

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
PÓS GRADUAÇÃO EM GEOQUÍMICA AMBIENTAL

EDUARDO NEGRI DE OLIVEIRA

IMPACTO DE BARRAGENS SOBRE A DISPERSÃO DE MATÉRIA E A  
SUSTENTABILIDADE DA PLUMA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO (AL/SE):  
ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL POR SENSORIAMENTO REMOTO.

NITERÓI  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

EDUARDO NEGRI DE OLIVEIRA

IMPACTO DE BARRAGENS SOBRE A DISPERSÃO DE MATÉRIA E A SUSTENTABILIDADE DA PLUMA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO (AL/SE): ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL POR SENSORIAMENTO REMOTO.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Geoquímica Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. BASTIAAN ADRIAAN KNOPPERS  
Co-orientador: Prof. Dr. JOÃO ANTÔNIO LORENZZETTI

Niterói  
2009

O482 Oliveira, Eduardo Negri de

Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do Rio São Francisco (AL/SE): análise espacial e temporal por sensoriamento remoto / Eduardo Negri de Oliveira. - Niterói, RJ : [s.n.], 2009.

158 f : il. ; 30 cm

Tese (doutorado-Geoquímica Ambiental)-Universidade Federal Fluminense, 2009. Orientador: Prof. Dr. Bastiaan Adriaan Knoppers. Co-orientador: Prof. Dr. João Antônio Lorenzetti.

1. Material em suspensão 2. Sedimentos costeiros  
3. Rio São Francisco 4. Sensoriamento remoto 5. Produção intelectual  
I. Título.

CDD 551.4609



EDUARDO NEGRI DE OLIVEIRA

IMPACTO DE BARRAGENS SOBRE A DISPERSÃO DE MATÉRIA E A SUSTENTABILIDADE DA PLUMA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO (AL/SE): ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL POR SENSORIAMENTO REMOTO.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Geoquímica Ambiental.

Aprovada em 28 de Maio de 2009.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. BASTIAAN ADRIAAN KNOPPERS – Orientador  
UFF

---

Prof. Dr. JOÃO ANTONIO LORENZZETTI - Co-Orientador  
INPE

---

Prof. Dr. EDISON DAUSACKER BIDONE  
UFF

---

Prof. Dr. EMMANOEL VIEIRA DA SILVA FILHO  
UFF

---

Prof. Dr. RENATO CAMPELLO CORDEIRO  
UFF

---

Profa. Dra. SUSANA BEATRIZ VINZON  
UFRJ

---

Prof. Dr. MAURÍCIO ALMEIDA NOERNBERG  
UFPR

Niterói  
2009

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a minha família, sem a qual, tudo me faltaria. Agradeço aos meus orientadores Bastiaan Knoppers e João Lorenzetti pela amizade e valiosas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho. Agradeço o Dr. Rick Gould e a fundação POGO. Agradeço aos grandes amigos: Nilva, Elisamara, Marcelo Cabelo, Rodrigo Zeca, Fabian He-man. Agradeço ao pessoal da secretaria da pós-graduação, o CNPq e todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização do presente trabalho. Obrigado.

“Ser como o rio que deflui  
silencioso dentro da noite.  
Não temer as trevas da noite.  
Se há estrelas nos céus, refleti-las.  
E se os céus se pejam de nuvens,  
como o rio as nuvens são água,  
refleti-las também sem mágoa  
nas profundidades tranqüilas.”

(Manuel Bandeira)

## RESUMO

O presente trabalho teve como meta principal estudar a dinâmica da pluma costeira do rio São Francisco, SE/AL, utilizando sensoriamento remoto e imagens de satélites anteriores e posteriores à construção das barragens no médio São Francisco. Algoritmos empíricos e semi-analíticos para quantificação da matéria em suspensão foram implementados e calibrados *in situ* com dados atuais e pretéritos de campanhas oceanográficas na região de estudo. Além disso, quatro campanhas de campo (Out/2006, Fev/2007, Mai/2007 e Abr/2008) foram realizadas, com coletadas de amostras de água na pluma e medidas radiométricas para aferição dos algoritmos. De maneira geral, os algoritmos implementados mostraram-se bastante satisfatórios; as variações dos parâmetros estimados por meio das imagens de satélites apresentaram concordância com os valores das respectivas variáveis coletadas *in situ*. Preliminarmente, efetuou-se um estudo comparativo das plumas de dispersão dos rios Doce (RD), Paraíba do Sul (RPS), São Francisco (RSF) e do sistema costeiro Caravelas-Abrolhos (SCC) da Costa Leste utilizando o algoritmo empírico e imagens Landsat-TM. As plumas dos rios São Francisco e Doce, caracterizando-os como sistemas exportadores de matéria para a plataforma continental leste brasileira, já o SCC e o RPS apresentam características de sistemas retentores, com suas plumas confinadas à costa. Na seqüência, a avaliação histórica da descarga fluvial do RSF possibilitou identificar os eventos extremos pós-construção barragens, que, de certa forma, simulam a sazonalidade que o RSF possuía antes da construção das barragens. A interferência da bifurcação da Corrente Sul Equatorial foi, em seguida, apontada como agente modulador da corrente oceânica junto a plataforma do RSF assim como o regime dos ventos alísios. O processamento de 5 anos de imagens de alta resolução espectral (Aqua/MODIS), do período Ago/2002-Dez/2007, utilizando o Algoritmo Quase Analítico (*Quasi Analytical Algorithm - QAA*), possibilitou estimar as propriedades ópticas inerentes da região costeira próxima à foz do RSF, discernir o material opticamente ativo presente na água e quantificar o material particulado em suspensão. Os resultados ampliaram o entendimento do comportamento da pluma do RSF pós-construção das barragens de tal forma que 1) a carga de TSS ao longo do eixo principal da pluma do RSF é mais expressiva durante o segundo semestre do ano, exceto quando há ocorrência de eventos extremos no primeiro semestre; 2) as feições identificadas por meio das variações de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  apontam para maiores concentrações de CDOM (Coloured Dissolved Organic Matter) e de fitoplâncton durante o primeiro semestre de cada ano, evento relacionado com o regime da precipitação na bacia de drenagem do RSF. E, para finalizar, as massas d'água na plataforma adjacente à foz do RSF foram classificadas de acordo com as variações das concentrações de sedimento/detrimento, CDOM e fitoplancton. Durante o verão, observa-se o predomínio do constituinte óptico CDOM; no outono, predomina CDOM e fitoplancton; no inverno, sedimento, fitoplancton e CDOM possuem contribuições similares; na primavera, predomina o sedimento/detrimento. A estação de outono promove maior exportação de matéria sobre a plataforma, e durante a estação de primavera o material em suspensão é retido mais junto à costa.

Palavras-chaves: material suspensão, fitoplancton, CDOM, pluma, rio São Francisco, sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

This main aim of this study was to address the dynamics of the coastal plume of the São Francisco River (SE/AL), affected by the construction of dams in its middle-lower course, with remote sensing and the application of images comparing conditions between the pre- and post-dam periods. Empirical and semi-analytical algorithms were implemented for the quantification of suspended particulate matter and calibrated with In Situ sampling and previously collected data from oceanographic campaigns in the region. Today's conditions were established by four campaigns (October 2006, February 2007, May 2007 and April 2008) involving water sampling and radiometric measurements to calibrate the empirical and semi-analytical algorithms. In general, the implemented algorithms for the estimation of inherent optical properties and suspended particulate matter yielded satisfactory results, as the variability of the studied parameters with the satellite images coupled to the In Situ measurements were well correlated. At first, a comparative study of the coastal plumes of the Doce (RD), Paraíba do Sul (RPS) and São Francisco (RSF) rivers and the nearshore system of Caravelas (SSC), located along the East Brazil Coast, was performed with an empirical algorithm and Landsat-TM images. The plumes of the RD and RSF rivers were characterized as exporters of materials over the East Brazilian Shelf, whereas the RPS and SSC systems retained most of the materials alongshore. Henceforth, historical data on water discharge of the RSF system were used to identify extreme events during the pre- and post-dam periods. Images selected accordingly revealed that extreme coastal plumes may still be generated sporadically during the post-dam period, in spite of river discharge regulation by the dams today. The impact and variability of the South Equatorial Current together with the wind regime was also found to control and modulate the RSF plume. Further in-depth processing and analysis of a five year sequence (August 2002 to December 2007) of high spectral resolution images (Aqua/MODIS) using the Quasi Analytical Algorithm-QAA- enabled the estimation of inherent optical properties of the RSF coastal zone, discerning the active optical properties present and suspended particulate matter (SPM) in the waters. The results enhanced the understanding of the behavior of the RSF coastal plume as follows: 1) the load and transport of SPM along the main axis of the plume is more intense during the 2<sup>nd</sup> semester in austral winter of the year, except for when sporadic extreme events of river discharge occur during the 1<sup>st</sup> semester in austral summer. 2) the features identified by the variability of  $a_{CDOM}(443)$  and  $a_{ph}(443)$  suggest the presence of higher CDOM (Coloured Dissolved Organic Matter) and phytoplankton during the 1<sup>st</sup> semester in austral summer due to higher precipitation events in the drainage basin. Finally, the water masses of the shelf adjacent to the RSF mouth were classified in accordance to the variability of the concentrations of SPM/detritus, CDOM and phytoplankton. During summer, the CDOM constituent predominates, in autumn CDOM together with phytoplankton, during winter SPM, CDOM and phytoplankton co-exert, and in spring SPM/detritus predominates. Autumn corresponds to the season with the highest export potential of material offshore and during spring SPM is largely dispersed and retained nearshore.

Key-Words: suspended particulate matter, phytoplankton, CDOM, coastal plume, remote sensing, São Francisco River, E/NE-Brazil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Classificação geomorfológica dos sistemas estuarinos. Fonte: modificado de (DAVIES, 1964).	24
Figura 3.2	Diagrama de Hjulström (Fonte: adaptado de SUGUIO, 1982)	26
Figura 3.3	Ilustração conceitual dos quatro principais estágios de dispersão do sedimento carregado pelas águas fluviais para a região oceânica costeira. Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995.	27
Figura 3.4	Ilustração conceitual da flutuabilidade positiva e negativa das plumas fluviais. Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995.	28
Figura 3.5	Modelo representando o processo de ressuspensão ocasionado por bancos submersos nas regiões estuarinas. (Fonte: adaptado MEDEIROS et al., 2007).	29
Figura 3.6	Ilustração conceitual da camada superficial de mistura e sua relação com o processo de acumulação de sedimento. Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995.	30
Figura 3.7	Frente Costeira: a) linha de cor; b) linha de espuma; c) diagrama da frente da pluma fluvial e fricção interfacial; d) corte transversal da pluma, com destaque para as linhas de espuma, detritos e cor (FONTE: adaptado de BOWMAR & ESAIAS, 1977).	32
Figura 3.8	Trajetória da Luz em direção ao sensor remoto orbital	33
Figura 3.9	Geometria de Aquisição Radiométrica	36
Figura 3.10	Coefficientes de absorção e espalhamento da água pura. Fonte: SOUZA (2005).	39
Figura 3.11	Curvas típicas da reflectância de sensoriamento remoto, da absorção devido aos pigmentos fitoplanctônicos, da absorção CDOM/detritos, da absorção água pura, e do coeficiente de retroespalhamento devido ao material particulado em suspensão. Adaptado de GOULD et al., 2001.	41

Figura 4.1	Bacia do Rio São Francisco e seu setores: Alto; Médio; Médio-Baixo; Baixo. Também é mostrado: o sistema Costeiro de Caravelas (compreendendo os rios: Jucuruçu, Itanhém, Caravelas e Peruípe); bacia do Rio Doce; e bacia do Rio Paraíba do Sul.	49
Figura 4.2	Vazão média mensal do Rio São Francisco entre 1977 a 2007 na estação hidrológica de Propriá-AL (120 Km da costa). Fonte: Agência Nacional de Águas.	50
Figura 4.3	Padrão de migração da ZD dos alíseos e ZCIT.	53
Figura 4.4	Imagem Landsat-TM da foz do rio São Francisco.	56
Figura 4.5	Corrente geostrófica média anual na superfície do mar. Círculo preto representa a localização média da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE). CNB=Corrente Norte do Brasil; CB=Corrente do Brasil. Fonte: adaptado de RODRIGUES et al. (2006).	57
Figura 4.6	Anomalia de circulação superficial ( $\text{cm s}^{-1}$ ) relativo ao campo médio anual de velocidade de corrente oceânica superficial: a) Julho, representativa do inverno; b) Novembro, representativa primavera/verão. Fonte: adaptado de RODRIGUES et al. (2006).	57
Figura 4.7	Campo de corrente oceânica superficial modelado (a) Julho e (b) Novembro. Círculo preto: foz do rio São Francisco. Fonte: adaptado de RODRIGUES et al. (2006).	58
Figura 4.8	Coletas realizadas na Foz do Rio São Francisco. Os triângulos representam os pontos onde foram coletados amostras de água (clorofila e TSS) e medidas radiométricas.	61
Figura 4.9	Curva de regressão do Total de Sólido em Suspensão versus a Reflectância derivada das imagens CBERS-2	70
Figura 4.10	Fluxograma de Partição do coeficiente de absorção do CDOM, sedimento e material detrítico.	72
Figura 4.11	a) transecto ABC utilizado para construir os diagramas Hovmoller; área sombreada representa a região de amostragem para gerar os diagramas ternários e a análise estatística; retângulo <b>R</b> define a região amostrada para gerar o limiar das isolinhas de absorção; b) diagrama ternário com o percentual representativo de cada coeficiente absorção, no caso, predomínio do $a_{sd}$ .	73
Figura 5.1	Vazão Média Mensal dos Rios	78

- Figura 5.2 Foz do Rio São Francisco. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c, d) e coletado *in situ* (a1, b1, c1, d1). 82
- Figura 5.3 Sistema Costeiro Caravelas. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b) e coletado *in situ* (a1); c) figura detalhada da região de Caravelas, mostrando os arcos costeiro e externo de recife de corais (Fonte: LEAO, 1999). 85
- Figura 5.4 Foz do Rio Doce. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c) e coletado *in situ* (a1). 86
- Figura 5.5 Foz do Rio Paraíba do Sul. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c) e coletado *in situ* (a1, b1, c1). 88
- Figura 5.6 Vazão média mensal do rio São Francisco: a) 1940 a 1973; b) 1977 a 2007. Estação de Propriá: 49705000, 80 km da foz do rio. Fonte: ANA, 2008. 91
- Figura 5.7 Vazão diária do rio São Francisco durante os períodos de eventos extremos: a) ano de 1979; b) ano de 1992; c) ano de 2004; d) ano de 2007. Estação de Propriá: 80 km da foz do rio. Fonte: ANA, 2008. 92
- Figura 5.8 Imagens Landsat 3 mostrando um trecho do rio São Francisco e a pluma na região da foz: a) 26/03/1979; b) 01/10/1979. Composição bandas 1, 2 e 3 do sensor MSS. Área branca sobre o oceano=nuvens. 94
- Figura 5.9 Carga de TSS estimada a partir das imagens CBERS-2 e MODIS. TSS estimado a partir das imagens: a) imagem MODIS, 08/Maio/2004; b) imagem CBERS-2, 08/Maio/2004; c) imagem MODIS, 26/Fev/2004; d) imagem CBERS-2, 20/Fev/2004. 95
- Figura 5.10 Concentrações de TSS coletadas no RSF, próximo a cidade de Propriá (80 km da foz), durante o ano de 2004. 96
- Figura 5.11 Variação da carga de TSS estimada a partir das imagens CBERS-2 evidenciando o período de extrema vazão registrado em 2004. a) 25/Jan/2004; b) Zoom da região do pró-delta do RSF, 25/Jan/2004, barra de escala vai de 100 a 400mg/L; c) 20/Fev/2004; d) 08/Maio/2004; e) 03/Jun/2004; f) 12/Set/2004. 97
- Figura 5.12 Variação da carga de TSS estimada a partir das imagens MODIS evidenciando o período de extrema vazão registrado em 2007. a) 25/Fev/2007; b) 06/Mar/2007; c) 31/Mar/2007; d) 09/Abr/2007. 99



