso planeta.

Este trabalho visa compreender os processos hidrodinâmicos e hidrológicos do estuário do rio Cocó no período seco, correlacionando à variabilidade temporal da salinidade, temperatura, densidade, material particulado em suspensão e correntes com a oscilação da maré na sizígia e na quadratura. Tal estudo é de fundamental importância, tendo em vista o grande

valor ecológico do ambiente e o incipiente conhecimento acerca da hidrodinâmica do estuário, havendo apenas dois trabalhos, um publicado por Vasconcelos (1985) e outro realizado por Schettini (2011).

O trabalho está subdividido em 5 secções, onde a primeira é a Introdução, com as classificações de estuário, características da área de estudo e os objetivos geral e específicos; a segunda é o Material e Métodos; a terceira corresponde a Resultados e Discussões, a quarta são as Conclusões e ao fim, as Referências Bibliográficas são apresentadas na quinta secção.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Avaliar durante duas situações distintas de maré, sizígia e quadratura, as variáveis que controlam a hidrodinâmica do estuário do rio Cocó – Fortaleza, Ce.

1.3.2 Objetivos Específicos

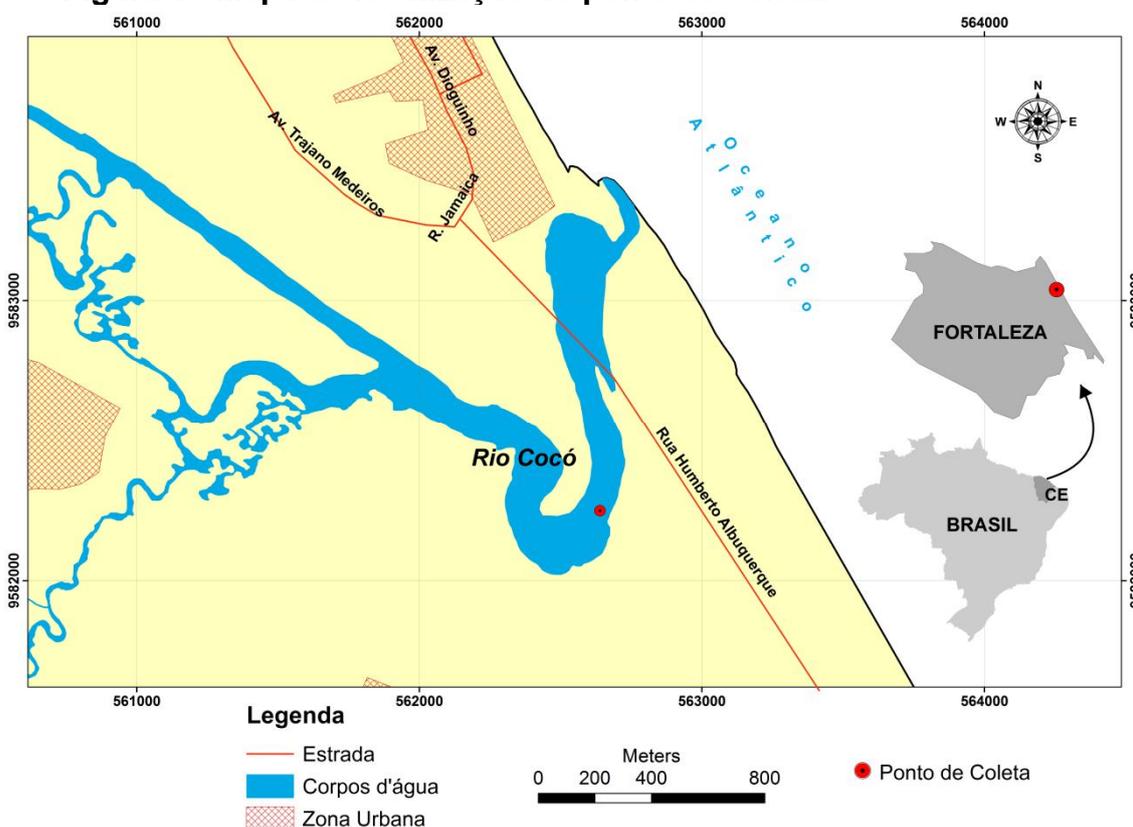
Em sizígia e quadratura:

- Analisar estrutura vertical de velocidade.
- Avaliar variabilidade temporal das propriedades hidrológicas (salinidade, temperatura e densidade).
- Estimar o transporte de material particulado no estuário do rio Cocó.
- Avaliar a estratificação e a turbulência do estuário através do número de Richardson.
- Classificar o sistema estuarino através do diagrama de Circulação-Estratificação de Hansen & Rattray (1966).

2. MATERIAL E MÉTODOS

A fim de se caracterizar as condições hidrodinâmicas e a variabilidade das propriedades hidrológicas do estuário do rio Cocó, Fortaleza, Ceará, foram realizadas duas campanhas oceanográficas em condições distintas de maré no mês de agosto, período de pequena pluviosidade e ventos fortes. Estas campanhas ocorreram em um mesmo ponto localizado no talvegue do estuário, o qual consiste na porção mais profunda do canal estuarino. O mapa de localização das coletas é representado na figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização do ponto de coleta.



Fonte: o autor, 2013.

A primeira campanha ocorreu nos dias 2 e 3 de agosto de 2012 em condição de maré de sizígia (lua cheia), enquanto que a segunda foi efetuada nos dias 9 e 10 de agosto sob efeito de maré de quadratura (lua minguante). Ambos os trabalhos tiveram duração de 25 horas, compreendendo uma amostragem de um ciclo completo de maré. Foram coletados dados de velocidade e direção das correntes, variação do nível da água e dados de

superfície e fundo de salinidade, temperatura e material particulado em suspensão (MPS).

Para a aquisição dessas informações, fez-se uso de um Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (PACD) da marca *NorTek*®, duas sondas que medem Condutividade e Temperatura (CT) da marca *JFE*®, uma garrafa de *Van Dorn* (coleta de água em superfície e fundo a cada uma hora para determinação de MPS), 50 garrafas *pet* (armazenamento da água), um GPS (*Global Positioning System*) *Garmin*® e uma embarcação, representada na figura 2.

Figura 2 - Embarcação utilizada nas duas campanhas.

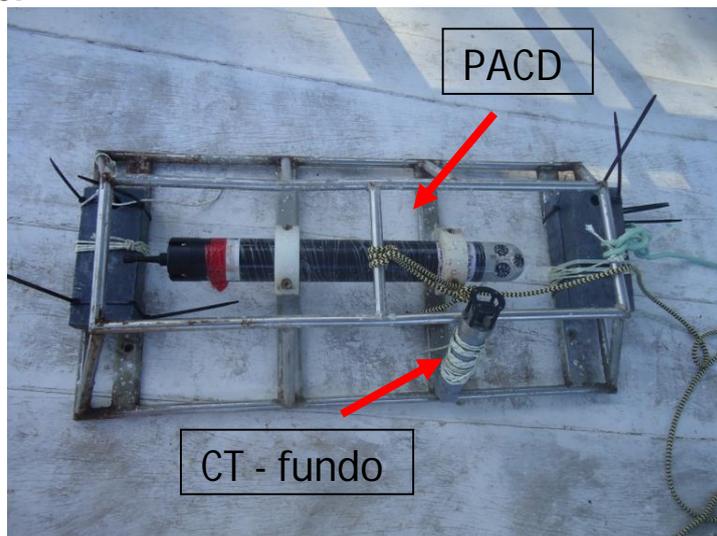


Fonte: o autor, 2013.

O PACD foi configurado para coletar dados em uma frequência de 1Hz, onde a cada 10 minutos coletava-se informação com células de registro de 35 centímetros. Os CTs, por sua vez, foram pré-configurados para cada 10 minutos realizarem 30 amostragens em intervalos de 1 segundo.

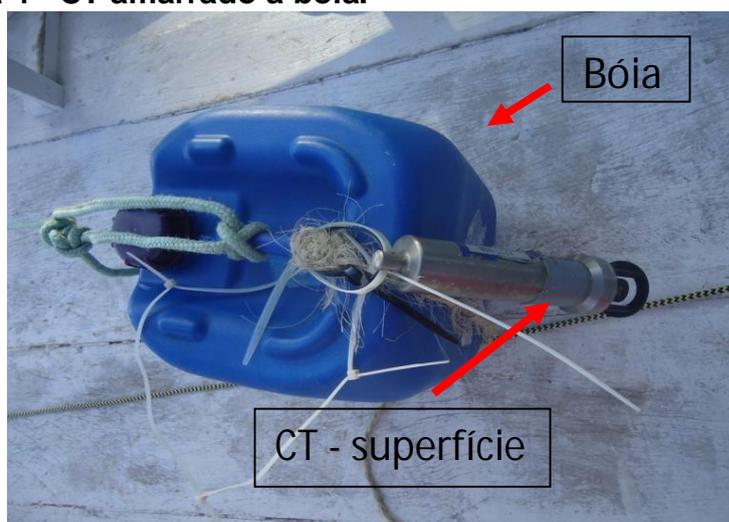
O PACD foi acoplado a uma estrutura metálica com uma base de chumbo para garantir estabilidade do equipamento durante as 25 horas. Um CT foi fixado nesta estrutura para registro da condutividade e temperatura do fundo, enquanto que outro CT foi amarrado à bóia que marcava a posição do fundeio, com a finalidade de coletar dados de condutividade e temperatura da superfície.