Figura 5.13	Precipitação na bacia drenagem e vazão do RSF. Fonte: ANA (2008).	99
Figura 5.14	Média do vento em Outubro/2006; a) velocidade do vento; b) direção do vento. Dados do satélite Quikscat (Fonte: <a href="http://www.remss.com">http://www.remss.com</a> ).	101
Figura 5.15	Velocidade do vento na foz do Rio São Francisco. Medidas realizadas <i>in situ</i> em Outubro/2006. A direção do vento durante o período de coleta foi predominantemente de Leste.	101
Figura 5.16	Comparação dos valores de reflectância de sensoriamento remoto coletados <i>in situ</i> e derivados das imagens MODIS.	103
Figura 5.17	TSS obtidos por meio de filtragens de amostras de água (eixo X) versus TSS estimado pelo algoritmo de TSS (eixo Y).	104
Figura 5.18	Espectro do coeficiente de absorção do fitoplâncton estimado a partir das $R_{rs}$ coletadas na foz do rio São Francisco durante os períodos: Out/2006 e Abr/2008.	106
Figura 5.19	Pluma do Rio São Francisco; a) estimativa do total de sólido em suspensão (TSS); estimativas do coeficiente de absorção: a) sed/detrito, $a_{sd}(443)$ ; b) CDOM, $a_{CDOM}(443)$ ; c) fitoplâncton: $a_{ph}(443)$ .	108
Figura 5.20	a) $R_{rs}$ coletada <i>in situ</i> e derivada da imagem MODIS; b) TSS coletado <i>in situ</i> (amostras de água) e estimado: através das imagens MODIS, e por meio dos dados radiométricos coletados <i>in situ</i> ; c) curva espectral $a_{ph}(\lambda)$ estimada a partir de dados radiométricos coletados <i>in situ</i> , e valores de $a_{ph}(443)$ estimados das imagens MODIS (concentrações de clorofila-a são mostradas).	109
Figura 5.21	Concentrações do TSS derivadas das imagens MODIS dos dias: a) 25/Jan/2005; b) 05/Mar/2006; c) 05/Jul/2003; d) 17/Nov/2004. Corrente geostrófica (média semanal) representada pelas setas laranjas.	111
Figura 5.22	a) precipitação na bacia drenagem e vazão do RSF; b) regime de ventos na foz do RSF; diagramas Hovmoler: c) do TSS; d) absorção CDOM, $a_{CDOM}(443nm)$ ; e) absorção do fitoplâncton, $a_{ph}(443nm)$ ; f) da temperatura de superfície do mar. A Figura 4.4-a mostra o transecto ABC escolhido para construir o diagrama hovmoller.	113

- Figura 5.23 Diagramas Hovmoler: a) do TSS; b) absorção CDOM,  $a_{CDOM}(443nm)$ ; c) absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(443nm)$ ; d) TSM-temperatura da superfície do mar. 116
- Figura 5.24 Concentração mensal média de clorofila-a presente na pluma do RSF durante as coletas *in situ* realizadas nos anos de: Nov/2000 a Jan/2002, Out/2006, Jan-Fev/2007 e Abr/2008. 116
- Figura 5.25 Concentrações de carbono orgânico dissolvido (DOC) e pigmentos amarelos medidos durante o ano hidrológico de 1984-1985 no setor Baixo do RSF (30 km a montante da foz). Curva contínua: vazão do rio durante o período de coleta. Fonte: BESSA ; PAREDES, 1990. 118
- Figura 5.26 Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação verão (Dez/Jan/Fev): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{ph}(443)$ . 120
- Figura 5.27 Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação outono (Mar/Abr/Mai): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{ph}(443)$ . 121
- Figura 5.28 Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação inverno (Jun/Jul/Ago): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{ph}(443)$ . 122
- Figura 5.29 Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação primavera (Set/Out/Nov): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{ph}(443)$ . 123
- Figura 5.30 Isolinhas de absorção sedimento/detrito,  $a_{sd}(443)$ , para as estações: verão, outono, inverno, primavera. Elipse pontilhada delimita área dominada pela interferência da dinâmica fluvial e caracteriza o alcance médio da pluma do RSF: 30 km ao longo do eixo principal de transporte e 10 km ao longo do eixo secundário. 125

Figura 6.1	Foz do Rio São Francisco. Concentrações superficiais de salinidade (a) e total de sólido em suspensão em mg/L (b) em Dezembro de 1965. Fonte: BARRETO ; SUMMERHAYES (1975).	129
------------	---	-----

Figura 6.2	Cálculo das trajetórias das partículas em suspensão em função da variabilidade granulométrica para um estuário típico de macro-maré.	131
------------	--	-----

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Setores da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e Ocupação Humana	48
Tabela 4.2	Características hidroclimáticas da bacia do RSF – Médias Anuais	51
Tabela 4.3	Frentes-de-onda incidentes na região de desembocadura Rio São Francisco	55
Tabela 4.4	Características Fisiográficas da Região de Estudo	59
Tabela 4.5	Bandas dos sensores TM, ETM+ e CCD a bordo dos satélites Landsat-5, Landsat-7 e CBERS-2 e suas respectivas resoluções espectral, espacial e temporal.	63
Tabela 4.6	Características do Satélite Aqua	66
Tabela 4.7	Características do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua. A largura da banda é dada em nano metros (nm). A resolução espacial das bandas 1 e 2 é de 250m, das bandas 3 a 7 é de 500m, e das bandas 8 a 36 é de 1000m. Fonte: NASA (2008).	67
Tabela 5.1	Forçantes físicas atuantes no período de Coletas <i>In Situ</i> e durante as datas e horários de aquisição das imagens Landsat selecionadas	77
Tabela 5.2	Valores de TSS obtidos em campo e estimados pelas Imagens Landsat	80
Tabela 5.3	Principais barragens localizadas no rio São Francisco. Ano de funcionamento e capacidade de armazenamento. Fonte: CHESF, 2008.	91
Tabela 5.4	Correlação de Spearman (0.05%). Correlações significativas em vermelho	119

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	17
1.1 TRANSPORTE DE MATÉRIA E PLUMAS COSTEIRAS	17
1.2 MONITORAMENTO DE PLUMAS POR SENSORIAMENTO REMOTO	18
1.3 PLUMA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO	19
<b>2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA</b>	20
2.1 OBJETIVOS	20
2.2 JUSTIFICATIVAS	21
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	22
3.1 A INTERFACE CONTINENTE OCEANO E O IMPACTO DE BARRAGENS	22
3.2 CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DOS ESTUÁRIOS	23
3.3 PLUMAS COSTEIRAS	25
3.4 FRENTES COSTEIRAS	31
3.5 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DO OCEANO	33
3.5.1 Princípios Físicos	35
3.5.2 Propriedades Ópticas	37
3.5.3. Comportamento Espectral	39
3.5.4. Algoritmos	43
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	48
4.1 ÁREA DE ESTUDO	48
4.1.1 O Rio São Francisco	48
4.1.2 O Clima	51

4.1.3 Região Costeira e Estuário do Rio São Francisco	54
4.1.4 Bifurcação da Corrente Sul Equatorial	56
4.1.5 Sistema Costeiro de Caravelas, Rio Doce e Rio Paraíba do Sul	58
4.2 COLETAS EM CAMPO	60
4.3 IMAGENS DE SATÉLITES	62
4.3.1 Imagens LANDSAT e CBERS	62
4.3.2 Sensores para Monitoramento Oceânico e Processamento das Imagens MODIS	65
4.4 ALGORITMOS	68
4.4.1 Implementação do Algoritmo QAA	68
4.4.2 Estimativa do Total de Sólido em Suspensão (TSS)	68
4.4.3 Particionamento das IOP's	71
4.5 SÉRIES TEMPORAIS	73
4.5.1 Diagramas Hovmoller	73
4.5.2 Classificação Massas d'Água	74
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>76</b>
5.1 PLUMAS DE TURBIDEZ DE QUATRO SISTEMAS DA COSTA LESTE DO BRASIL	76
5.1.1 Forçantes: Meteorológicas, Hidrológicas e Oceanográficas	77
5.1.2 Avaliação do Algoritmo de TSS utilizando Imagens Landsat	79
5.1.3 Campos de TSS estimados a partir das Imagens Landsat	80
5.2 OS EVENTOS EXTREMOS	89
5.2.1 Série Histórica da Vazão do RSF	89
5.2.2 Eventos Extremos Ocorridos Durante os anos de 1979, 2004 e 2007	93
5.3 SÉRIE TEMPORAL E ESPACIAL DA PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO	100
5.3.1 Aferições	100
5.3.1.1 Campo de Vento Estimado por Satélite	100
5.3.1.2 Correção Atmosférica das Imagens MODIS	102
5.3.1.3 Aferições do Algoritmo de TSS	104
5.3.1.4 Derivação do Coeficiente de Absorção do Fitoplâncton a Partir	

da $R_{rs}$ Coletada <i>In Situ</i>	105
5.3.1.5 Aferição das Estimativas Derivadas das Imagens MODIS	107
5.3.2 Dinâmica da Pluma do Rio São Francisco e a Bifurcação da Corrente Sul Equatorial	110
5.3.3 Diagramas Hovmoller - Série Tempora/Espacial da Pluma do Rio São Francisco	112
5.3.4 Classificação de Massas d'Água	120
<b>6. DISCUSSÃO</b>	126
6.1 PLUMAS DE TURBIDEZ DE QUATRO SISTEMAS DA COSTA LESTE DO BRASIL	126
6.2 VARIAÇÕES DA CARGA DE TSS TRANSPORTADA PELO RSF NAS ÚLTIMAS DÉCADAS E OS EVENTOS EXTREMOS	128
6.3 DINÂMICA DA PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO E A BIFURCAÇÃO DA CORRENTE SUL EQUATORIAL	132
6.4 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RSF E ÁGUAS COSTEIRAS ADJACENTES	134
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
<b>7. CONCLUSÃO</b>	141
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	143

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 TRANSPORTE DE MATÉRIA E PLUMAS COSTEIRAS

O transporte de material através da interface continente-oceano dá-se, principalmente, pelo aporte fluvial. Material orgânico e inorgânico, dissolvido ou particulado são carreados pelas águas fluviais e durante o percurso sofrem as interferências dos processos físicos, químicos e biológicos que transformam uma parte do material lixiviado do continente. Essa carga de material transportada pelos rios repõe o estoque de sedimento costeiro, exportam carbono, nutrientes e elementos biogênicos imprescindíveis para a sustentação da fauna e flora das regiões estuarinas e costeiras (SMITH ; HITCHCOCK, 1994; RAYMOND ; COLE, 2003).

Uma das etapas finais do transporte de água e matéria ao longo da interface continente-oceano ocorre através de plumas costeiras que se proliferam a partir da desembocadura dos rios sobre a plataforma continental (WRIGHT, 1977). São também denominadas como plumas de turbidez devido a sua coloração visível oriunda da matéria em suspensão fluvial. A extensão, forma e dinâmica de uma pluma costeira é determinada pela interação entre diversos fatores, tal como a magnitude e a pulsação do aporte fluvial, a variabilidade do vento, da maré, das ondas, da batimetria, e das correntes costeiras e oceânicas, como também, da força de Coriolis que, associada ao cisalhamento do vento, produz o transporte de Ekman (WRIGHT, 1977; GARVINE, 1987; GARVINE, 1995).

O transporte de matéria na pluma ocorre em diversos estágios: a deposição inicial dos sedimentos de maior densidade ao redor da desembocadura do rio, que geralmente abrange mais de 90 % dos sedimentos fluviais; a dispersão, diluição e sedimentação gradativa do material mais fino que ultrapassa o estágio da deposição inicial; a deposição e exportação final do material ultra-fino no perímetro externo da pluma. A dispersão de matéria pelas plumas de turbidez também é afetada por outros processos relevantes que operam na zona costeira, tal como a resuspensão de matéria do fundo em áreas rasas sujeitas a altas energias dos regimes de ondas e marés, e a advecção lateral de matéria oriunda da erosão costeira (WRIGHT ; NITTROUER et al., 1995). Processos físicos-químicos (floculação, agregação e desorção) e atividades biológicas (produção primária) também podem contribuir para a variabilidade do material particulado e dissolvido (DAGG et. al., 2004).

## 1.2 MONITORAMENTO DE PLUMAS POR SENSORIAMENTO REMOTO

O monitoramento sistemático de plumas costeiras permite a identificação dos padrões de dispersão e exportação do material carregado pelo fluxo fluvial. Concentrações das variáveis biogeoquímicas caracterizam as oscilações e o estado de saúde de sistemas fluviais e costeiros, subsidiando projetos de preservação, recuperação e gerenciamento. O sensoriamento remoto por plataformas orbitais revelou-se uma ferramenta poderosa para monitorar e estudar, em larga escala, os processos oceanográficos costeiros com resolução espacial e temporal relativamente altas. Imagens do sensor *Coastal Zone Color Scanner (CZCS)*, a bordo do satélite oceanográfico *Nimbus 7 (1978-1985)*, forneceram a primeira série temporal da concentração de fitoplâncton (MÜLLER-KARGER et al., 1991). Antes do lançamento do CZCS em 1978, KRITIKOS (1974) e MUNDAY ; AFOLDI (1979) utilizaram medidas de reflectância do ERTS-A, mais conhecido como *LANDSAT 1*, para caracterização, análise e quantificação do material particulado em suspensão.

Após o sucesso do CZCS (1978-1986), demonstrando que estimativas quantitativas de variáveis biogeoquímicas tais como a clorofila-a poderiam ser derivadas de medidas radiométricas coletadas por sensores orbitais, projetos internacionais para monitorar a cor do oceano foram lançados no final da década de 90. Os mais significativos foram aqueles com capacidades de aquisição de dados globais, tais como o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS, Estados Unidos, 1997-presente)*, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS, Estados Unidos, 2002-presente)*, e o *Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS, Agência Espacial Européia, 2002-presente)*.

O recente avanço da capacidade observacional de medidas *in situ* e remotas, acoplado a algoritmos bio-ópticos tem promovido meios para se estimar e derivar uma ampla variedade de parâmetros biogeoquímicos, tais como concentração de clorofila-a, matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), total de sólido em suspensão (TSS), coeficientes de absorção dos pigmentos fitoplanctônicos, carbono orgânico particulado (COP), calcita e produtividade primária (IOCCG, 2006; DOXARAN, 2006; GOULD ; ARNONE, 2003). A base de dados armazenada ao longo dos anos possibilita análises detalhadas dos padrões espaciais e temporais estabelecidos, abrindo novas fronteiras para se entender a interação entre os forçantes físicos e as variáveis biogeoquímicas.



Diversos estudos vêm utilizando imagens de satélites para o monitoramento do fitoplâncton, do material em suspensão e CDOM. PIOLA et al. (2008) utilizaram séries temporais da concentração de clorofila obtidas por meio das imagens do sensor SeaWiFS para o rastreamento da pluma do rio da Prata. GREEN e GOULD (2008) e GREEN et al., (2008) estudaram a variabilidade das propriedades ópticas inerentes (absorção fitoplâncton, CDOM e detrito e material particulado em suspensão) na região do Golfo do México e região estuarina do rio Mississipi por meio de séries temporais de imagens do sensor MODIS e imagens SeaWiFS. Usando os produtos calcita e clorofila-a derivados das imagens SeaWiFS, SIGNORINI et al., (2006) mostraram a sucessão sazonal de espécies fitoplanctônicas ao longo da quebra da plataforma continental da Patagônia. THOMAS e WEATHERBEE (2006) estudaram a dinâmica espacial e temporal do TSS da pluma do rio Columbia a partir de uma série temporal de seis anos de imagens SeaWiFS.

### 1.3 PLUMA COSTEIRA DO RIO SÃO FRANCISCO

Permanentemente banhada pela oligotrófica Corrente Sul Equatorial (CSE), a plataforma continental adjacente à foz do Rio São Francisco (RSF) tem sido caracterizada como uma região de baixa produtividade primária, quase que totalmente dependente da drenagem continental para fertilizar a região costeira (JENNERJAHN ; ITTEKKOT, 1999; JENNERJAHN et al., 1996; MILLIMAN, 1975; BARRETO ; SUMMERHAYES, 1975). A cascata de reservatórios construídas ao longo do curso do rio alterou o fluxo de nutrientes e material particulado para a região estuarina, interferindo ainda mais sobre a já historicamente empobrecida região costeira adjacente ao estuário do RSF (KNOPPERS et al., 2005; MEDEIROS, 2003). Estudos conduzidos por SANTOS (2007) enfatizam que a redução do fluxo fluvial devido aos reservatórios construídos no leito do RSF desencadeiam processos de erosão das margens do rio e magnificam o efeito de ressuspensão sedimentar das ondas na região estuarina, alterando o equilíbrio dinâmico-sedimentar da zona costeira. MEDEIROS (2003), por meio de coletas pontuais mensais durante os anos de 2000 a 2002, constatou que o valor médio da concentração de material em suspensão carregada pelo rio sofreu redução para valores próximos à 5mg/L, muito aquém dos 70mg/L apontado por MILLIMAN (1975). Maior ressuspensão na região estuarina e

menor aporte de matéria oriunda da fonte pluvial estabelece uma nova configuração para o processo de dispersão de matéria na região costeira do RSF.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

### 2.1 OBJETIVOS

**Objetivo Geral:** Por meio da ferramenta de sensoriamento remoto pretende-se nesse estudo determinar os principais forçantes meteorológicas/oceanográficas que alteram a dinâmica da pluma do RSF pós-construção de barragens e caracterizar as águas costeiras adjacentes.

#### **Objetivos Específicos:**

- implementar e testar a eficácia de algoritmos empíricos para estimativas do material em suspensão utilizando imagens de satélite (Landsat-TM, CBERS2-CCD, Aqua-MODIS);
- quantificar e comparar as plumas de turbidez de quatro sistemas da costa leste/nordeste do Brasil, por meio de sensoriamento remoto acoplado a dados de matéria em suspensão coletados *in situ*. Os quatro sistemas, do Rio São Francisco (SE/AL), de Caravelas (BA), do Rio Doce (ES) e do Rio Paraíba do Sul (RJ), distinguem-se no aporte fluvial e na natureza da pressão humana nas bacias de drenagem;
- avaliar a variação histórica da carga de Total de Sólido em Suspensão transportada pelo RSF utilizando dados pretéritos, identificar os eventos extremos ocorridos nas últimas décadas e avaliar os que ocorreram recentemente (2004 e 2007) por meio de imagens CBERS-2 e MODIS;
- implementar o algoritmo quase-analítico (QAA) para estimar as propriedades ópticas inerentes (coeficiente de absorção e espalhamento) a partir da reflectância de sensoriamento remoto;
- aplicar o algoritmo quase-analítico (QAA) a uma série temporal de imagens MODIS para estudar a variabilidade sazonal e anual da pluma do RSF em função das propriedades ópticas, do total de sólido em suspensão e das forçantes físicas ambientais. Avaliação permanente dos impactos;

- classificar as águas na região adjacente à foz do RSF por meio das propriedades ópticas inerentes: coeficientes de atenuação do sedimento/detrimento, CDOM e fitoplâncton

## 2.2 JUSTIFICATIVAS

As plumas de turbidez dos grandes rios mundiais, tal como dos rios Amazonas, Orinoco e Paraná na América do Sul, que ultrapassam a margem da plataforma continental, foram relativamente bem estudadas (DEPETRIS ; PAOLINI, 1991; BONILLA et al., 1993; WRIGHT ; NITTROUER, 1995). Entretanto, ainda há grande escassez de informações sobre o impacto das plumas de turbidez dos rios de médio porte das regiões tropicais, inclusive do Brasil, que geralmente se restringem à zona costeira e à plataforma continental (MILLIMAN ; SYVITSKI, 1992; KNOPPERS et al., 1999b).

O RSF tem uma enorme importância devido a sua localização geográfica e a sua extensão, uma vez que drena uma área (631.133 km<sup>2</sup>) que representa cerca de 7% do território nacional. A bacia constitui, portanto, a principal conexão entre a vasta massa continental do Centro-leste e Nordeste do Brasil e o Oceano Atlântico, influenciando consideravelmente o ambiente marinho, para o qual contribui com suas cargas orgânicas e inorgânicas em suspensão. Quando se considera o ciclo dos elementos geoquímicos entre os continentes e os oceanos, quer em escala regional, quer em escala global, é necessário um bom entendimento da sua hidrobiogeoquímica. Promover meios para que o monitoramento permanente na região de interface continente/oceano possa ser efetuado utilizando sensoriamento remoto coaduna com aspectos fundamentais do gerenciamento costeiro, fornecendo subsídios para diagnósticos e avaliação permanente da qualidade da água.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A INTERFACE CONTINENTE OCEANO E O IMPACTO DE BARRAGENS

A Interface Terra-Mar representa um dos sítios principais que controlam o fluxo e o destino de água e matéria do ciclo global, incluindo o sistema de drenagem fluvial da Zona Costeira e a margem oceânica, com os estuários, as águas costeiras e as frentes oceânicas sobre a plataforma e/ou talude continental (MANTOURA et al., 1991). As margens oceânicas compreendem aproximadamente 10% da superfície e 0,5% do volume dos oceanos (WALSH, 1988). Entretanto, sustentam 25-30% da produção primária marinha global, resultado da fertilização por diversas fontes (atmosfera, rios, aquíferos e ressurgência costeira) e do acoplamento entre o sistema pelágico e bêntico na plataforma continental (BILLEN et al., 1991). Entretanto, os fluxos de água e matéria dissolvida e particulada para os oceanos vêm sendo alterados por diversos impactos ambientais, principalmente, nas bacias de drenagem.

As barragens são atividades antrópicas que infringem grande impacto não só na bacia de drenagem como também na zona costeira. A discussão sobre o impacto de barragens é de preocupação internacional (IGBP, 1990; LOICZ, 1994; HAY, 1998; SANTOS, 2007) e nacional (TUNDISI et al., 1998). Barragens retêm e transformam o material e modificam a pulsação natural do fluxo de água e material associado. O metabolismo das comunidades estuarinas e o padrão de migração de diversas espécies que utilizam estuários como berçários, também são sensivelmente alterados após a construção de barragens (HUMBORG et al., 1997).

De acordo com Mantoura e colaboradores (1991), a eficiência de retenção de sedimentos das barragens é comumente superior a 99% em grandes reservatórios. A eficiência de retenção do reservatório pode ser calculada em função do seu volume e da descarga liberada (BRUNE, 1953). E, assim como há redução de carga, há redução de tamanho de grãos transportados (exceções são observadas apenas onde há aporte de rios tributários a jusante das barragens). Em geral, os sedimentos transportados pós-barragens são tão finos que não participam da formação dos canais fluviais (CHIEN, 1985).

Petts (1987; *apud* BRANDT, 2000) agrupou os efeitos da construção de barragens em três ordens. As mudanças de primeira ordem ocorrem na carga sedimentar, vazão fluvial, qualidade de água, plâncton, etc. Os de segunda ordem são mudanças na forma do canal,

composição do substrato, povoamento por macroalgas, etc. e as mudanças de terceira ordem são em populações de peixes e invertebrados. Respostas bióticas são normalmente mais rápidas que as abióticas e seguirão juntamente com os processos físicos; variáveis bióticas de terceira ordem podem mudar antes de qualquer alteração das variáveis físicas de segunda ordem ser notada e depois, destes ajustes ocorrem continuamente até que o sistema fluvial atinja um novo equilíbrio (SANTOS, 2007).

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DOS ESTUÁRIOS

Estuários são considerados ambientes de transição entre o continente e o oceano. A produtividade estuarina é normalmente maior que a fluvial e a marinha adjacente, devido às características hidrodinâmicas da circulação que, através da retenção de nutrientes estimula a produtividade primária. Quanto maior o tempo de residência das águas estuarinas, tanto maior será a produtividade primária estuarina (WOLFF, 1980). E, por serem altamente produtivas, as águas estuarinas (e dos manguezais associados) oferecem condições ideais à renovação de recursos pesqueiros (SANTOS, 2007).

Além da geomorfologia costeiras os estuários estão sujeitos às forçantes físicas e físico-químicas, tais com as marés e o gradiente de salinidade, respectivamente. De maneira geral os estuários podem ser classificados de acordo com a geomorfologia (DAVIES, 1964), com a maré e conforme a estrutura salina (PRITCHARD, 1955 e 1967).

De acordo com a hidro-geomorfologia os estuários podem ser classificados em : lagunas, lagunas-estuarinas, estuários propriamente ditos, estuários deltáicos e deltas (Figura 3.1). A disposição de lagunas e lagunas estuarinas em relação à linha de costa é preferencialmente paralela e distinguem-se quando há abertura ou não dos cordões litorâneos que as separam do mar. Os estuários propriamente ditos possuem configuração perpendicular à costa, enquanto que os estuários deltáicos e os deltas, devido ao grande aporte fluvial, depositam sedimentos dentro e afora da desembocadura, respectivamente.

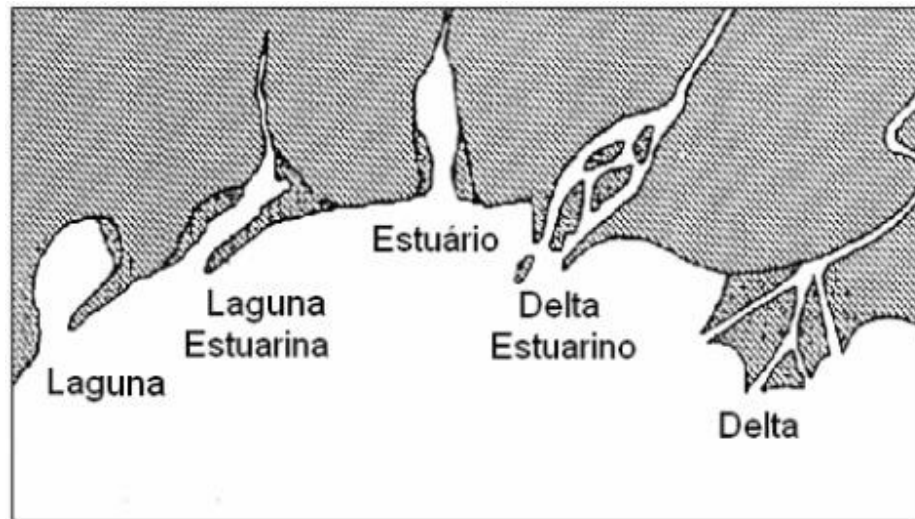


Figura 3.1 – Classificação geomorfológica dos sistemas estuarinos ( Fonte: modificado de DAVIES, 1964).

De acordo com a maré os estuários classificam-se em: micro-maré (< 2 metros de amplitude); meso-maré ( 2 a 4 metros de amplitude); macro-maré (4 a 6 metros de amplitude); e hiper-maré (mais de 6 metros de amplitude de maré). De acordo com a estrutura salina os estuários classificam-se em: estuários verticalmente misturados, são geralmente rasos, a coluna da água é misturada verticalmente, sendo homogêneo da superfície ao fundo, com salinidade crescente em direção à desembocadura do estuário; estuários levemente estratificados (parcialmente misturados), geralmente rasos, nestes estuários a salinidade também aumenta em direção à desembocadura, a água está distribuída essencialmente em duas camadas, sendo que a camada superior é um pouco menos salgada que a profunda; estuários altamente estratificados, são típicos de fiordes, a salinidade aumenta de praticamente zero, até valores de salinidade da água semelhantes a água do mar; estuários de cunha salina, a água do mar penetra semelhante a uma cunha, abaixo da água do rio.

A geomorfologia, o gradiente salino, a maré, o regime de ondas e os ventos são fatores determinantes na padrão de circulação estuarino. Todas essas variáveis ocorrem de maneira concomitante, porém pode haver alternância do grau de importância entre elas, de acordo com as características da região (SANTOS, 2007).

### 3.3 PLUMAS COSTEIRAS

Sedimentos carregados pelas águas fluviais dispersam, ao longo da plataforma oceânica, por processos diversos que operam em escalas temporais e espaciais variadas. A partir do instante que o material em suspensão deixa a foz do rio, e até tornar-se parte dos depósitos geológicos oceânicos de longa duração, o sedimento sofre diversos ciclos de transporte, deposição e ressuspensão. A natureza e intensidade dos processos que dominam esses estágios de dispersão são dependentes da taxa de transporte de matéria e água pelo rio, do regime oceanográfico costeiro, das características físicas e químicas das partículas, e da topografia e geometria da plataforma sobre a qual o material em suspensão é, um última instância, depositado. Ou seja, a dispersão da pluma de sedimento ao longo da costa é determinada pelas características hidrodinâmicas e morfológicas do sistema considerado (TUNER et al., 1990; WRIGHT ; NITTROUER, 1995; BALZER ; KNOPPERS, 1996).

O aporte fluvial, a maré e os ventos apresentam alta variabilidade, tanto espacial quanto temporal, atuam no padrão de mistura das águas estuarinas, e são fundamentais para a interpretação dos sistemas costeiros já que modulam as características hidrodinâmicas locais. Observações de campo e modelos numéricos têm mostrado que a força de *Coriolis*, que associada ao vento gera o transporte de *Ekman*, também pode exercer um importante papel na dinâmica e na distribuição espacial das plumas costeiras das regiões não equatoriais (GARVINE, 1987; O'DONNELL, 1990; MASSE ; MURTHY, 1990; MÜNCHOW ; GARVINE, 1993).