Figura 3 - PACD e CT acoplado a estrutura metálica para fundeio.



Fonte: o autor, 2013.

Figura 4 - CT amarrado a bóia.



Fonte: o autor, 2013.

A cada hora era realizada a coleta de água da superfície e do fundo em unicata por meio de uma garrafa de *Van Dorn* e realizado o armazenamento em garrafas *pet* de 1 litro para posterior quantificação de MPS.

Figura 5 – Garrafa de Van Dorn.



Fonte: o autor, 2013.

2.1 Tratamento dos dados

2.1.1 CTs

Os CTs utilizados armazenaram as informações coletadas em um formato de arquivo denominado *raw*. Foi realizada a conversão para o formato *csv* (valores separados por vírgula), pelo próprio programa do equipamento, para posterior utilização dos mesmos no programa *Matlab*®.

Como a programação dos CTs ocorreu antes do início das atividades no campo, o equipamento registrou dados fora da água. Esses foram retirados a partir da delimitação do horário de início e fim das atividades de coleta.

Com pacotes de rotinas no *Matlab*® foi realizado o cálculo da salinidade a partir da condutividade registrada. Feito isso, pode-se calcular a densidade a partir da temperatura e salinidade.

2.1.2 PACD

O PACD armazenou todos os dados coletados em um arquivo de formato binário. Para um tratamento em ambiente *Matlab*®, foi necessário realizar a conversão deste para formato de texto. Essa conversão deu-se por meio do programa *Aquapro*®, disponibilizado pela *Nortek*®. Neste processo foram gerados oito novos arquivos, um correspondendo ao resumo da aquisição dos dados, três ao registro da amplitude do eco, três referentes às

componentes u , v e w de velocidade e um último arquivo com o tempo da coleta e o registro do sensor de pressão. Feito isso, os dados estavam prontos para serem carregados e tratados no programa *Matlab*®.

Como o equipamento foi programado apenas uma vez e utilizado em duas campanhas, os dados dos dois campos estavam em um mesmo arquivo. A separação foi realizada por meio do registro do sensor de pressão, pelo qual foi possível identificar o início e fim de cada coleta a partir de índices matriciais, que permitiram a manipulação dos dados de sizígia e quadratura separadamente.

Para cada campanha foi calculado a velocidade e a direção por relação trigonométrica das componentes longitudinais e transversais (u e v) de velocidade.

A direção e o sentido das velocidades registradas no PACD estão referidos ao norte magnético por uma bússola interna no equipamento. Para determinação das direções das correntes, foi obtido o ângulo formado entre as componentes u e v de velocidade. Para o estuário do rio Cocó está direcionado ao norte geográfico, esta direção precisou ser rotacionada através de uma subtração pela maior direção predominante. Esse valor foi obtido por meio de um histograma, no qual foi possível identificar a distribuição bimodal das direções, sendo 217° e 54° na sizígia e 223° e 47° na quadratura.

A partir da direção rotacionada a velocidade resultante foi recalculada, convencionando-se o sentido positivo para fluxo à jusante e sentido negativo para fluxo à montante.

Por fim, de acordo com o tamanho das células de coleta e do *blank* do equipamento, foram criados níveis igualmente espaçados para a representação gráfica da velocidade. As células estão espaçadas a cada 0.35 metros e o *blank* do equipamento corresponde a 0.4 metros. Desse modo, os dados dos primeiros 0.4 metros abaixo da superfície e 0.75 metros do fundo (tamanho da célula somado ao *blank*) foram considerados espúrios.

2.2 Sincronização dos dados

Como foram utilizados equipamentos diferentes, os dados encontravam-se distribuídos de forma heterogênea no tempo. Desse modo, foi realizada uma sincronização dos CTs de superfície e fundo e dos dados de material particulado em suspensão em função do tempo do ADCP.

Realizado esse processo, os dados encontravam-se reduzidos e prontos para cálculos e análises.

2.3 Material Particulado em Suspensão (MPS)

O MPS foi quantificado em laboratório por método gravimétrico, ou seja, pela diferença de peso do filtro antes e depois da filtração.

Os filtros utilizados foram de fibra de vidro da Millepore AP040 com especificação de 0,45 μm de poro e 47 mm de diâmetro. Estes foram previamente pesados por meio de uma balança analítica.

Para cada garrafa de 1 litro de amostra, retirou-se 100 ml para filtração. Este processo foi realizado através do uso das membranas e de uma bomba à vácuo acoplada a um *erlenmeyer*.

Após filtrar todas as amostras, as membranas foram levadas a uma estufa a 65°C durante 24 horas. Passado esse período, os filtros foram pesados novamente, e determinado a concentração de material particulado.

2.3.1 Calibração do PACD para determinação de MPS

Como o PACD realiza perfis abrangendo toda a coluna de água, a calibração do mesmo para quantificação de material particulado em suspensão torna-se importante pela satisfatória resolução temporal e espacial proporcionada pelo equipamento (Zaleski & Schettini 2006).

A calibração se deu a partir dos dados acústicos do PACD e de MPS (mg/L) da campanha da sizígia. A partir disso obteve-se um modelo que foi aplicado a campanha da quadratura.

Para calibrar o sinal do PACD para a quantificação de material particulado em suspensão na água, Nortek (2001) determina que sejam realizados 2 procedimentos:

- 1) Conversão da unidade da amplitude acústica registrada pelo equipamento.
- 2) Normalização dos dados, de modo que os mesmos tornem-se independentes da profundidade em que foram coletados.

1) A amplitude acústica (Amp) registrada pelo PACD está em uma unidade de contagem interna do equipamento e esta deve ser convertida para decibéis, tornando-se, desse modo, potência sonora. O fator de conversão utilizado para transformar a amplitude do equipamento em amplitude acústica corrigida (Ampc) foi de 0.43, representado na equação 1:

$$Ampc = (Amp * 0.43 - r) \quad (1)$$

Onde o r corresponde ao ruído do equipamento quando o mesmo encontrava-se fora da água, representado neste cálculo com o valor de contagem interna do PACD de 27.

2) A normalização dos dados requer que seja feita a compensação da perda acústica, resultante de interferências e atenuações no sinal acústico emitido pelo equipamento. Desse modo foi calculado o Retro Espalhamento Acústico (REA) a partir da Amplitude Acústica Corrigida (Ampc) e os termos de perda representados na equação 2:

$$REA = Ampc + 20 * \log(R) + 2 * \alpha_w * (R) + 20 * (R) * [\alpha_p * dr] \quad (2)$$

Onde o R é a distância ao longo do feixe acústico, calculado a partir da razão entre a profundidade e o cosseno de 25. Enquanto que α_w representa o coeficiente de absorção da água em dB/m, estando em função da frequência,

salinidade e pressão; e o α_p representa a atenuação de partículas, que está sendo integrado na profundidade (dr). (Nortek, 2001).

Tabela 1 - Valores do coeficiente de absorção acústica da água em função da frequência e salinidade.

Frequência (MHz)	α (dB/metro)	
	Sal = 0 psu	Sal = 35 psu
10.0	26.9	26.9
3.0	2.4	2.9
1.5	0.6	0.7
0.5	0.07	0.14

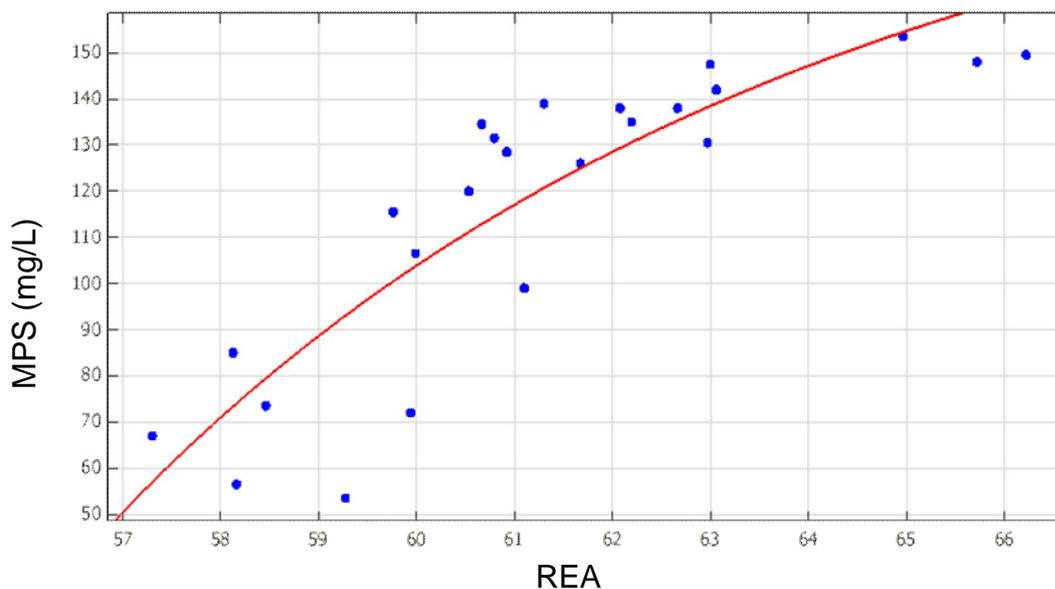
Fonte: (Nortek, 2001).