Considerando a hidrodinâmica costeira juntamente com o tamanho, forma e coesão das partículas, existe uma velocidade crítica do fluido necessária pra movimentar essas partículas. O diagrama clássico de Hjulström (1935) ilustra a relação, entre velocidade de fluxo e granulometria, que rege os processos de erosão, transporte e sedimentação (Figura 3.2). É necessária maior força para colocar em suspensão as argilas do que os sedimentos arenosos, devido às forças de coesão entre os minerais de argila, cuja superfície é maior e eletricamente insatisfeita. O oposto se observa em relação à sedimentação, as argilas permanecem em suspensão por muito mais tempo em virtude de sua forma foliar e conseqüente menor velocidade de decantação. Essas interações determinam em boa parte o alcance e a capacidade de transporte dos rios e suas respectivas plumas (SANTOS, 2007).

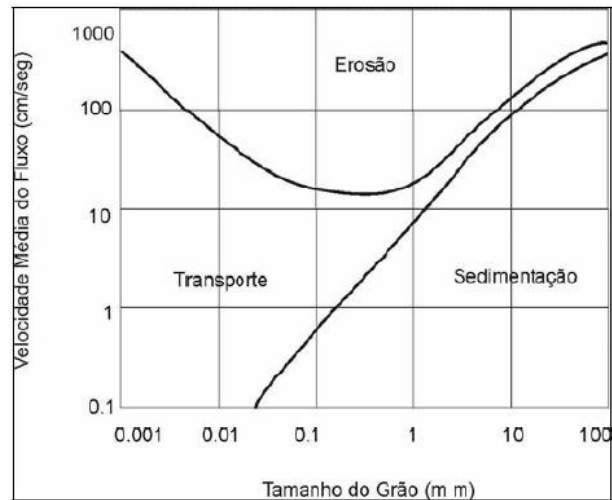


Figura 3.2 – Diagrama de Hjulström (Fonte: adaptado de SUGUIO, 1982)

WRIGHT ; NITTROUER (1995) propõem **quatro** estágios de dispersão desde o momento que o sedimento deixa a foz do rio até a fase de deposição. O diagrama da Figura 3.3 ilustra conceitualmente os estágios envolvidos no transporte. Embora o diagrama sugira que os estágios são espacialmente separados e temporalmente seqüenciais, isso não é necessariamente o caso, dois ou mais estágios podem existir simultaneamente e no mesmo local. Além do mais, o diagrama é bi-dimensional, evidenciando o transporte de través à plataforma, porém o transporte resultante da deriva litorânea muitas vezes pode ser predominante.

Os estágios I e II envolvem os processos primários nos quais a pluma, geralmente mais turva que as águas marinhas, dispersa ao longo da desembocadura do rio, reduzindo a velocidade de deslocamento e iniciando a deposição das partículas. Esses processos primários têm recebido esforços de pesquisa em gêneros diversos (WRIGHT, 1977; GARVINE, 1987; 1995; BALZER ; KNOPPERS, 1996). No estágio III, que pode ser concomitante ou subsequente ao estágio II, correntes, ondas ou mesmo irregularidades mais acentuadas do fundo marinho, por exemplo presença de *kenyon*, causam a ressuspensão, o rolamento, o retrabalhamento e novamente o transporte do material recentemente depositado. Esse estágio pode ocorrer inúmeras vezes até que o sedimento é “permanentemente” acumulado no estágio IV.



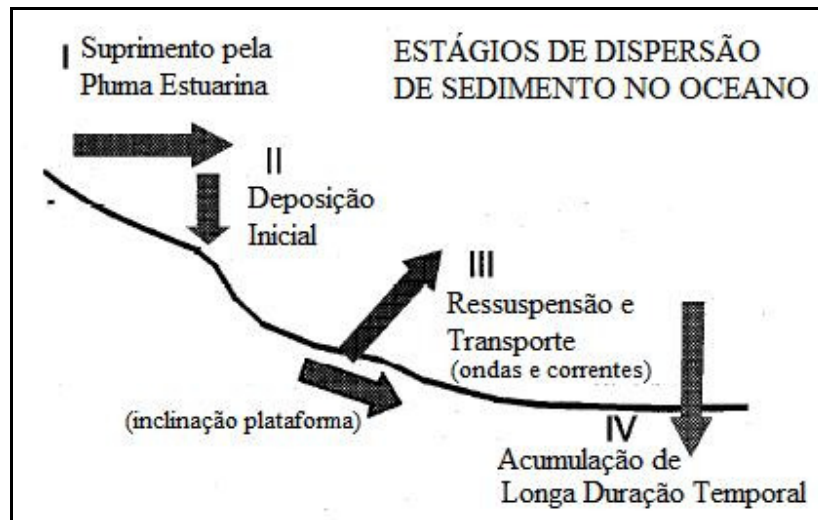


Figura 3.3 – Ilustração conceitual dos quatro principais estágios de dispersão do sedimento carregado pelas águas fluviais para a região oceânica costeira (Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995).

**Processos de Dispersão da Pluma (Estágio I):** imediatamente após deixar o leito do rio e agora sujeita aos processos físico-oceanográficos, a pluma de sedimento dispersa ao longo da costa e sobre a plataforma, estabelecendo a deposição inicial (Estágio II) dos sedimentos de maior densidade ao redor da desembocadura do rio. Grande parte do aporte de sedimentos, mais de 80 %, que chega à costa, é retido nos estuários, deltas e águas costeiras rasas ( TUNER et al., 1990; WRIGHT ; NITTROUER, 1995). A deriva gravitacional da pluma ( $\hat{g}$ ), ou flutuabilidade da pluma, é um dos principais forçantes que determinam a distância a partir do qual o sedimento se afasta da desembocadura do rio, antes que a deposição inicial ocorra. A deriva gravitacional depende do gradiente de densidade entre o ambiente marinho e a água fluvial, com a densidade variando em função da salinidade, temperatura e da concentração de sólido em suspensão. A oscilação da maré e a mistura induzida pelo regime de ondas, também podem interferir no contraste de densidade do meio. Ou seja,  $\hat{g}$  e o comportamento inicial da pluma dependem da razão carga de sedimento e descarga fluvial, e dos agentes de mistura tais como o vento, variação da maré e altura de onda (WRIGHT et al., 1990).

A grande maioria das plumas fluviais possuem  $\hat{g} > 0$ , pois a carga de sólido em suspensão nas plumas raramente é grande o suficiente para superar a diferença de densidade ocasionada pelo contraste salino (DAGG et al., 2004). Casos como o rio Huanghe são exceções, onde altas concentrações do total de sólido em suspensão,  $25 \text{ kg m}^{-3}$  (QIN ; LI, 1983), faz com

que a pluma tenha um  $\hat{g} < 0$  no ambiente marinho. Correntes de maré, ondas ou mesmo frentes estuarinas também podem favorecer maior densidade devido ao aumento da concentração de sólidos em suspensão, em relação à densidade induzida pela salinidade (KINEKE et al., 1991). A Figura 3.4 ilustra o conceito de flutuabilidade positiva e negativa das plumas fluviais.

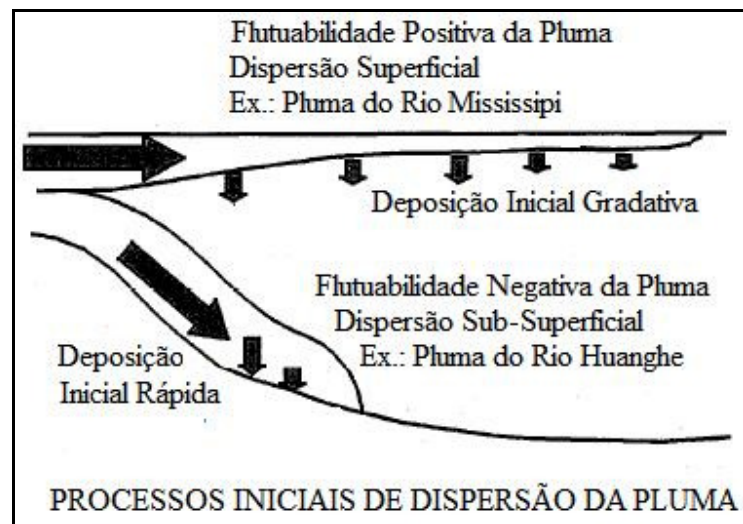


Figura 3.4 – Ilustração conceitual da flutuabilidade positiva e negativa das plumas fluviais (Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995).

De maneira geral, alta descarga fluvial, com  $\hat{g} > 0$ , associada a baixa concentração de material em suspensão e baixa velocidade de deposição das partículas, resulta num padrão de dispersão da pluma relativamente distante da fonte de origem antes que a deposição inicial aconteça.

**Deposição Inicial (Estágio II):** como mencionado, a deposição inicial está relacionada ao processo seletivo em função da velocidade de deposição das partículas. Com isso, pode-se dizer que existem dois grupos distintos de sedimentos, os sedimentos arenosos e os finos: silte e argila. A grande área superficial das argilas, função do seu diâmetro reduzido (inferior a 0,004mm), contribui enormemente para a adsorção e subsequente sedimentação. Dessa forma, os processos seletivos de adsorção, agregação e floculação ao longo da plataforma continental, podem também ter influencia significativa na velocidade de deposição das partículas, favorecendo uma deposição mais rápida próximo à foz. São considerados seletivos porque a taxa de remoção das partículas é condicionada ao gradiente salino e à constituição físico-química do material particulado (DAGG et al., 2004; GEYER et al., 2004).

Estudos conduzidos por WRIGHT (1977) e HOEKSTRA (1988) concluíram que a deposição inicial mais rápida acontece imediatamente após a foz dos rios rasos que transportam sedimentos arenosos, e está relacionada com uma rápida dispersão e desaceleração do fluxo devido aos processos de fricção turbulento com o fundo; porém, esse tipo de dispersão é incomum para os grandes rios. Zona de arrebentação de ondas próxima à desembocadura favorece a mistura e troca de momento entre a pluma e as águas oceânicas, agilizando a deposição inicial nesse região, principalmente quando a vazão do rio for baixa (WRIGHT et al., 1980).

**Resuspensão e Transporte (Estágio III):** nas regiões um pouco mais afastadas da desembocadura do rio, muitas vezes, a combinação da agitação do fundo pelo regime de ondas, das correntes costeiras e das correntes de maré criam um forte estresse no fundo marinho, que ressuspende os sedimentos oriundos da deposição inicial, ocasionando a redistribuição do material ao longo da linha de costa (WRIGHT, 1985). Esse processo é particularmente mais evidente quando há bancos submersos próximos à desembocaduras de estuários, relativamente rasos e sujeitos a intensos regimes de ondas e marés (Figura 3.5). Em situações onde a região ao longo da plataforma continental permanece em regime de alta energia durante o ano todo, ou onde condições de alta energia coincida com alta vazão fluvial, o processo de ressuspensão pode acontecer simultaneamente com a deposição inicial, ou esta pode ocorrer com atraso (GEYER et al., 2004).

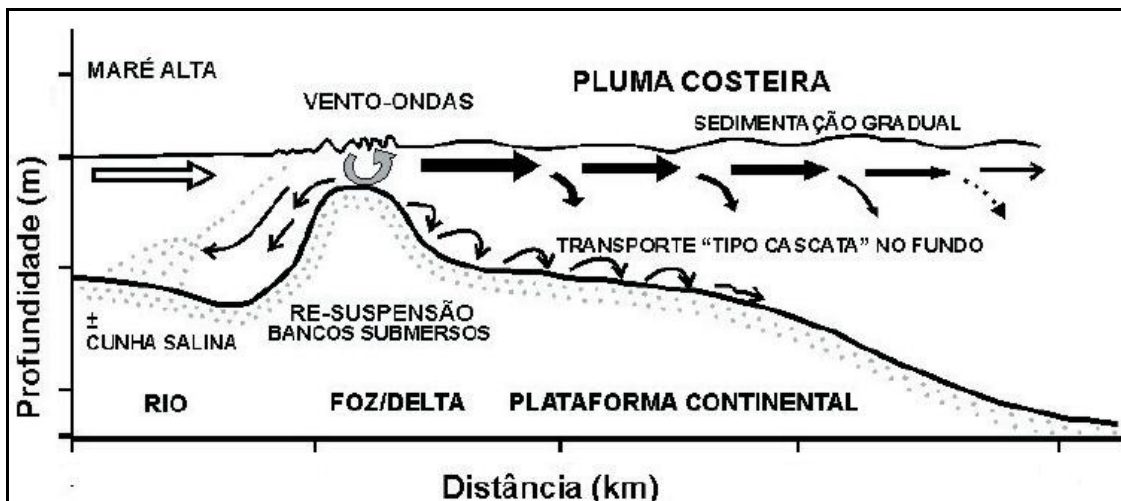


Figura 3.5 – Modelo representando o processo de ressuspensão ocasionado por bancos submersos nas regiões estuarinas (Fonte: adaptado MEDEIROS et al., 2007).

**Acumulação de Longa Duração Temporal (Estágio IV):** os estágios III e IV são ligados pela camada superficial de mistura (Figura 3.6). Dentro da camada superficial de mistura, as partículas são retrabalhadas por processos físicos e biológicos (RHOADS, 1974; SANFORD, 1992). Ondas e correntes causam estresse erosivo, transporte e redeposição das partículas. Organismos bênticos ingestam as partículas a uma certa profundidade do camada de mistura e defecam na superfície; algumas espécies expelem o material fecal diretamente na coluna d'água; outros organismos movem as partículas lateralmente por meio dos mecanismos de locomoção e alimentação (RHOADS, 1974). A camada superficial de mistura é a região do assoalho oceânico em que as partículas ainda interagem com os processos oceanográficos do ambiente.

A diferença entre erosão e deposição ao longo do tempo determinam a taxa de acumulação. A espessura da camada superficial de mistura é dependente do tipo e da intensidade dos processos físicos e biológicos, e tem espessura típica de 10 centímetros (NITTROUER et al., 1979), porém pode estender além dos 100cm onde ocorrem processos físicos intensos ou organismos cujo habitat é caracterizado por covas mais profundas (WRIGHT ; NITTROUER, 1995).

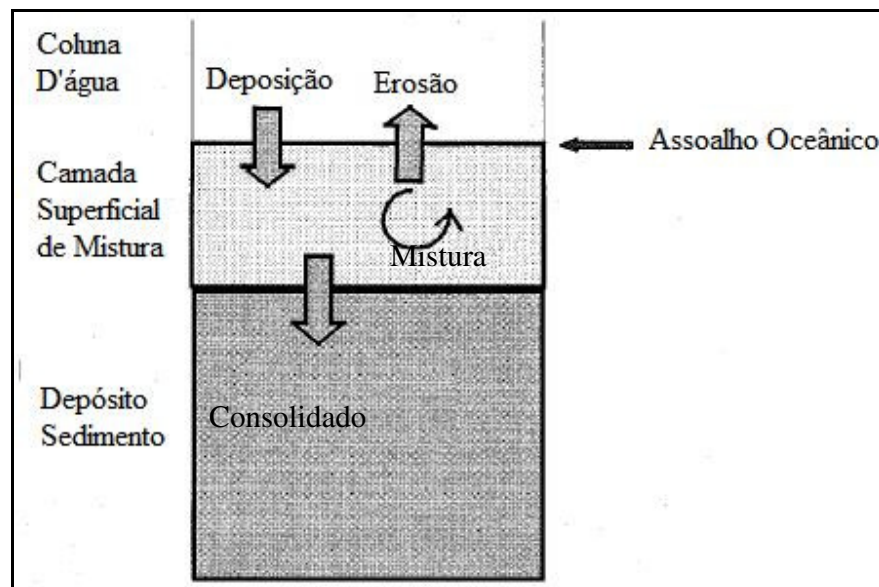


Figura 3.6 – Ilustração conceitual da camada superficial de mistura e sua relação com o processo de acumulação de sedimento (Fonte: adaptado de WRIGHT ; NITTROUER, 1995).