Os termos na equação 2 após a amplitude acústica corrigida consistem na compensação da perda acústica. O primeiro termo, denominado termo geométrico, é a correção referente à emissão dos feixes acústicos na forma de cone. O segundo termo é a correção acerca da transferência molecular de energia acústica para calor, a qual é dependente de variáveis como pressão e salinidade. O terceiro termo corrige a perda ocasionada pelo espalhamento e absorção de energia acústica por partículas na água (Nortek, 2001). Este último termo é usualmente ignorado para cálculos.

Realizado esse procedimento, foi obtido valores de retro espalhamento acústico a cada 10 minutos em toda a coluna de água. Por outro lado, havia somente 25 valores de MPS de superfície e de fundo da campanha da sizígia. Para uma correlação desses dados em um mesmo tempo, foi realizada uma interpolação no tempo do PACD entre o MPS médio da coluna de água e o REA médio.

A partir de ferramentas estatísticas do *Matlab*®, foi obtido uma curva entre REA médio e MPS médio da campanha da sizígia, representado na figura 6.

Figura 6 - Correlação entre REA e MPS médio da sizígia.



Fonte: o autor, 2013.

O r^2 da curva foi de 0.75 e a equação obtida a partir dessa curva foi:

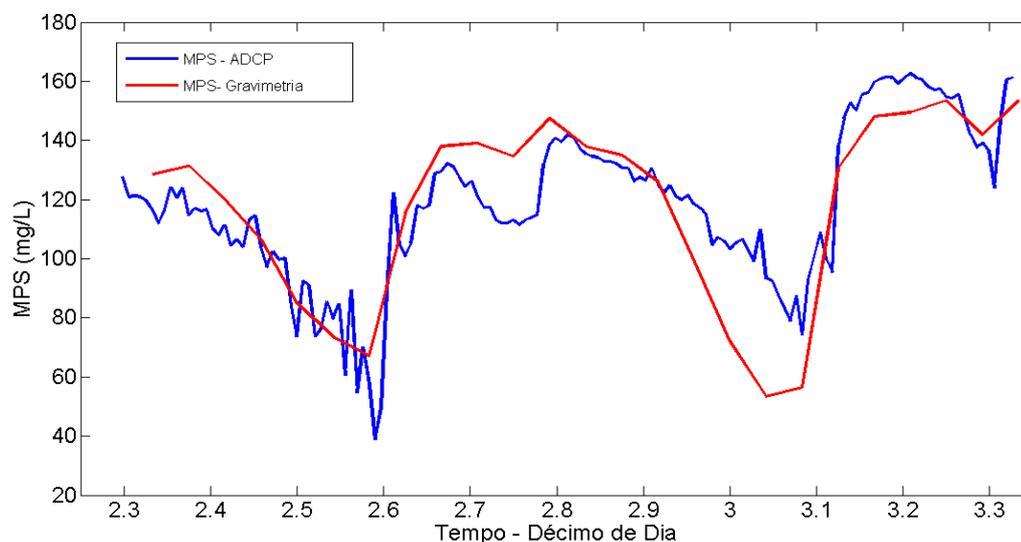
$$MPS = -5.063e+015 \cdot REA + (-7.683) + 214.5 \quad (3)$$

Onde, a partir dessa equação 3 é possível quantificar o material particulado em suspensão na coluna de água a partir do retro espalhamento acústico.

Desse modo, enquanto antes só havia 25 valores para superfície e 25 valores para fundo, após a calibração passa existir estimativas de valores de MPS a cada 10 minutos em toda a coluna de água.

A proximidade dos valores de MPS obtidos pelo método gravimétrico e pelo método acústico é visto na figura 7. A partir da coerência dos dados e confiabilidade do modelo gerado, a equação 3 para cálculo de MPS foi aplicada para os dados da campanha da quadratura.

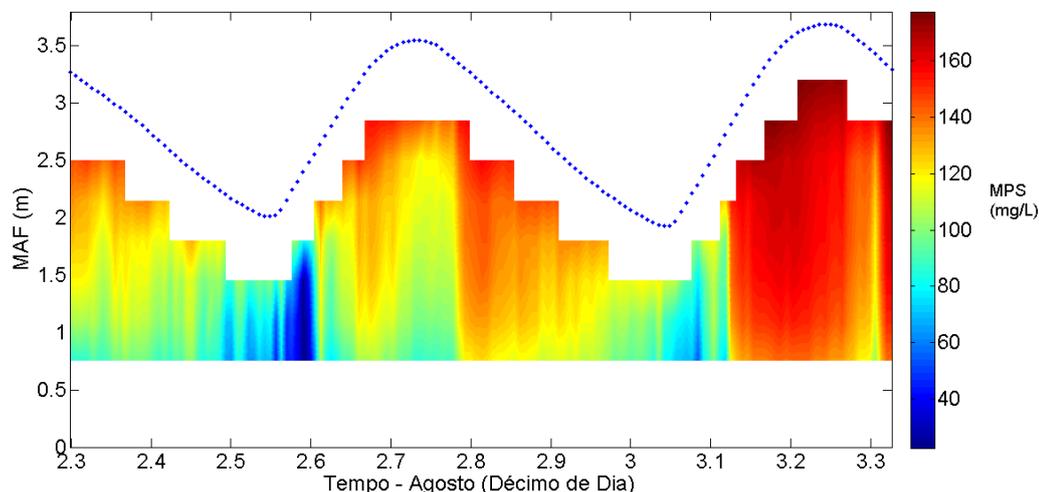
Figura 7 - Comparação do MPS obtido pelo método gravimétrico e através do sinal acústico do PACD durante a sizígia.



Fonte: o autor, 2013.

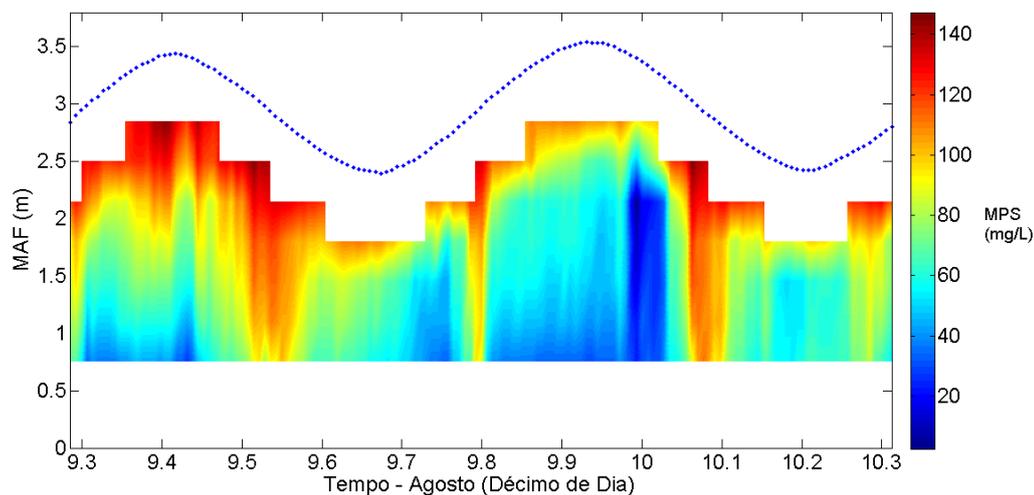
Como o PACD realiza perfis em toda coluna de água, foi possível, a partir da equação 3 de determinação de MPS, representar a concentração de material particulado em suspensão em toda coluna de água em uma série temporal de 25 horas, para as campanhas da sizígia e quadratura, visualizadas nas figuras 8 e 9, respectivamente, onde o eixo y representa metros acima do fundo (MAF), eixo x o tempo em décimo de dia e a barra lateral a concentração de MPS (mg/L).

Figura 8 - MPS durante a Sizígia a partir do sinal acústico do PACD.



Fonte: o autor, 2013.

Figura 9 - MPS durante a Quadratura a partir do sinal acústico do PACD.



Fonte: o autor, 2013.

2.4 Cálculo do transporte de Material Particulado em Suspensão

A partir da concentração de MPS e da velocidade das correntes, foi possível calcular o transporte de material particulado em suspensão no estuário do rio Cocó.

Primeiramente, foi feita a conversão da unidade de MPS de mg/L para Kg/m^3 . Em seguida, foram separados os valores de velocidade e MPS da superfície e fundo provenientes do PACD.

Feito isso, foi realizado o produto entre a velocidade (m/s) e a concentração de MPS (Kg/m^3), obtendo-se o transporte de material particulado na superfície e no fundo em $\text{Kg/m}^2.\text{s}$ (Schettini & Zaleski, 2006). Por fim, foi realizada a média desse transporte na coluna de água e calculado se o estuário apresenta condição de exportador ou importador de material particulado.

2.5 Número de Richardson

A fim de se comparar a capacidade estabilizadora do gradiente vertical de densidade $\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)$ com aquela desestabilizadora do cisalhamento da velocidade $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$, foi realizado o cálculo do número adimensional de Richardson, representado na equação 4, o qual é um importante indicador de mistura vertical no estuário (MIRANDA *et.al.*, 2002).

$$Ri = -\frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

Onde Ri, representa o número de Richardson, g é a gravidade (9.8m/s^2), ρ a densidade, u a velocidade e z a profundidade.