O tempo de residência da camada superficial de mistura determina a duração dos processos físicos e biológicos que atuaram nas partículas antes que estas sejam consolidadas no depósito sedimentar. Isso é um fator importante pois os processos operam seletivamente, movendo algumas partículas para cima e outras para baixo dependendo das características das partículas (tais como, tamanho, forma, mineralogia). Tempos de residência longos permitem que esses mecanismos seletivos sejam mais efetivos, causando uma mudança na natureza do sistema de dispersão do sedimento em relação à distância da desembocadura do rio. Por exemplo, geralmente o tamanho da partícula torna-se menor com a distância (NITTROUER ; STERNBERG, 1981).

No ambiente marinho, o sistema de dispersão fluvial é representado por uma língua de sedimento sobre o assoalho da plataforma continental. A dispersão vai além da foz do rio, na direção predominante do transporte de sedimento pela pluma, demonstrando o aporte do material particulado da fonte fluvial. O assoalho marinho é uma das partes do sistema de dispersão e representa o processo deposicional de longa duração (escala temporal de  $10^3$  anos) do material particulado originalmente em suspensão na pluma estuarina (NITTROUER ; WRIGHT et al, 1994).

### 3.4 FRENTES COSTEIRAS

“Frentes” são o resultado do encontro entre diferentes massas de água que, devido aos seus constituintes, apresentam-se com características físicas, químicas e biológicas distintas, com implicações ecológicas. Podemos dividir as frentes em dois tipos básicos: as frentes oceânicas e as costeiras. As primeiras são o resultado do encontro de massas de água com variações na salinidade, temperatura e densidade, sendo de grandes dimensões e de pequena variação no tempo. Já as frentes costeiras, de águas rasas, são encontradas: nos estuários e, por isso, denominadas de frentes estuarinas; e nas frentes das plumas fluviais, que são o resultado das descargas fluviais no oceano. As frentes costeiras são consideradas de pequena dimensão, com grande variação temporal. Frentes estuarinas são geralmente localizadas paralelas ao eixo do estuário, podendo estender-se longitudinalmente por dezenas de quilômetros, e as frentes das plumas são formadas na interface entre as águas doces, oriundas da descarga fluvial no oceano, e marinhas. Dependendo da taxa de descarga do rio e da geomorfologia da região, a mistura das

frentes de plumas pode se localizar no interior do estuário ou diretamente no oceano (BOWMAN ; ESAIAS, 1977).

As mudanças nas proximidades ao longo das frentes são radicais. A forte convergência das correntes nestas frentes, são muito eficazes na acumulação de matéria orgânica e detritos. Assim, as massas de água separadas pelas frentes, freqüentemente diferem na turbidez, nas propriedades espectrais da luz emergente da água, na temperatura e na salinidade; dentre outros processos e/ou feições que ocorrem junto às frentes, podemos citar: refração de ondas, produção de espumas e acumulação de detritos. As frentes representam regiões de fortes gradientes e descontinuidades dos parâmetros físico, sendo os mais importantes a velocidade da água e as mudanças de densidade. As frentes costeiras são similares às frentes atmosféricas onde os fluidos mais densos tendem a descer sob os fluidos mais leves, determinando desta forma uma interface inclinada (Figura 3.7-d).

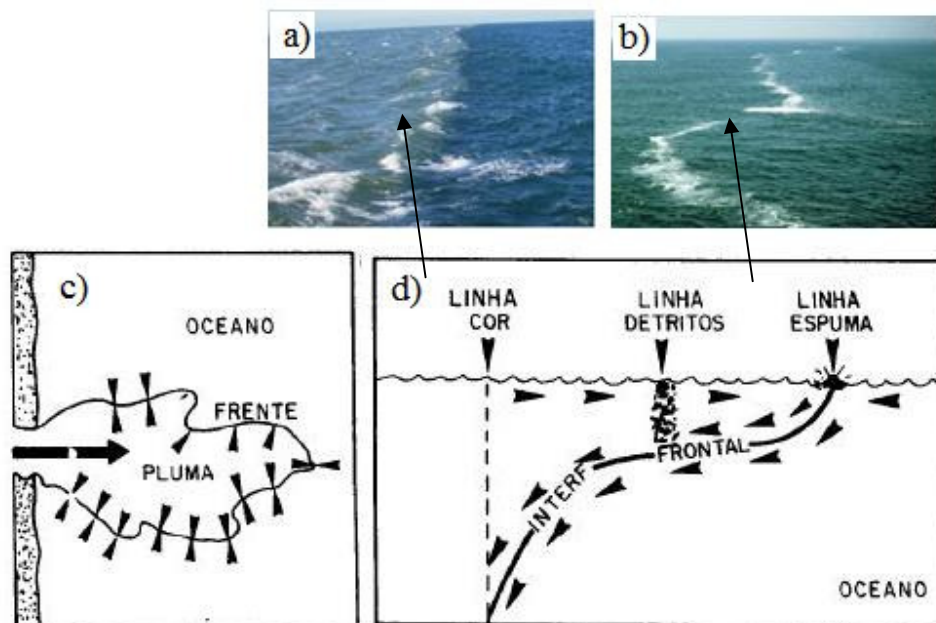


Figura 3.7 – Frente Costeira: a) linha de cor; b) linha de espuma; c) diagrama da frente da pluma fluvial e fricção interfacial; d) corte transversal da pluma, com destaque para as linhas de espuma, detritos e cor (Fonte: adaptado de BOWMAR ; ESAIAS, 1977).

A Figura 3.7-c representa a formação da frente gerada pela entrada de água doce no oceano e a fricção interfacial entre as massas de águas. A água doce irá se misturar, gradualmente, com as águas marinhas. O decréscimo da velocidade da água doce também é gradual, dependendo do volume da descarga, velocidade da corrente fluvial e dinâmica costeira

local. A Figura 3.7-d mostra a dinâmica produzida por uma convergência marcada na superfície, onde se observa que as linhas de convergência concentram espuma (Figura 3.7-b), detritos, e alternância da cor (Figura 3.7-a). As linhas tendem a ser paralelas, separadas por alguns metros e com tonalidades diferentes (BOWMAN ; ESAIAS, 1977).

### 3.5 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DO OCEANO

Quantitativamente a luz pode ser descrita de acordo com sua distribuição espectral. A luz de comprimento de onda maior que 760 nm (nanômetro) é considerada como luz infravermelha (IR), e a luz de comprimento de onda menor que 300 nm é designada como ultravioleta (UV). O intervalo de comprimentos de onda entre IR e UV é chamado de visível (PARSONS et al., 1983). O monitoramento do espectro eletromagnético na região do visível por sensores orbitais destinados ao mapeamento oceânico tem impulsionado significativamente o entendimento de muitos processos biogeoquímicos e ecológicos dos ambientes marinhos.

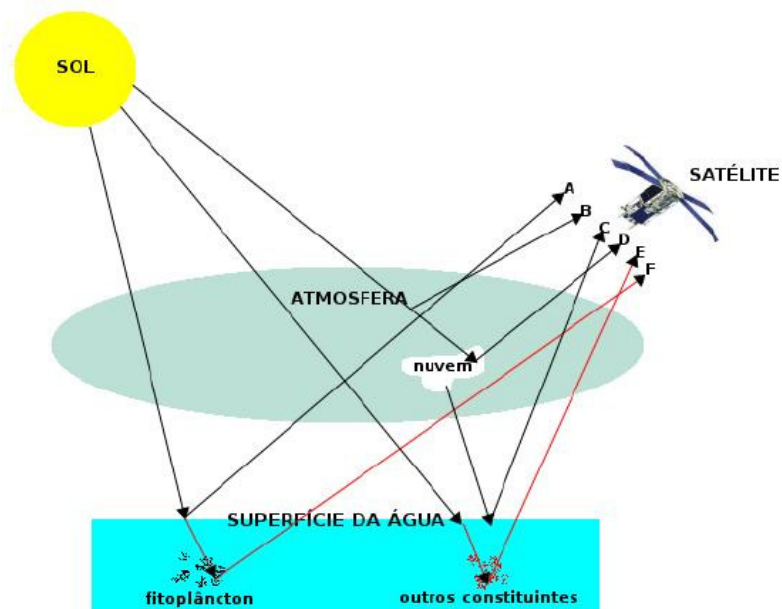


Figura 3.8 – Trajetória da Luz em direção ao sensor remoto orbital

O sensoriamento remoto da cor do oceano é realizado com o uso de sistemas sensores passivos. Estes sistemas empregam sensores com campo de visada estreito, capazes de monitorar



o fluxo radiométrico que chega aos seus detectores em diferentes comprimentos de onda, nas faixas do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Os sensores remotos passivos podem ser instalados em satélites, aeronaves, ou qualquer outra plataforma remota, operam durante o dia, e sua fonte de energia é o próprio Sol (KAMPEL ; NOVO, 2005).

A intensidade e a qualidade do fluxo radiante é alterada em função das trajetórias dos fótons durante o percurso Sol-água-sensor (Figura 3.8). As principais contribuições podem ser atribuídas: ao espalhamento dos fótons pela atmosfera; à reflexão do sol na superfície do mar; ao espalhamento e absorção pela água propriamente dita e pelo material dissolvido e particulado em suspensão presentes no ambiente marinho (fitoplâncton, sedimento em suspensão e matéria orgânica dissolvida que confere cor a água). As contribuições atmosféricas e reflexão especular da luz solar na superfície da água são ruidos, e devem ser corrigidas. No caso dos sensores orbitais, mais de 80% da luz coletada pelos sensores são oriundos da atmosfera (MOREL, 1980). Somente a luz emergente da água contém informações úteis sobre o ambiente marinho (IOCCG, 2000).

O sensoriamento remoto dos oceanos envolve a análise de variações na magnitude e qualidade espectral da radiação emergente da água para derivar informações quantitativas sobre os tipos de substâncias presentes em seu volume e suas concentrações. Isto deve se basear num bom entendimento das propriedades ópticas do meio, e dos processos ópticos que ali ocorrem. Quando analisamos as propriedades ópticas desse meio, precisamos distinguir os efeitos da água pura sobre o campo de luz submerso dos efeitos oriundos da presença de material dissolvido e particulado em suspensão na coluna d'água. Três principais constituintes opticamente ativos, além da água pura, influenciam as propriedades ópticas de corpos d'água naturais (IOCCG, 2000; KAMPEL ; NOVO, 2005):

- *Fitoplâncton*: inclui o fitoplâncton e outros organismos microscópicos. Por conveniência, chamado de componente fitoplanctônico, devido a maior contribuição desse componente em relação aos demais organismos microscópicos;
- *Material em suspensão (inorgânico)*: mesmo reconhecendo que os organismos microscópicos também são materiais em suspensão, usa-se esse termo para representar somente o material de natureza inorgânica, uma vez que as partículas inorgânicas apresentam um índice de refração muitas vezes maior do que as partículas orgânicas e, portanto, dominam o sinal retroespalhado pelo conjunto de partículas em suspensão (MOBLEY, 1984);



- *Substâncias amarelas (ou CDOM)*: são as substâncias orgânicas, dissolvidas, coloridas (coloração atribuída aos compostos húmicos: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina). Operacionalmente definido como o material que passa por um filtro de porosidade:  $0.2\mu\text{m}$  (NELSON ; SIEGEL, 2002; apud BELANGER et al., 2008, pág.1).

### 3.5.1 Princípios Físicos

A cor intrínseca da superfície do mar é definida pelas variações espectrais de sua reflectância,  $R(\lambda, z)$ , na superfície [ $R(\lambda, z)$  é adimensional]. Em qualquer profundidade  $z$ ,  $R(\lambda, z)$  é definido como:

$$R(\lambda, z) = E_u(\lambda, z) / E_d(\lambda, z) \quad (3.1)$$

onde,  $E_u(\lambda, z)$  é a irradiância ascendente (fluxo por unidade de área superficial,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ), no comprimento de onda  $\lambda$  e profundidade  $z$ ; e  $E_d(\lambda, z)$  é a irradiância descendente, no mesmo comprimento de onda e profundidade. Essas irradiâncias medidas em superfícies planas (coletor co-seno plano) devem ser distinguidas da irradiância escalar, que é medida pelo fluxo recebido de todas as direções em um coletor esférico. A irradiância escalar normalmente recebe a notação  $E_0$ , tendo as mesmas dimensões que a irradiância. Também pode ser dividida em componentes descendente e ascendente ( $E_{0d}$  e  $E_{0u}$ , respectivamente).

A irradiância ascendente é uma medida de toda a luz que deixa a superfície do mar. Entretanto, um sensor com um campo de visada limitado não consegue detectar todo o sinal que deixa a superfície, uma vez que a forma dos detectores e suas respectivas geometrias de visada restringem o sinal a uma pequena fração do fluxo original. Dessa forma, uma descrição do campo luminoso estaria incompleta se não incluísse nenhuma informação sobre como os fluxos variam em função das direções. Esta descrição mais completa é fornecida pela medida de radiância, que mede o fluxo eletromagnético por unidade de área e por unidade de ângulo sólido. Se  $L(\lambda, z, \theta, \phi)$  — unidade:  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  — for a radiância na direção definida pelo ângulo zenital  $\theta$  e ângulo azimutal  $\phi$  (Figura 3.9), então as várias irradiâncias de interesse podem ser obtidas pela integração de  $L(\lambda, z, \theta, \phi)$  nos ângulos apropriados (IOCCG, 2000; KAMPEL, 2003). Por exemplo:

$$E_d(\lambda, z) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\lambda, z, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.2)$$

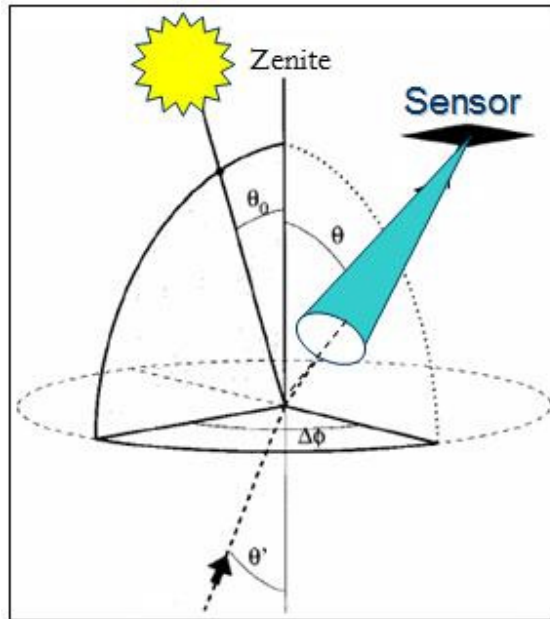


Figura 3.9 – Geometria de Aquisição Radiométrica

Aqui, a direção de visada vertical para baixo representa o ângulo zenital zero. As irradiâncias ascendentes ( $E_u$  e  $E_d$ ) podem ser obtidas similarmente à distribuição de radiância, integrando-se em todos os ângulos zenitais entre  $\pi/2$  e  $\pi$ . Maiores detalhes sobre a geometria podem ser encontrados em MOBLEY (1999).