2.6 Diagrama de Hansen & Rattray (1966)

A classificação de estuários proposta por Hansen & Rattray (1966) foi utilizada para esse estudo. Vários trabalhos em Oceanografia Física dos sistemas estuarinos utilizam esse método para a classificação dos mesmos (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Essa classificação é baseada em dois parâmetros hidrodinâmicos adimensionais: o parâmetro de estratificação e o parâmetro de circulação. O primeiro consiste na razão entre a diferença da salinidade de fundo e superfície (δS) e a salinidade média. Quando essa razão apresenta valores acima de 1, indica estratificação, enquanto que em condições de fraca estratificação a razão atinge valores abaixo de 1. O parâmetro de circulação é a razão adimensional entre a velocidade do fluxo próximo a superfície e a velocidade média da coluna d'água. Esse parâmetro avalia a circulação gravitacional, apresentando valores próximos de 1 em estuários com fluxo local unidirecional e valores maiores que 10, em estuários de forte circulação gravitacional (GEYER, 2010).

A partir desses parâmetros adimensionais é calculado um parâmetro denominado v o qual oscila entre 0 e 1 e é utilizado para a caracterização do transporte natural de sal nos estuários. Quando v é igual a 1 o transporte de sal é dominado por difusão turbulenta, não existindo circulação gravitacional e apresentando um fluxo local unidirecional no estuário. Porém, quando v aproxima-se de 0 o transporte de sal é realizado por advecção e os processos de mistura são fracos (GEYER, 2010).

Calculado todos esses parâmetros, se é construído um diagrama cartesiano ortogonal, com os eixos X e Y representando o parâmetro de circulação e o parâmetro de estratificação, respectivamente.

De acordo com a posição que o ponto é plotado no diagrama, resultado dos parâmetros adimensionais calculados, configura-se uma classificação em 4 tipos de estuários.

Tipo 1: O fluxo resultante é estuário abaixo em todas as profundidades, com transporte de sal à montante realizado por difusão turbulenta.

Tipo 2: O fluxo resultante reverte com a profundidade, havendo transporte de sal à montante por processos advectivos e dispersivos.

Tipo 3: Apresenta transporte de sal à montante, quase exclusivamente pelo processo advectivo.

Tipo 4: Esse tipo tem estratificação de salinidade máxima corresponde aos estuários já classificados como cunha salina (MIRANDA *et.al.*, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resumos dos dados coletados nas campanhas da sizígia e quadratura são apresentados nas tabelas 2 e 3, respectivamente abaixo.

Tabela 2 – Resumo dos resultados da sizígia.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Velocidade (superfície)	-0.51 m/s	0.48 m/s	-0.01 m/s	0.23 m/s
Velocidade (fundo)	-0.51 m/s	0.39 m/s	-0.007 m/s	0.27 m/s
Salinidade (superfície)	12.29	37.32	24.80	17.69
Salinidade (fundo)	12.46	37.57	25.01	17.75
Temperatura (superfície)	26.14 °C	28.69 °C	20.24 °C	1.80 °C
Temperatura (fundo)	26.14 °C	28.72 °C	20.25 °C	1.82 °C
MPS (superfície)	70.93 mg/L	177.45 mg/L	124.19 mg/L	75.32 mg/L
MPS (fundo)	22.57 mg/L	141.21 mg/L	81.89 mg/L	83.89 mg/L

Fonte: o autor, 2013.

Tabela 3 – Resumo dos resultados da quadratura

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Velocidade (superfície)	-0.26 m/s	0.15 m/s	-0.02 m/s	0.09 m/s
Velocidade (fundo)	-0.47 m/s	0.34 m/s	-0.01 m/s	0.10 m/s
Salinidade (superfície)	4.35	36.80	20.57	22.94
Salinidade (fundo)	4.95	37.02	20.98	22.67
Temperatura (superfície)	26.25 °C	28.95 °C	27.60 °C	1.90 °C
Temperatura (fundo)	26.25 °C	28.95 °C	27.60 °C	1.90 °C
MPS (superfície)	78.85 mg/L	147.28 mg/L	113.06 mg/L	48.38 mg/L
MPS (fundo)	22.57 mg/L	111.74 mg/L	67.15 mg/L	63.05 mg/L

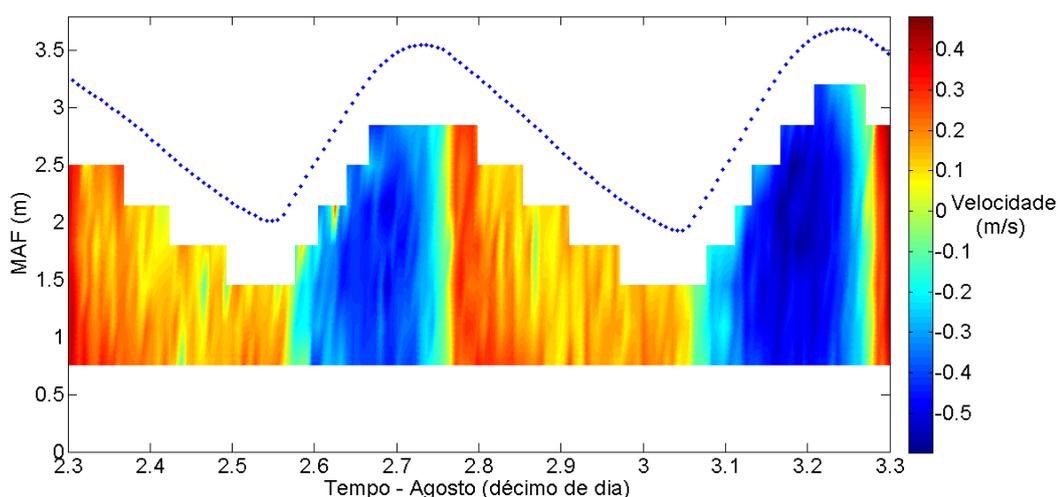
Fonte: o autor, 2013.

As velocidades das correntes, tanto de superfície como de fundo, foram mais intensas em condição de sizígia do que em quadratura. Entretanto, em ambas as campanhas as velocidades de enchente (negativas) apresentaram-se maiores que as velocidades de vazante (positivas).

Essa diferença é entendida analisando as figuras 10 e 11, nas quais está representado o perfil vertical de velocidade das duas campanhas; onde a linha tracejada azul representa a variação do nível da água com a maré, o eixo y representa metros acima do fundo (MAF), enquanto que as porções de cor azul são velocidades negativas (enchente) e as de cor avermelhada representam velocidades positivas (vazante).

É visível a diferença na duração da enchente e da vazante no estuário, mais preponderante na sizígia e de forma discreta na quadratura. Tal fato evidencia a assimetria temporal da onda de maré que demora 4.56 horas para encher e 7.44 horas para vazar, em condição de sizígia, enquanto que em quadratura despense 6 horas para encher e 6.24 horas para vazar. Por esse motivo, para que o balanço de massa dentro do estuário permaneça constante, as velocidades de enchente são maiores que as de vazante.

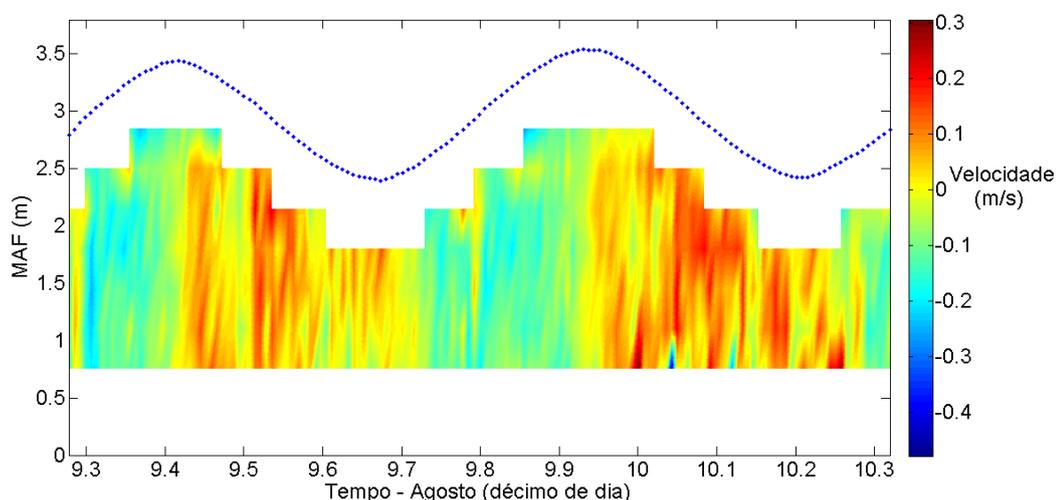
Figura 10 - Velocidade longitudinal (sizígia).



Fonte: o autor, 2013.

Os perfis verticais de velocidade apresentaram-se homogêneos, ao longo das 25 horas, em ambas as campanhas, apresentando variação controlada pela oscilação da onda de maré. Contudo, na quadratura registrou-se uma maior quantidade de ruídos na coleta dos dados de velocidade, perceptível na forma gráfica heterogênea de alguns instantes da figura 11, nos perfis em torno de 10 a 10.1 dia de agosto, por exemplo, onde se tem registro de velocidades negativas elevadas em pleno processo de vazante.