No contexto do sensoriamento remoto, é comum usar a Reflectância de Sensoriamento Remoto,  $R_{rs}(\lambda, z, \theta, \phi)$ , unidade:  $\text{sr}^{-1}$ , (GORDON et al., 1988), que é fortemente correlacionada com a reflectância da superfície do mar,  $R(\lambda, z)$ , mas que faz uso da radiância ascendente ao invés da irradiância ascendente, e é definida como:

$$R_{rs}(\lambda, \theta, \phi) = L(\lambda, \theta, \phi) / E_d(\lambda, \theta) \quad (3.3)$$

Os argumentos  $\theta$  e  $\phi$  em  $L(\lambda, \theta, \phi)$  indicam que a radiância que deixa o corpo d'água pode variar com o ângulo de visada, na superfície:  $z = 0$  (IOCCG, 2000; KAMPEL, 2003).

Devido a variabilidade de  $L(\lambda, z, \theta, \phi)$  com as horas do dia, com os dias do ano e com a geometria do campo de luz, a radiância normalizada [ $nL(\lambda, z)$ , GORDON, 2005] é muitas vezes utilizada em detrimento da radiância propriamente dita. Muito pouco dependente do ângulo zenital solar e da geometria de visada (GORDON ; CLARK, 1981), a  $nL(\lambda, z)$  é calculada multiplicando-se  $R_{rs}(\lambda, \theta, \theta, \phi)$  pela irradiância solar extraterrestre média,  $F_0(\lambda)$ , que é bem conhecida para um dado comprimento de onda no topo da atmosfera (SOUTO et al., 2005):

$$nL(\lambda, \theta) = F_0(\lambda) * R_{rs}(\lambda, \theta, \theta, \phi) \quad (3.4)$$

De maneira geral, as variáveis ópticas:  $R_{rs}(\lambda)$ ,  $L(\lambda)$  e  $nL(\lambda)$  (por brevidade de notação, a dependência angular será suprimida daqui pra frente) são os parâmetros de entrada para os principais algoritmos bio-ópticos que buscam estimar as propriedades ópticas inerentes e variáveis geoquímicas tais como a concentração de clorofila-a, material em suspensão e CDOM (GORDON et al, 1983; CARDER et al., 1999; LEE et al., 2002).

### 3.5.2 Propriedades Ópticas

A cor do oceano, assim como  $R_{rs}(\lambda)$  e  $L(\lambda)$ , podem ser modificadas pela estrutura angular zenital do campo de luz incidente, em outras palavras, são Propriedades Ópticas Aparentes (POA's). As propriedades ópticas aparentes são aquelas influenciadas pela distribuição angular do campo de luz, assim como pela natureza e quantidade de substâncias presentes no meio (KIRK, 1994).

Quando a luz de um determinado comprimento de onda interage com o meio aquático, ela é absorvida ou espalhada tanto pela água como pelas substâncias particuladas e dissolvidas presentes no meio. O processo de espalhamento e absorção da luz no meio marinho definem as principais Propriedades Ópticas Inerentes (POI's): coeficiente de absorção,  $a(\lambda)$  (unidade:  $m^{-1}$ ), e coeficiente de espalhamento,  $b(\lambda)$  (unidade:  $m^{-1}$ ). A soma de  $a(\lambda)$  e  $b(\lambda)$  determina o coeficiente de atenuação do meio aquático:  $c(\lambda)$ . O  $b(\lambda)$  pode ainda ser separado na componente espalhamento para frente (*forward*):  $b_f(\lambda)$ ; e retro-espalhamento (*backscattering*):  $b_b(\lambda)$ . Diferente das POA's, as POI's não dependem da geometria do campo de luz radiante (KIRK, 1994).

Assim, uma outra forma de expressar  $R_{rs}(\lambda)$  é por meio das POI's. Ou seja:

$$R_{rs}(\lambda) = L(\lambda) / E_d(\lambda) \approx f * \{b_b(\lambda) / [a(\lambda) + b_b(\lambda)]\} \quad (3.5)$$

onde  $f$  é uma constante adimensional que depende da função de espalhamento volumétrico do meio aquático e da estrutura geométrica do campo de luz incidente, — geralmente  $f=0.33$ , válido para o sol próximo do zênite e uma variedade significativa de ambientes aquáticos (KIRK, 1994). A função de espalhamento volumétrico relaciona o espalhamento do material particulado em suspensão na água com o ângulo de espalhamento; integrando-se a função de espalhamento volumétrico em todas as direções de ângulo sólido, obtém-se o coeficiente de espalhamento. O coeficiente de retroespalhamento [ $b_b(\lambda)$ ] que aparece no denominador da Equação 3.5 é geralmente negligenciado para aplicações práticas em águas oceânicas, porém, relevante em águas costeiras (IOCCG, 2006; CARDER et al., 1999; KIRK, 1994; MOREL ; PRIEUR, 1977).

As POI's podem também ser divididas em partes, conforme as contribuições dos principais constituintes opticamente ativos. Ou seja, o coeficiente de absorção total ( $a$ ) pode ser separado em partes correspondentes: à água ( $a_w$ ), ao fitoplâncton ( $a_{ph}$ ), e à matéria dissolvida colorida e detritos ( $a_{CDM}$ ); e o coeficiente de espalhamento total ( $b$ ) pode ser separado em partes correspondentes: à água ( $b_w$ ) e ao material particulado inorgânico em suspensão ( $b_p$ ), como a seguir:

$$a = a_w + a_{ph} + a_{CDM}, \quad (3.6)$$

$$b = b_w + b_p \quad (3.7)$$

Os coeficientes de absorção e espalhamento da água podem ser encontrados em POPE ; FRY (1997). O CDOM e o material detritico (entenda-se como detrito o material biológico em degradação de origem fitoplanctônica ou bacteriana), por absorver a luz de forma similares (BRICAUD et al.,1981; ROESLER et al., 1989), são de difícil separação, e, portanto, geralmente estimados por meio dos algoritmos bio-ópticos como uma única componente: absorção devido à matéria dissolvida colorida ( $a_{CDM}$ ) (SIEGEL et al., 2002; LEE et al., 2002). Nas regiões costeiras o coeficiente de espalhamento ( $b$ ) geralmente é dominado pela porção inorgânica (IOCCG, 2006).

Usualmente as massas de águas marinhas são classificadas de acordo com os constituintes opticamente ativos presentes na água (JERLOV, 1976). Recentemente GOULD ;

ARNONE (2003) propuseram a classificação das massas de água em função das propriedades ópticas inerentes. De um ponto de vista mais genérico, as águas também são classificadas como águas do Caso 1 e águas do Caso 2. Por definição, as águas do Caso 1 são aquelas nas quais o fitoplâncton, assim como todo o material de origem biológica covariante com ele, é o principal constituinte opticamente ativo responsável por variações nas propriedades ópticas da água. Por outro lado, as águas do Caso 2 são influenciadas não somente pelo fitoplâncton, mas também por outros constituintes opticamente ativos, geralmente de origem alóctone, tais como as partículas inorgânicas em suspensão e a matéria dissolvida colorida (MOREL ; PRIEUR, 1977; GORDON ; MOREL, 1983).

### 3.5.3. Comportamento Espectral

As águas oceânicas possuem poucos componentes suspensos e dissolvidos (Caso 1), e sua reflectância é dominada pelas propriedades óptica da água pura. Em razão da absorção e do espalhamento no interior do corpo d'água, apenas uma pequena fração da energia incidente sobre a água é refletida de volta à superfície, o que ocasionando uma baixa reflectância e torna a cor do mar azul escuro. Isso se deva ao fato de que o coeficiente de absorção da água pura é muito pequeno na região do visível do espectro eletromagnético, aumentando gradativamente na região do vermelho e intensamente na região do infravermelho próximo, 800nm; e, por outro lado, a água pura possui um elevado coeficiente de espalhamento na região de comprimentos de onda mais curtos (região do azul, 400nm), que decresce para os comprimentos de onda mais longos (Figura 3.10).

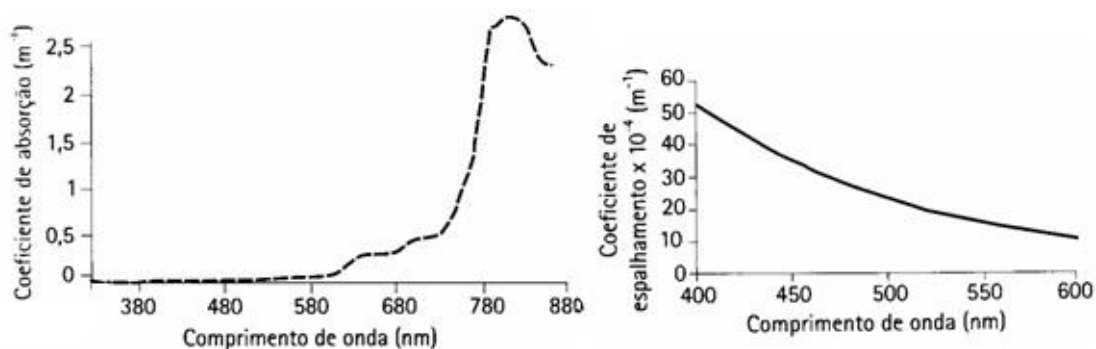


Figura 3.10 – Coeficientes de absorção e espalhamento da água pura (Fonte: SOUZA, 2005).

A curva típica da reflectância de sensoriamento remoto em águas costeiras (Caso 2) é apresentada na Figura 3.11, juntamente com as curvas representativas dos principais constituintes opticamente ativos que modulam a reflectância de sensoriamento remoto de acordo com as características desses constituintes. O coeficiente de retroespalhamento ( $b_b$ ) engloba a parte devido a água pura ( $b_{bw}$ ) e a componente devido às partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão ( $b_{bp}$ ). A característica do sinal de retroespalhamento é uma curva de característica uniforme ao longo do espectro visível, com um decréscimo suave com o aumento do comprimento de onda. Superposto ao sinal de espalhamento, tem-se o efeito de absorção devido aos pigmentos fitoplanctônico, com picos de absorção da clorofila-a em 443 nm e 675 nm, e o efeito de absorção devido ao CDOM e material detritico, com uma curva exponencial decrescente com o aumento do comprimento de onda e valores mais acentuados de absorção para os comprimentos de onda menores que 550 nm. Após esse comprimento de onda, o coeficiente de absorção da água passa a ter papel mais relevante (BRICAUD et al., 1981; IOCCG, 2002, 2006).

A composição dos pigmentos fitoplanctônicos varia de acordo com as espécies de fitoplancton, ou com o estado fisiológico de uma determinada espécie (IOCCG, 2000; SATHYENDRANATH et al., 1987). Estudos mostraram que variações na curva do coeficiente de absorção devido ao fitoplâncton estão relacionadas à composição dos pigmentos, fotossintéticos ou fotoprotetores, e também ao que se denomina efeito “pacote” [ou, *packaging effect*, (MOREL ; BRICAUD, 1981; BRICAUD et al., 1983; BRICAUD ; STRAMSKI, 1990; ROESLER et al., 1989)]. O acréscimo da densidade de pigmentos dentro da célula, ou acréscimo do tamanho e da constituição da célula fitoplanctônica, origina uma curva de absorção da luz diferente da curva de absorção observada se a mesma concentração de pigmentos fitoplanctônicos estivesse presente numa solução, essa não linearidade caracteriza o fenômeno denominado efeito “pacote” (KIRK, 1983). O problema inverso que busca estimar a composição e concentração dos pigmentos fitoplanctônicos a partir do espectro de absorção não é uma tarefa trivial, já que no ambiente natural, diversos pigmentos estão presentes nas populações fitoplanctônicas e as bandas de absorção de um pigmento específico se sobrepõe a outros, junta-se a isso o efeito “pacote” que pode influenciar a curva espectral do coeficiente de absorção.

Segundo BRICAUD et al., (1981), o espectro de absorção do CDOM/detrito pode ser representado pela curva exponencial a seguir:

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)], \text{ (unidade de } \lambda \text{ é em nm),} \quad (3.8)$$

com  $S$  assumindo um valor médio de 0.015, independente da escolha de  $\lambda_0$  (BRICAUD et al., 1981). O fator  $S$  de inclinação espectral da curva de  $a_{CDOM}(\lambda)$ , difícil de ser estimado por sensoriamento remoto, está associado à substâncias dissolvidas presentes no meio aquático, podendo variar entre 0.01 a 0.02nm<sup>-1</sup> (BRICAUD et al., 1981; KIRK, 1994). Em estudos costeiros (água do Caso 2), o valor médio de 0.015 tem sido utilizado (KIRK, 1994; LEE et al., 2002; CARDER et al, 1999; LEE ; CARDER, 2004). As substâncias dissolvidas coloridas (CDOM) afetam somente o espectro de absorção, enquanto o material em suspensão de origem inorgânica influencia fortemente o coeficiente de retroespalhamento, com menor, embora não desprezível, impacto sobre o coeficiente de absorção.

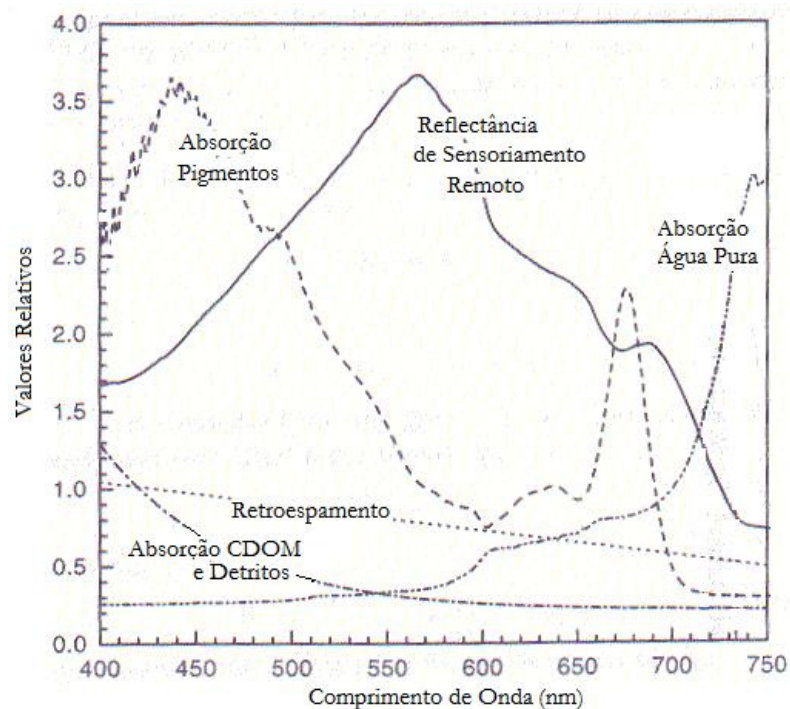


Figura 3.11 – Curvas típicas da reflectância de sensoriamento remoto, da absorção devido aos pigmentos fitoplanctônicos, da absorção CDOM/detrimentos, da absorção água pura, e do coeficiente de retroespalhamento devido ao material particulado em suspensão. As curvas estão sobrepostas para demonstrar como o coeficiente de absorção e de retroespalhamento interagem para determinar a curva resultante de reflectância nas regiões costeiras (Fonte: adaptado de GOULD et al., 2001).