Figura 11 - Velocidade longitudinal (quadratura).

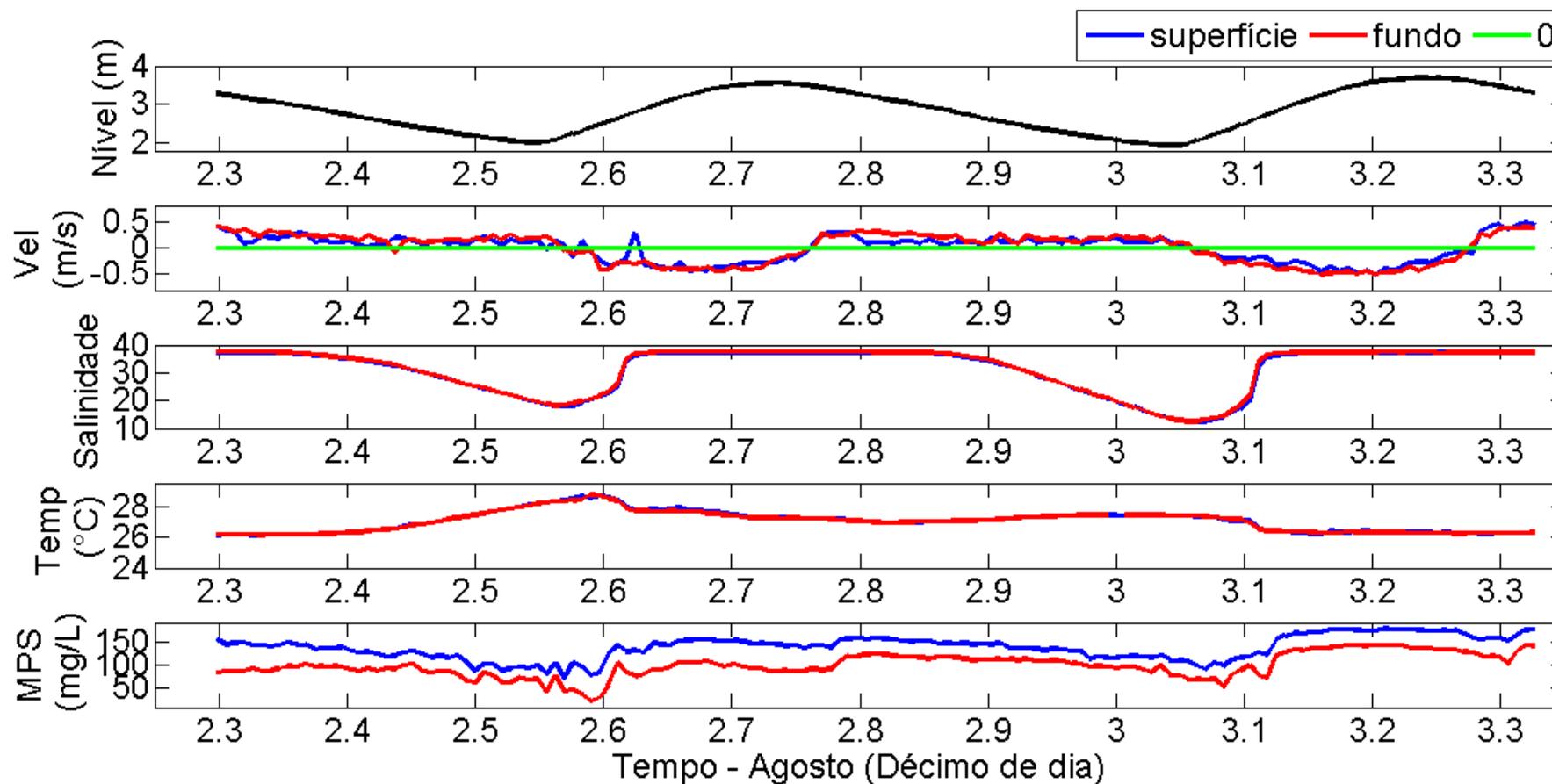


Fonte: o autor 2013.

As figuras 12 e 13 apresentam a variação da velocidade, salinidade, temperatura e material particulado de superfície e fundo ao longo do tempo em condição de maré de sizígia e quadratura, respectivamente. A linha preta representa a variação do nível da água com a maré, enquanto que as linhas de cor verde, azul e vermelha correspondem a valores zero e registrados na superfície e fundo respectivamente.

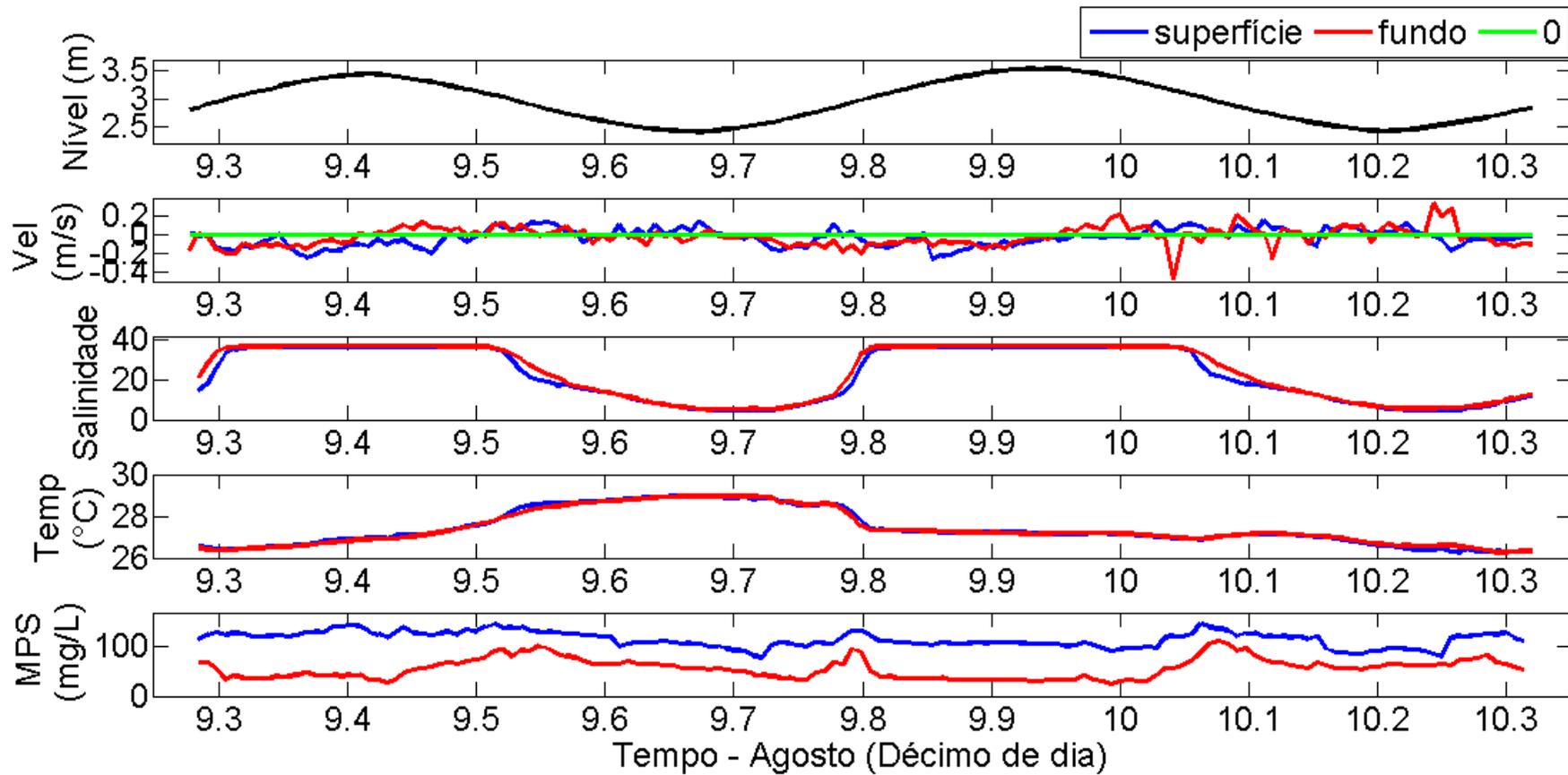
A maior variação do nível ocorreu durante a sizígia, em decorrência da maior amplitude nessa condição de maré, variando o nível da água de 1.93 metros a 3.68 metros. Enquanto que na quadratura, a altura da onda foi menor, variando de 2.39 metros a 3.68 metros. Contudo, em ambas as campanhas a maré apresentou altura correspondente a micro-maré, menor que dois metros.

Figura 12 - Variabilidade da velocidade, salinidade, temperatura e MPS com a onda de maré de sizígia.



Fonte: o autor, 2013.

Figura 13 - Variabilidade da velocidade, salinidade, temperatura e MPS com a onda de maré de quadratura.



Fonte: o autor, 2013.

A salinidade apresentou seus maiores valores na preamar, tanto em condição de sizígia como em quadratura. Isso se deve a entrada da água do mar dentro do corpo estuarino durante o processo de enchente. Os menores valores de salinidade, por sua vez, são visualizados na baixa-mar, período de maior influência fluvial através da descarga do rio.