O decréscimo acentuado da reflectância de sensoriamento remoto para os comprimentos de onda acima de 700nm (Figura 3.11) é causado pelo aumento drástico da absorção devido à

água pura. Nessa região do infravermelho próximo, há uma forte relação entre o coeficiente de retro-espalhamento e a reflectância (GOULD et al., 2001), pois o coeficiente de absorção da água pura é o principal contribuinte para a absorção total, e o espectro de absorção para a água pura é bem definido e conhecido (POPE ; FRY, 1997).

Tipicamente, as técnicas de correção atmosférica para as águas do Caso 1 se baseiam na premissa de que a reflectância de sensoriamento remoto aproxima-se de zero no domínio do infravermelho próximo. Entretanto, nas regiões costeiras, águas do Caso 2, essa premissa pode não ser verdadeira, pois o material particulado em suspensão de origem inorgânica faz com a reflectância de sensoriamento remoto não seja desprezível devido ao retroespalhamento ocasionado pelo material particulado em suspensão (GOULD et al., 2001, KAMPEL, 2003).

A região do espectro do visível em torno de 550 nm é caracterizada por altos valores de reflectância (Figura 3.11), deslocando-se ligeiramente para comprimentos de onda maiores com o aumento da carga de material particulado em suspensão. Essa região do espectro possui contribuição relativamente menor dos principais constituintes opticamente ativos (pigmentos fitoplanctônicos, CDOM/detrimento e a água pura) para o coeficiente de absorção total, predominando o efeito do retroespalhamento, que, de maneira geral, nas regiões costeiras, é fortemente condicionado pelo material particulado inorgânico em suspensão (BRICAUD et al., 1983; MOREL ; AHN, 1991). Devido a isso, o coeficiente de retroespalhamento no comprimento de onda 550nm é usualmente utilizado para estimativas do material particulado em suspensão (GOULD ; ARNONE, 2003).

Segundo SATHYENDRANATH et al. (1989), o espalhamento ocasionado pelo material particulado em suspensão geralmente é considerado um fator de primeira ordem que determina a variabilidade do espectro da reflectância de sensoriamento remoto nas regiões costeiras. Consequentemente, a carga de material particulado em suspensão, num primeiro momento, poderia ser estimada com um alto grau de confiança a partir de medidas da reflectância em campo ou por sensores orbitais. Entretanto, a variabilidade das propriedades ópticas do material particulado inorgânico em suspensão também estão condicionadas à forma, tamanho e constituição geoquímica da partícula.



#### 3.5.4. Algoritmos

As propriedades ópticas inerentes: coeficientes de absorção e espalhamento, juntamente com a luz solar que atinge a superfície da água, determinam a cor da água, a qual pode ser mensurada por meio da radiância ou da reflectância de sensoriamento remoto. Como as propriedades ópticas inerentes estão diretamente ligadas com os constituintes opticamente ativos da água (fitoplâncton, CDOM e material particulado em suspensão), os valores dessas propriedades são utilizados para determinar o tipo de água, a intensidade da luz sub-superficial, o fluxo de calor com a profundidade, a turbidez, a concentração de pigmentos e a carga de material em suspensão para fins diversos (ARNONE et al., 1998). Métodos para derivar as propriedades ópticas por meio do sensoriamento remoto têm sido investigados ao longo dos anos, e algoritmos que vão desde os puramente empíricos até os mais sofisticados, que utilizam dos modelos teóricos de transferência radioativo, são propostos (MARITORENA et al., 2002; GARVER ; SIEGEL, 1997; GORDON ; MOREL, 1983; BRICAUD et al., 1981).

**Algoritmos Empíricos:** os algoritmos empíricos utilizam da regressão simples ou múltipla entre os constituintes opticamente ativos de interesse e a razão (ou valores) da radiância ou reflectância de sensoriamento remoto. Eles não necessitam de um entendimento profundo das relações existentes entre a reflectância e os constituintes opticamente ativos. Devido a natureza da regressão, esses tipos de algoritmos são geralmente apropriados para os ambientes aquáticos cuja natureza seja similar àqueles para os quais os algoritmos foram implementados. Sua aplicabilidade pode ser bastante limitada e pode resultar em erros significativos. Em virtude da grande variação das propriedades ópticas das águas marinhas, uma função empírica não serve para todas os tipos de águas, a menos que estejamos lidando com águas do Caso 1, onde todas as propriedades ópticas co-variam com as concentrações de clorofila. A maior vantagem dos algoritmos empíricos é a simplicidade e rapidez no processamento dos dados, condição importante quando se almeja obter informações de uma grande base de dados, como é o caso das imagens de satélites. Como exemplo do algoritmo empírico podemos citar o proposto por TASSAN (1987). Por meio de experimentos realizados no mar Adriático, esse autor obteve a seguinte equação que faz uso da reflectância para estimativa do material particulado em suspensão:  $\log(S) = (3.08 \pm 0.27) + (1.70 \pm 0.14) * \log(R(570 \text{ nm}))$ , onde S é a concentração do

material particulado em suspensão em mg/L e  $R(570)$  é a reflectância de sensoriamento remoto para a banda 2 do satélite Landsat.

**Algoritmos Semi-Analíticos:** os algoritmos semi-analíticos (MARITORENA et al., 2002; GARVER ; SIEGEL, 1997) são baseados na solução das equações do modelo de transferência radioativo. Esses algoritmos podem ser aplicados à diferentes tipos de águas, com a vantagem de possuir uma performance bem melhor do que os algoritmos empíricos. O desempenho desses algoritmos, entretanto, depende da precisão dos modelos espectrais para o coeficiente de absorção de cada constituinte opticamente ativo presente na água, tais como o modelo de absorção da curva dos pigmentos fitoplanctônicos, do CDOM, ou mesmo do sedimento em suspensão. A representatividade desses modelos afetará a precisão das estimativas dos constituintes opticamente ativos. Além do mais, o processo de otimização e execução do algoritmo demanda tempo, limitando sua aplicabilidade quando se almeja processar uma base de dados ampla (GARVER ; SIEGEL, 1997; KAMPEL, 2003; LEE et al., 2002).

**Algoritmo Quase-Analítico (QAA):** o algoritmo QAA foi desenvolvido por LEE et al. (2002) para derivar os coeficientes de absorção e retroespalhamento a partir da reflectância de sensoriamento remoto. QAA começa com o cálculo do coeficiente de absorção total ( $a$ ) para um comprimento de onda de referência ( $\lambda_0=555$ ) e então propaga o cálculo para os demais comprimentos de onda. Dois fatores principais favorecem a escolha do comprimento de onda de referência: primeiro, é o fato de ser a região do espectro onde o espalhamento elástico é predominante, favorecendo uma boa estimativa da reflectância; segundo, é a região do espectro onde a absorção devido às moléculas de água passa a ser dominante, reduzindo possíveis erros, já que o coeficiente de absorção da água é bem conhecido. No processo de derivação dos coeficientes de absorção, não há modelos espectrais envolvidos para o coeficiente de absorção do fitoplancton e do CDOM e material detritico. Em vez disso, o coeficiente de absorção total, após estimado, é espectralmente decomposto na parte correspondente ao fitoplancton e material dissolvido colorido e detritos. O método possui a mesma precisão dos algoritmos semi-analíticos, porém com facilidade de implementação e agilidade de processamento similares aos algoritmos empíricos. A seguir é apresentada a estrutura de implementação do algoritmo QAA.

A razão entre o coeficiente de retroespalhamento ( $b_b$ ) e a soma de  $b_b$  e o coeficiente de absorção ( $a$ ), razão denominada de  $u(\lambda)$ , para um dado comprimento de onda ( $\lambda$ ) é calculada algebricamente baseado nos modelos de GORDON et al. (1988) e LEE et al. (1999), como a seguir:

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} = \frac{-0.0895 + \sqrt{0.008 + 0.499r_{rs}(\lambda)}}{0.249} \quad (3.9)$$

$$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda)(0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda)) \quad (3.10)$$

onde,  $r_{rs}(\lambda)$  é o valor da reflectância de sensoriamento remoto [ $R_{rs}(\lambda)$ ] logo abaixo da superfície da água. Dessa forma os valores de  $u(\lambda)$  podem ser estimados para os respectivos comprimentos de onda, conforme as bandas disponíveis de cada sensor remoto.

A próximo passo é estimar o coeficiente de absorção total para  $\lambda_o=555$ , ou seja  $a(555)$ :

$$a(555) = a_w(555) + 10^{-1.226-1.214\chi-0.350\chi^2} \quad (3.11)$$

$$\chi = \log \left( \frac{R_{rs}(440) + R_{rs}(490)}{R_{rs}(555) + 2 \frac{R_{rs}(640)}{R_{rs}(490)} R_{rs}(640)} \right) \quad (3.12)$$

aqui, utiliza-se da reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ ), para os comprimentos de onda 440, 490, 555 e 640nm, acima da superfície da água para calcular o valor de  $\chi$ . O coeficiente de absorção da água,  $a_w(555)$ , pode ser obtido de POPE ; FRY (1997).

A partir dos valores de  $u(555)$ ,  $a(555)$  e o coeficiente de retroespalhamento da água,  $b_{bw}(555)$ , disponível em POPE e FRY (1997), estima-se o coeficiente de retroespalhamento do material particulado em suspensão para  $\lambda_o=555$ , ou seja,  $b_{bp}(555)$ :

$$b_{bp}(555) = \frac{u(555)a(555)}{1 - u(555)} - b_{bw}(555) \quad (3.13)$$

O espectro do coeficiente de retroespalhamento,  $b_b(\lambda)$ , é então modelado por meio da expressão amplamente utilizada (GORDON ; MOREL, 1983; SMITH ; BAKER, 1981):

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta \quad (3.14)$$

$$\eta = 2.2 \left( 1 - 1.2 \exp \left( -0.9 \frac{r_{rs}(440)}{r_{rs}(555)} \right) \right) \quad (3.15)$$

onde  $\lambda_0=555$ , e  $r_{rs}$  é a reflectância de sensoriamento remoto logo abaixo da superfície da água para os comprimentos de onda 440 e 555nm.

Finalmente, o coeficiente de absorção total,  $a(\lambda)$ , para os demais comprimentos de onda podem ser obtidos algebricamente como a seguir:

$$a(\lambda) = \frac{[1 - u(\lambda)][b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)} \quad (3.16)$$

O sensor MODIS não possui banda centrada em  $\lambda=640$ nm, entretanto há banda centrada no comprimento de onda 667nm. Nesse caso, a reflectância de sensoriamento remoto para o comprimento de onda 640nm,  $R_{rs}(640)$ , pode ser simulada por meio das reflectâncias das bandas centradas em 555, 490 e 667nm (LEE et al., 2005), como a seguir:

$$R_{rs}(640) = 0.01R_{rs}(555) + 1.4R_{rs}(667) - 0.0005R_{rs}(667)/R_{rs}(490) \quad (3.17)$$

O processamento pode ser finalizado aqui, caso os parâmetros de interesse sejam os coeficientes de absorção total ( $a$ ) e o coeficiente de retro-espalhamento do material particulado em suspensão ( $b_{bp}$ ). Entretanto, para muitas aplicações do sensoriamento remoto, é desejável saber o coeficiente de absorção devido ao material fitoplanctônico,  $a_{ph}(\lambda)$ , e devido ao material dissolvido colorido,  $a_{CDM}(\lambda)$ , já que esses parâmetros podem ser convertidos em concentrações de clorofila e CDOM, respectivamente (CARDER et al., 1999; ROESLER ; PERRY, 1995).

Propriamente falando,  $a_{CDM}(\lambda)$  é a soma da absorção devido ao material detrítico e às substâncias amarelas, ou CDOM.

Basicamente, assume-se que os valores de absorção total,  $a(410)$  e  $a(440)$ , foram calculados pelas etapas acima descritas. Dessa forma, as variáveis  $\zeta$  e  $\xi$  são calculadas como a seguir:

$$\zeta = a_{ph}(410)/a_{ph}(440) = 0.71 + (0.06)/[0.8 + r_{rs}(440)/r_{rs}(555)] \quad (3.18)$$

$$\xi = a_{CDM}(410)/a_{CDM}(440) = \exp[S(440-410)] \quad (3.19)$$

as razões  $a_{ph}(410)/a_{ph}(440)$  e  $a_{CDM}(410)/a_{CDM}(440)$  são estimadas empiricamente por meio de uma ampla base de dados (LEE et al., 1998; BRICAUD et al., 1981), onde  $r_{rs}$  é a reflectância de sensoriamento remoto logo abaixo da superfície da água para os comprimento de onda 440 e 555nm, e  $S=0.015$  (BRICAUD et al., 1981).

Os coeficientes de absorção do material detrítico/CDOM e do fitoplâncton para o comprimento de onda 440nm são então estimados por meio das equações:

$$a_{CDM}(440) = \{[a(410) - \zeta a(440)] - [a_w(410) - \zeta a_w(440)]\} / (\xi - \zeta) \quad (3.20)$$

$$a_{CDM}(\lambda) = a_{CDM}(440) \exp[-S(\lambda - 440)] \quad (3.21)$$

$$a_{ph}(\lambda) = a(\lambda) - a_w(\lambda) - a_{CDM}(\lambda) \quad (3.22)$$

Diferente dos algoritmos semi-analíticos (MARITORENA et al., 2002; GARVER ; SIEGEL, 1997), o coeficiente de absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(\lambda)$ , derivado por meio do algoritmo QAA, não requer um modelo espectral para  $a_{ph}(\lambda)$ , nem o conhecimento à priori sobre os tipos de pigmentos presentes na água. Essencialmente, o algoritmo QAA extrai das imagens de satélites as propriedades puramente físicas da água do mar, sem fazer qualquer referência aos processos químicos ou biológicos do oceano que afetam as propriedades ópticas. Essas estimativas independem do conhecimento dos constituintes da água e dos fatores locais, tais como se a água é do Caso 1 ou do Caso 2 (LEE et al., 2002; IOCCG, 2006).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

#### 4.1.1 O Rio São Francisco

Com 2870 Km de extensão, o RSF recebe água de vários afluentes e compõe um conjunto de dez sub-bacias que caracterizam a bacia do RSF (636.919,60Km<sup>2</sup>, 7,5% do território brasileiro) em quatro setores principais (Tabela 4.1, Figura 4.1): Alto, compreendendo as nascentes do rio, na Serra da Canastra, até a cidade de Pirapora-MG; Médio, incluindo o trecho desde Pirapora até a cidade de Remanso-BA; Médio-Baixo, desde Remanso até a cidade de Paulo Afonso-BA; e Baixo, englobando toda região estuarina até a sua foz, no Oceano Atlântico na latitude 10° 25'S e longitude 36° 23'W, entre os estados de Sergipe e Alagoas. Com sua grande extensão, o RSF corta cinco estados diferentes e sua bacia hidrográfica está inserida em sete estados, abrangendo regiões com as mais diversas condições naturais e com uma população de aproximadamente 16,14 milhões de habitantes (ANA, 2004). A grande variação na quantidade de água que os afluentes despejam no São Francisco é consequência das diferenças climáticas entre as regiões drenadas pelo rio.