A diferença entre os valores de salinidade da superfície e do fundo foram pequenas em ambas as campanhas, contudo, a salinidade do fundo permaneceu sempre maior que a de superfície. Tal fato reflete a presença de água mais densa e salgada no fundo do estuário e de água menos densa e com menor salinidade na superfície.

Vasconcelos (1985) realizou duas campanhas de 12 horas em condições de maré de sizígia e quadratura no mês de maio de 1983 no estuário do rio Cocó. Este ano de coleta dos dados é caracterizado pelo autor como de estiagem, similar ao de anos anteriores, 1979 a 1982. O objetivo do trabalho foi avaliar em bases preliminares os aspectos físicos, químicos e sedimentológicos do estuário do rio Cocó a fim de se definir suas características hidrodinâmicas. Schettini (2011) também realizou o levantamento de dados de salinidade, temperatura e correntes durante um ciclo completo de maré de sizígia, no estuário do Rio Cocó, no dia 6 de novembro de 2010.

Comparando os mínimos e máximos de salinidade com os encontrados por Vasconcelos (1985) e Schettini (2011), pode-se constatar que a variabilidade deste parâmetro com a maré foi maior no presente trabalho. Nem em condição de sizígia ou de quadratura Vasconcelos (1985) e Schettini (2011) encontraram valores de salinidade menores que 27.5 e 25.1, respectivamente, enquanto que os valores aqui obtidos atingiram o mínimo de 4.35. Vale ressaltar que a chuva acumulada do mês das coletas deste trabalho foi de 0 mm (FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 2012). Além disso, o ano de 2012 configura-se com uma condição pluviométrica irregular típica de estiagem, similar ao período de 1979 a 1983 (VASCONCELOS, 1985) e ao mês de novembro de 2010 (SCHETTINI *et al.*, 2011), o que deveria implicar em salinidades elevadas e similaridade de resultados entre os trabalhos.

A densidade, por sua vez, é um importante parâmetro a ser avaliado, pois pode gerar gradientes que promovam movimentos dentro do estuário. Essa variável é obtida a partir de três componentes: pressão, temperatura e salinidade. A primeira componente pode ser desconsiderada no estuário do Cocó, devido a baixa profundidade de 4 metros, pois a pressão é considerada importante no cálculo da densidade somente em fiordes (MIRANDA *et.al.*, 2002). A componente temperatura neste caso causa pequena influência na variabilidade da densidade, pois apresenta uma pequena variação. Logo, a densidade da água do estuário do rio Cocó apresenta comportamento regido pela variação da salinidade, comportando-se, desse modo, de forma similar a mesma.

A variação da concentração de MPS apresentou uma relação direta com a onda de maré, aumentando a concentração na superfície e fundo durante a enchente e diminuindo durante a vazante, na sizígia e quadratura. As maiores concentrações durante a enchente devem-se provavelmente a fricção da onda de maré com as margens o que promove a suspensão de material particulado por toda a coluna de água.

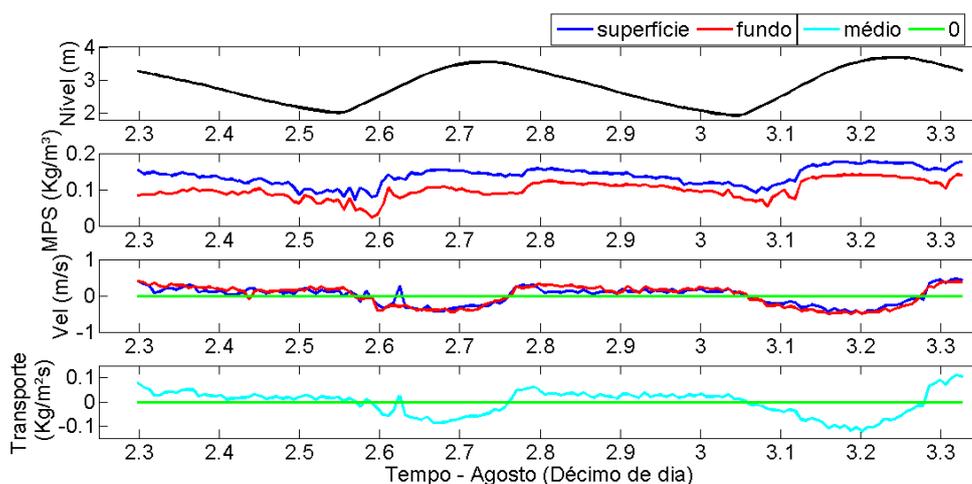
Logo, devido às maiores velocidades de corrente e maior amplitude de onda, obteve-se maiores concentrações de material particulado em maré de sizígia do que na quadratura. Contudo, em ambas as campanhas e fases de maré, a quantidade de MPS na superfície foi superior ao do fundo.

3.1 Transporte do Material Particulado em Suspensão

O transporte médio de MPS na sizígia e quadratura é representado nas figuras 15 e 16, respectivamente, junto com a oscilação da maré, o MPS e a velocidade de superfície e fundo da coluna de água.

O transporte de MPS apresentou valores positivos e negativos, que representam, respectivamente, a saída e a entrada de material particulado no estuário.

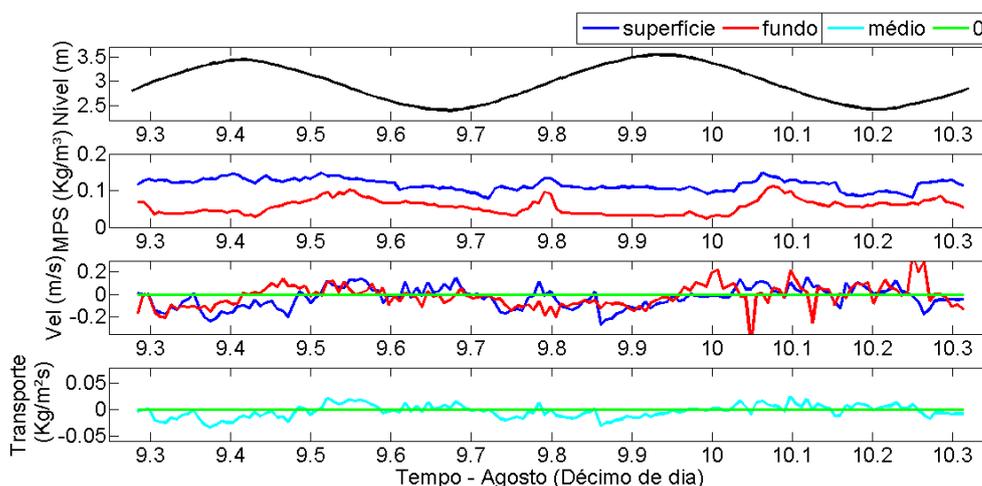
Figura 15 - Transporte de Material Particulado em Suspensão (sizígia).



Fonte: o autor, 2013.

Os maiores valores de transporte foram observados na sizígia, os quais variaram de 0.1 Kg/m².s a -0.1 Kg/m².s, enquanto que na quadratura o transporte variou de 0.05 Kg/m².s a -0.05 Kg/m².s. Esse maior transporte na sizígia está relacionado com a maior concentração de MPS na água e com a maior intensidade das velocidades de corrente. Enquanto que na quadratura, tem-se o inverso, menor concentração de MPS e velocidades menores, configurando condições para um menor transporte.

Figura 16 - Transporte de Material Particulado em Suspensão (quadratura).



Fonte: o autor, 2013.

De um modo geral, os resultados demonstraram que o transporte de MPS nas duas campanhas variou concomitantemente com a oscilação da velocidade e da onda de maré. Durante a enchente, os valores de transporte tornavam-se negativos, caracterizando entrada de material particulado, enquanto que na vazante, os valores de transporte foram positivos, representando mobilização de MPS para fora do estuário.

Realizando o somatório do transporte em cada campanha foi possível estimar se o estuário apresentou comportamento de exportador ou importador de sedimentos. O transporte total calculado foi de $-0.58 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$ e $-0.56 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$ para sizígia e quadratura, respectivamente, caracterizando que independente da condição de maré o estuário caracterizou-se como um importador de material particulado.

Vale ressaltar o maior transporte negativo durante a sizígia, fato esse que está relacionado com as velocidades das correntes mais intensas, promovendo fricção das margens e suspensão de material na coluna da água. Somado a isso tem o fato da diferença de intensidade entre as correntes de enchente e vazante, onde a primeira apresenta velocidades maiores do que a última. Desse modo são estabelecidas condições para um maior transporte negativo e conseqüente maior importação de material particulado no estuário. Esse material importado provavelmente é armazenado nas margens ao longo do manguezal do estuário, durante o período de preamar.

Os valores médios de MPS deste trabalho foram um pouco menores do que os encontrados por Vasconcelos (1985), o qual quantificou um valor médio de $170,4 \text{ mg/L}$ para sizígia e $181,1 \text{ mg/L}$ para quadratura. Por outro lado, em ambos os trabalhos o estuário do rio Cocó comportou-se como um importador de material particulado.

3.2 Estratificação x Turbulência

A competição entre a estratificação vertical e a mistura desempenha um papel crucial na dinâmica estuarina, pois quando o fluido é estratificado o gradiente de densidade causa resistência a troca de momento por turbulência, sendo necessário um cisalhamento extra de velocidade para causar mistura (Dyer, 1997). O número de Richardson (Ri) foi utilizado neste trabalho para avaliar essa competição.

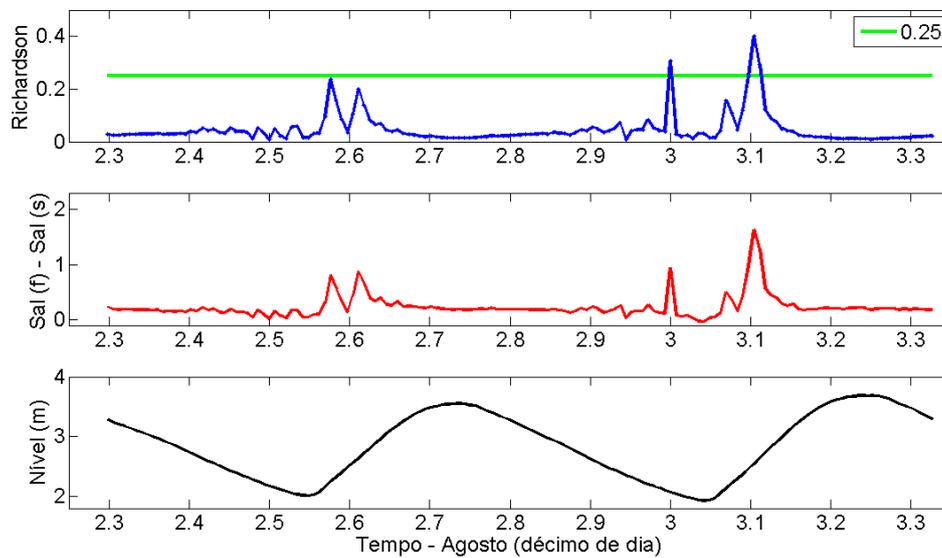
A turbulência estuarina pode ser produzida por diversos mecanismos, tais como a partir da constrição das bordas e fundo, pelo cisalhamento vertical da velocidade e por tensão de cisalhamento do vento e de ondas de gravidade superficiais e internas.

A fim de se compreender os mecanismos de formação e desenvolvimento da turbulência em fluidos estratificados foram realizados diversos trabalhos teóricos e experimentais. A partir disso, sob condições de movimento uniforme, chegou-se a um valor que caracterizava a transição entre um regime estratificado e desestabilizado pelo cisalhamento da velocidade, ocorrendo quando $Ri = 0.25$. Portanto, quando $Ri < 0.25$ configura-se uma situação onde a turbulência sobrepuja a estratificação, enquanto que quando $Ri > 0.25$ a estratificação sobrepõe-se a turbulência (MIRANDA *et.al.*, 2002).

Nas figuras 17 e 18 está representado o número de Richardson, a diferença entre a salinidade de fundo (sal (f)) e superfície (sal (s)) e a oscilação do nível para as 25 horas de cada campanha. A linha verde representada no gráfico de Richardson consiste na fronteira entre um regime laminar e turbulento, fundamentado no valor de $Ri = 0.25$.

Os valores de Richardson foram menores na sizígia, atingindo valor máximo de 0.4, enquanto que na quadratura obteve-se valor máximo de 4.0. Um menor valor de Richardson está relacionado a uma maior capacidade desestabilizadora, que por sua vez está diretamente ligada à amplitude da onda maré e a intensidade das correntes, que são maiores na sizígia do que na quadratura, o que faz com que haja produção de turbulência com maior eficiência.

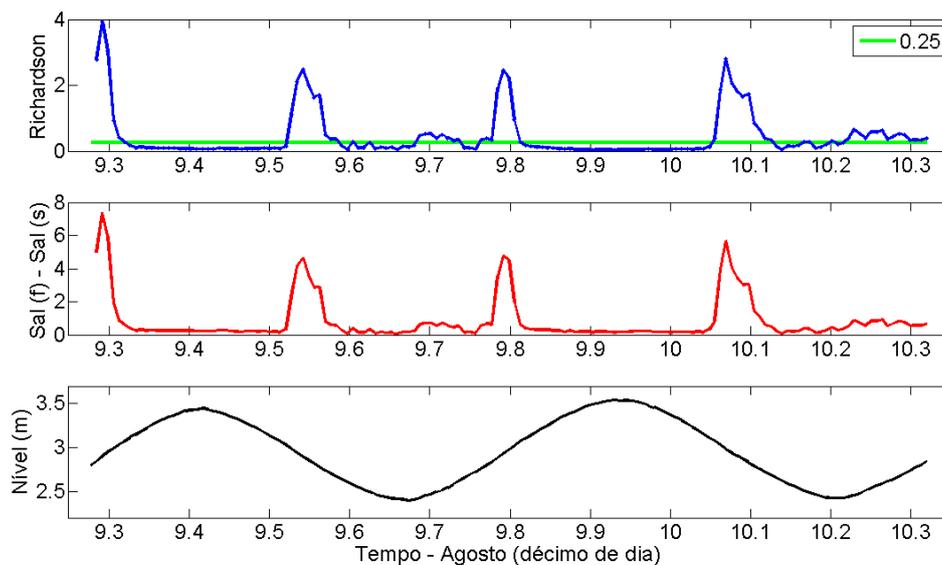
Figura 17 - Número de Richardson na sizígia



Fonte: o autor, 2013.

Na sizígia, em praticamente toda campanha a turbulência superou a estratificação, salvo dois momentos, onde a estratificação atingiu picos, coincidentes com a baixa-mar, o que refletiu no número de Richardson.

Figura 18 - Número de Richardson na quadratura



Fonte: o autor, 2013.

Na quadratura, a dominância da estratificação sobre a turbulência ($Ri > 0.25$) ocorreu em vários momentos. Todos os picos de $Ri > 0.25$ coincidiram no tempo com os máximos de diferença entre a salinidade do fundo e da superfície. Esses momentos de relevante estratificação ocorreram sempre próximos do final da enchente e da vazante.

Entretanto, mesmo a quadratura caracterizando-se com período de menor amplitude de maré e correntes mais fracas, em grande parte do tempo os valores de Ri permaneceram abaixo de 0.25, configurando domínio da capacidade desestabilizadora sobre a estabilizadora.

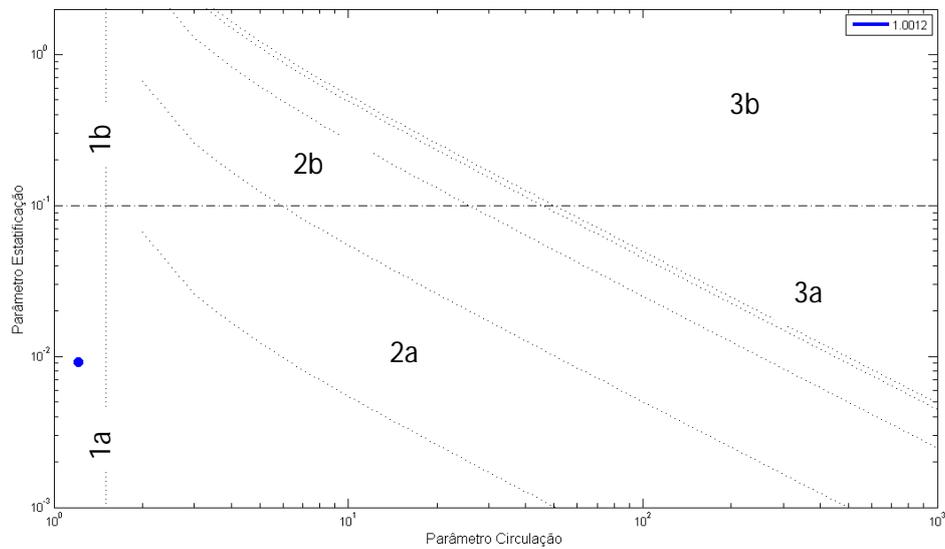
Essa condição de soberania da turbulência à estratificação em ambas as campanhas, provavelmente deve-se ao fato de o estuário do rio Cocó apresentar morfologia rasa e estreita e estar submetido a uma condição de meso-maré, o que favorece a produção de turbulência.

3.2 Classificação do estuário de acordo com Diagrama de Hansen & Rattray (1966).

Os diagramas de Hansen & Rattray (1966) para a sizígia e quadratura estão representados nas figuras 19 e 20, respectivamente. A área onde o ponto azul está plotado representa a sua respectiva classificação de acordo com os parâmetros adimensionais, enquanto que a linha azul no alto dos gráficos representa o valor do parâmetro v .

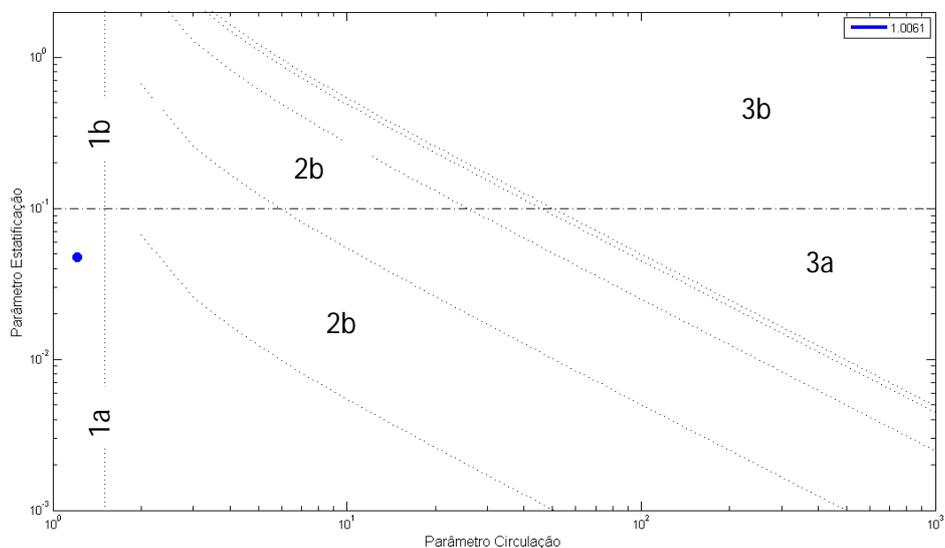
O estuário do rio Cocó configurou-se como um estuário do tipo 1a ou verticalmente homogêneo, tanto em condição de sizígia como em quadratura. Além disso, o parâmetro v foi igual a 1 em ambas as condições de maré, caracterizando que durante essas campanhas o estuário do rio Cocó não apresentou circulação gravitacional e que o transporte de sal no estuário ocorreu à montante totalmente realizada por difusão turbulenta.

Figura 19 - Diagrama Hansen & Rattray (1966) na sizígia



Fonte: o autor, 2013.

Figura 20 - Diagrama Hansen & Rattray (1966) na quadratura



Fonte: o autor, 2013.

Entretanto, é possível identificar nas duas figuras uma variação na posição do ponto, onde na quadratura ele sobe em direção à condição de 1b, embora se mantenha completamente dentro da condição de um estuário verticalmente homogêneo. Essa variação da posição pode ser interpretada

como produto da condição de maré, onde na sizígia as correntes de maré estão mais fortes do que na quadratura, promovendo, desse modo, mistura de forma mais efetiva e, conseqüentemente, uma difusão turbulenta maior. Enquanto na quadratura, essa condição é atenuada, propiciando condições de menor turbulência e mistura.

Um estuário verticalmente homogêneo ocorre em condições de forte maré e fraca descarga fluvial, o que proporciona intensa mistura e pequena estratificação, respectivamente. O estuário do rio Cocó apresenta tais características.

Contudo, essa classificação não é fixa, podendo sofrer variações no tempo em função de mudanças nas variáveis velocidade e descarga fluvial, que por sua vez influenciarão no cálculo dos parâmetros adimensionais do diagrama. Na quadra invernal, por exemplo, há uma maior freqüência de chuva nas bacias hidrográficas e um aumento nas vazões dos rios. Isso pode proporcionar uma variação na condição de estratificação do estuário, influenciando na sua classificação.

4. CONCLUSÕES

O estuário do rio Cocó caracteriza-se como um estuário raso, de pequena descarga fluvial e submetido a uma condição de micro-maré. Considerando o período analisado, o estuário é dominado por maré de enchente, apresentando perfis verticais de velocidade homogêneos na preamar e baixar mar tanto em sizígia como em quadratura.

A salinidade e a temperatura apresentaram comportamento homogêneo entre a superfície e o fundo nas duas campanhas, embora tenham ocorrido diferenças maiores em condição de quadratura, em decorrência da menor altura da onda de maré e velocidades menos intensas, propiciando menor mistura.

Quanto à capacidade de transporte de material particulado em suspensão, o estuário do rio Cocó comportou-se como um importador de sedimentos em ambas as campanhas. Isso está relacionado às maiores velocidades das correntes de enchente e a relevante amplitude de maré a qual está submetido.

A partir do cálculo do número de Richardson constata-se que o estuário foi altamente turbulento na sizígia e quadratura, embora nessa última registrou-se mais momentos de estabilidade na coluna de água.

Por fim, a partir do diagrama de Hansen & Rattray (1966), constata-se que o estuário é verticalmente homogêneo (1a) com transporte de sal à montante realizado por difusão turbulenta tanto em condição de sizígia como em quadratura.

REFERÊNCIAS

- AUTARQUIA MUNICIPAL DE FORTALEZA. **Análise do diagnóstico ambiental da área de proteção ambiental do rio Cocó**. Fortaleza: AUMEF, 1987.
- CAMERON, W. M. ; PRITCHARD, D. W. Estuaries. In: HILL, M. N. (Ed.). **The Sea**. Ideas and observations on progress in the study of the seas. New York: Interscience. p. 306-324. 1963.
- CAMPOS, J.N.B., STUDART, T.M.C., LUNA, R., FRANCO, S. Hydrological Transformation in Jaguaribe River Basin during 20 th Century. **Proceedings of the 20th Annual American Geophysical Union**. Fort Collins: Hydrology Days Publications. p.221-227. 2000.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Rede de monitoramento da qualidade de água operada pela COGERH**. Fortaleza: COGERH/SEMACE. 2002. 28 p.
- DIONNE, J. C. Towards a more adequate definition of the St.Lawrence estuary. **Zeitschr. f. Geomorph.** v.7, n.1, p.36-44. 1963.
- DYER, K. R. **Estuaries: a physical introduction**. 2.nd. Chichester:Wiley. 1997.195 p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Postos Pluviométricos**. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/rede-de-monitoramento/postos-pluviometricos>>. Acesso em: 9 de dez.2012.
- GEYER, W.R, *Estuarine salinity structure and circulation*. In: VALLE-LEVINSON, A. Ed(s) **Contemporary Issues in Estuarine Physics**. 1.ed. New York : Cambridge University Press. 2010. 415 p.
- HANSEN, D. V. ; RATTRAY Jr, M. New dimensions on estuarine classification. **Limnology and Oceanography**, Canmore, v.11, p.319-326. 1966.
- IPLANCE, INSTITUTO DO PLANEJAMENTO DO CEARÁ. **Atlas do Estado do Ceará**. Fortaleza: IPLANCE, 1989.
- IPLANCE, INSTITUTO DO PLANEJAMENTO DO CEARÁ. **Atlas do Estado do Ceará**. Fortaleza: IPLANCE, 1995. 64 p.
- KJERFVE, B. Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography. In: Day Jr., J.W., C.H.A.S Hall., Kemp W.M.; Yanez-Aranciba, A.(eds). **Estuarine Ecology**. New York: Wiley. p. 47-48.1987.

MIRANDA, L. B. ; CASTRO, B. M. ; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia de estuários**. 2. ed. São Paulo: USP, 2002. 411 p.

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S. The effect of semi-aridity and dammin on sedimentary dynamics in estuaries – Northeastern region of Brazil. **Journal of Coastal Research**. Szczecin,Poland. p.1540–1544. 2011.

NORTEK. A. S. Monitoring Sediment Concentration with Acoustic Backscattering Instruments. **Nortek technical**. note No. 003. 2001. 5 p.

PESSOA. E. V. **Estudo do “Standing-Crop” da água do estuário do rio Cocó (Ceará – Brasil), como indicador de modificações físico-químicas do meio**. 2002. 142p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Prodem, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

PRITCHARD, D. W. Estuarine hydrography. **Adv. Geophys**. New York: Academic Press, v.1. p.243-280. 1952.

PRITCHARD, D. W. Esturine circulation patterns. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng**. New York: v.81. p.1-11. 1955.

SCHETTINI, C. A. F., BEZERRA, L.J.C., PAIVA.B., TRUCCOLO.E.C., VALLE-LEVINSON.A. Circulation and hydrography of semi-arid Brazilian low-inflow estuaries. **Anais do Simpósio Internacional sobre Transferências de Materiais na Interface Continente-Oceano**. INCT-TMCOcean. Fortaleza. p.8-9. 2011.

SCHETTINI, C. A. F., ZALESKI, A. R., A Utilização de Perfiladores Acústicos de Corrente por Efeito Doppler na Determinação do Material Particulado em Suspensão na Água: Aplicações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre , v.11, p.201-208. 2006.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Revisão do Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas**. Fortaleza: ANA/ BANCO MUNDIAL / PROÁGUA NACIONAL / COGERH. 2010. p. 110.

SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Parque Ecológico do rio Cocó**. Disponível em: <<http://www.semace.ce.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2012.

VALLE-LEVINSON, A. *Definition and classification of estuaries*. In: VALLE-LEVINSON, A. Ed(s). **Contemporary Issues in Estuarine Physics**. 1.ed. New York : Cambridge University Press. 2010. 415 p.

VASCONCELOS, F. P. ; FREIRE, G. S. S. Estudo preliminar dos aspectos hidrodinâmicos e sedimentológicos do estuário do rio Cocó, Estado do Ceará. **Arquivos de Ciências do Mar**. Fortaleza, v.24, p.81-87. 1985.

ZALESKI, A. R., SCHETTINI, C. A. F., Procedimentos para calibração de perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler na determinação da concentração de material particulado em suspensão na água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre , v.11, p.191-200. 2006.

A ZONA costeira do Ceará: diagnóstico para a gestão integrada. Fortaleza: AQUASIS, 2003. 248 p.