Tabela 4.1 – Setores da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e Ocupação Humana. \* em relação à área total da bacia (636.919,60km<sup>2</sup>); \*\* em relação à população total da bacia (16,14 milhões de habitantes), (Fonte: ANA – Projeto ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

Setor	Área (Km <sup>2</sup> )	% Área Bacia *	% Área Total	% Habitantes **	Principais Atividades Econômicas
Alto	99.386	15,60	15,60	49	indústria, mineração, pecuária e geração de energia
Médio	401.559	63,05	78,65	25	indústria, pecuária, agricultura e aquicultura
Médio-Baixo	115.986	18,21	96,86	15	agroindústria, mineração, pecuária, agricultura e geração de energia
Baixo	19.986	3,14	100,00	11	pecuária, agricultura, pesca e aquicultura

O maior adensamento populacional e o maior grau de industrialização é encontrado no Alto e Médio setores da bacia do rio São Francisco (Tabela 4.1). As águas do rio São Francisco atendem a diversos usos, dentre os quais se destaca a geração de energia elétrica. A contaminação fluvial de origem urbana e industrial é mais intensa no Alto São Francisco, e não atinge a região estuarina devido a grande distância da costa e ao potencial de retenção das barragens. Já a contaminação ambiental de origem agrícola,

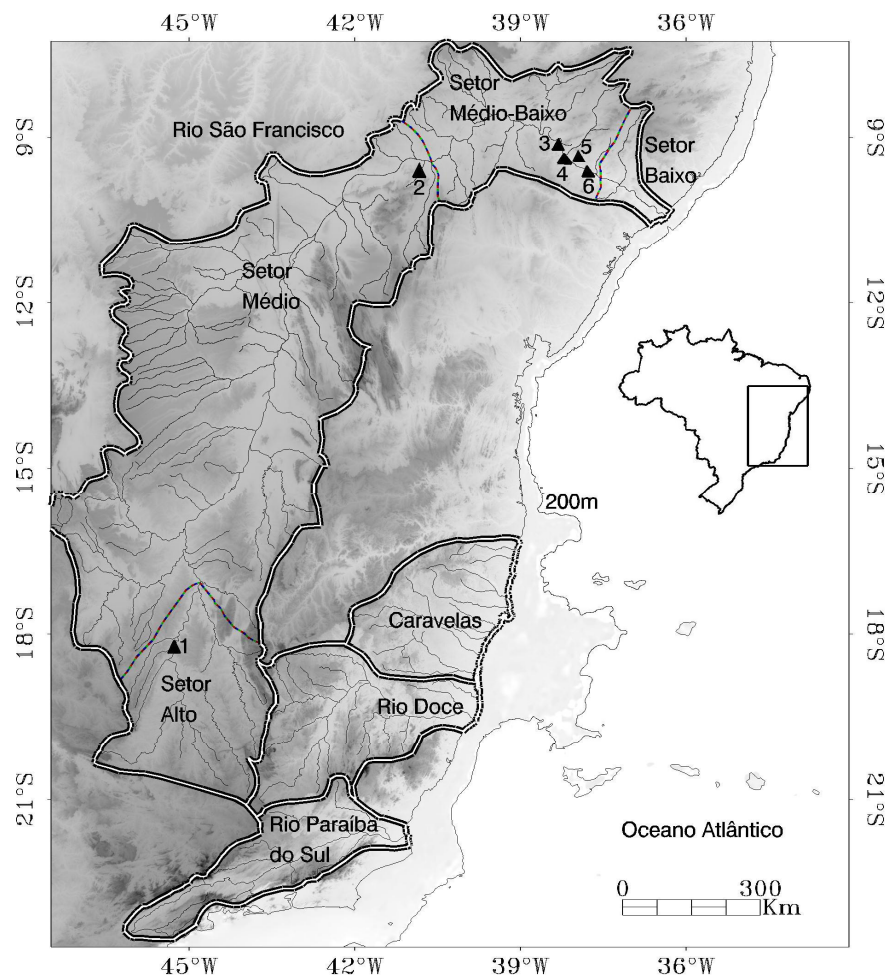


Figura 4.1 – Bacia do Rio São Francisco (▲=principais barragens: 1-Três Marias; 2-Sobradinho; 3-Itaparica; 4-Complexo Paulo Afonso; 5-Moxotó; 6-Xingó) e seus setores: Alto; Médio; Médio-Baixo; Baixo. Também é mostrado: o sistema Costeiro de Caravelas (compreendendo os rios: Jucuruçu, Itanhém, Caravelas e Peruípe); bacia do Rio Doce; e bacia do Rio Paraíba do Sul.

também presente no Alto São Francisco, apresenta um novo foco na região do Baixo-Médio São Francisco, onde a fruticultura desenvolveu-se fortemente ao longo das últimas décadas em função dos projetos de irrigação (SANTOS, 2007). De modo geral o Rio São Francisco é extremamente

relevante para o país pelo volume de água transportada na região semi-árida, utilizada para irrigação e abastecimento, e pelo seu potencial hidroelétrico. O projeto de transposição que busca integrar a bacia do RSF com bacias hidrográficas do nordeste setentrional é mais um contraponto que realça a importância regional e nacional da bacia do RSF (ANA, 2008; SANTOS, 2007).

Com 98% da bacia controlada por barragens, o RSF foi drasticamente alterado em função da cascata de barragens instalada em seu de leito (Figura 4.1), reduzindo o potencial de transporte de matéria e o padrão de sazonalidade de descarga fluvial (Figura 4.2). Segundo KNOPPERS et al. (2006), a redução da vazão média anual é de 35% ao longo das últimas três décadas do século XX, com danos significativos no potencial cíclico do rio no seu baixo curso. O período pré-barragem (1938-1973) a vazão média era de  $3010 \pm 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , oscilando entre 800 a  $8000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (com picos da ordem de  $15.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) entre estação seca e chuvosa, respectivamente. A partir de 1994, a vazão média anual encontra-se normalizada em  $1760 \pm 235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (SANTOS, 2007).

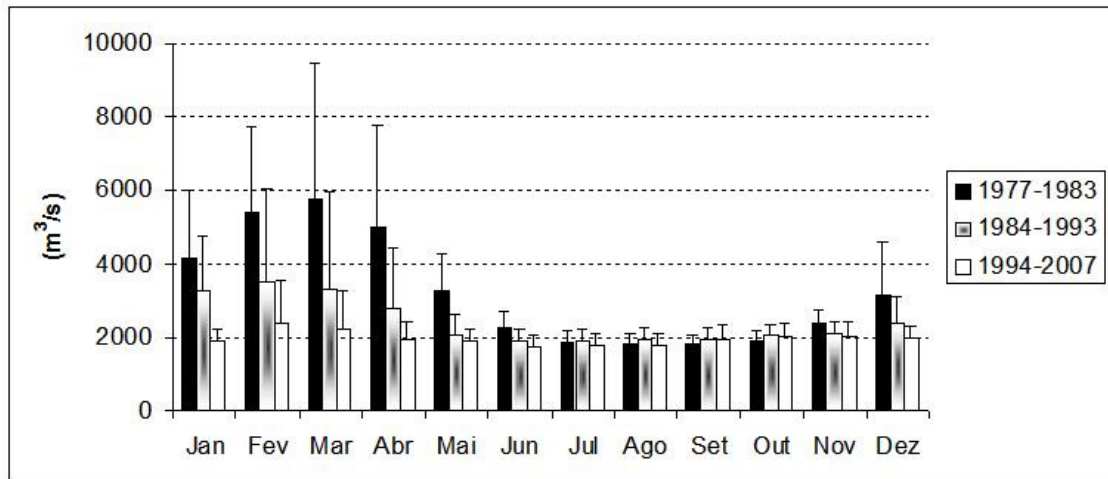


Figura 4.2 – Vazão média mensal do Rio São Francisco entre 1977 a 2007 na estação hidrológica de Propriá-AL (120 Km da costa). Fonte: Agência Nacional de Águas.

Como a vazão, o transporte de material pelo rio sofreu impactos significados, com drástica redução da carga de nutrientes e material em suspensão. A concentração média do material em suspensão era da ordem de 70 mg/l em 1970 (MILLIMAN, 1975), baixando para aproximadamente 27 mg/l durante o ano hidrológico de 1984 e 1985 (SOUZA, 2002), e



atingindo em torno de 5 mg/l nos anos de 2001 e 2002 (MEDEIROS, 2003). Atualmente o rio apresenta baixo rendimento pesqueiro devido ao caráter oligotrófico de suas águas empobrecidas devido às alterações antrópicas (KNOPPERS et al., 2006).

#### 4.1.2 O Clima

**Regime Pluviométrico:** O clima da bacia do RSF é muito diversificado devido a sua grande dimensão e características distintas, como diferenças de relevo e proximidade com o mar. A temperatura média anual e a precipitação variam de acordo com as estações do ano (Verão: Dezembro, Janeiro, Fevereiro; Outono: Março, Abril, Maio; Inverno: Junho, Julho, Agosto; Primavera: Setembro, Outubro, Novembro) e a localização geográfica. A bacia tem um baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. As principais características hidroclimáticas da bacia do São Francisco estão sumarizadas na Tabela 4.2 para cada setor da bacia do RSF.

Tabela 4.2 – Características hidroclimáticas da bacia do RSF – Médias Anuais (Fonte: ANA – Projeto ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

Setor	Clima	Precipitação (mm)	Evapotransp. (mm)	Temp. (°C)	Insolação (horas)
Alto	Tropical úmido e subúmido úmido	1100 a 2000 (1372)	1000	23	2400
Médio	Tropical subúmido seco e semi-árido	600 a 1400 (1052)	1300	24	3000
Médio Baixo	Semi-árido e árido	350 a 800 (693)	1550	27	2800
Baixo	Semi-árido e tropical subúmido úmido	350 a 1500 (957)	1500	25	2800

O setor Alto caracteriza-se por possuir umidade alta e altitude elevada, sendo a estação chuvosa na época de verão e a seca durante o inverno. O setor Médio, por ser a maior das regiões fisiográficas da bacia, possui diferentes tipos de clima; em seu início, tem clima parecido com o setor Alto, com precipitações médias anuais de 1000 mm que ocorrem durante o verão, mais abaixo a região é caracterizada como semi-árida e precipitação média anual da ordem de 600mm.

O setor Baixo-Médio abriga a região mais seca de toda a bacia e precipitação distribuída irregularmente durante o ano. O setor Baixo caracteriza-se por um clima um pouco mais ameno devido a proximidade do mar e precipitações mais intensas durante o outono e inverno.

Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no Nordeste do Brasil podem ser classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis por cerca de 60% a 80% da precipitação observada dependendo do local, e mecanismos de meso e micro escalas, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se os sistemas frontais, Frentes Polares e a Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT). Perturbações ondulatórias no campo dos ventos alísios, complexos convectivos e brisas marítima e terrestre fazem parte da meso escala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas constituem-se fenômenos de micro escala (MOLION ; BERNARDO, 2000).

**Regime de Ventos:** o padrão de vento estabelecido na costa nordeste do litoral brasileiro está relacionado à migração da ZCIT e a Zona de Divergência (ZD) dos ventos alísios. A ZCIT é o resultado da convergência dos ventos alísios, que provêm das altas pressões subtropicais dos dois hemisférios, para a região equatorial das baixas pressões. Em Julho a ZCIT atinge a posição mais ao norte, cerca de 10° N, e Janeiro migra mais para o sul (Figura 4.3).

Os ventos alísios que alcançam a costa leste/nordeste do Brasil procedem de duas direções principais: E-SE (alísios) e NE (alísios de retorno). A região onde se manifesta a mudança de direção dos ventos é conhecida sob o nome de Zona de Divergência (ZD) dos alísios (Figura 4.3). Ela está localizada, em média, em torno de 15° S. Entretanto, essa posição varia ao longo do ano. Entre os meses de abril e agosto ela se localiza abaixo de 15° S, posicionando-se próximo a 20° S em julho. A ZD sobe para o norte em setembro e, entre os meses de outubro e março, localiza-se acima de 15° S, posicionando-se próximo a 10° S, em janeiro. Ao norte da zona de divergência, ao longo da costa, os ventos sopram principalmente de sudeste e leste, enquanto ao sul desta zona os ventos sopram principalmente de nordeste e leste (DOMINGUES ; BITTENCOURT, 1994) (Figura 4.3).

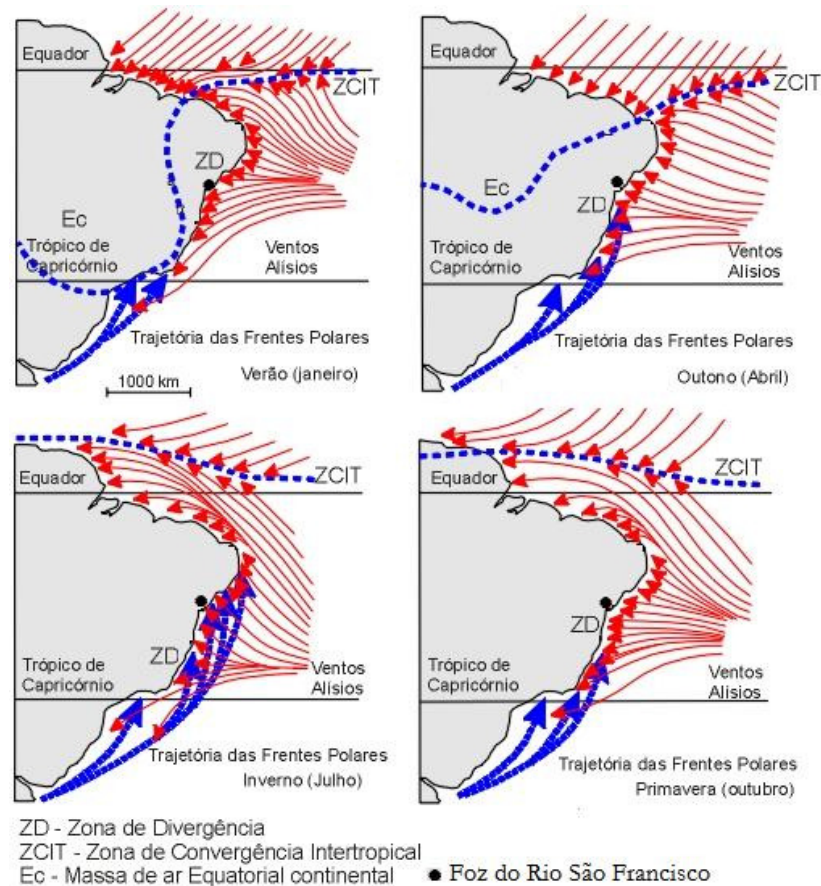


Figura 4.3 – Padrão de migração da ZD dos alísios e ZCIT (Fonte: Adaptado de: <<http://www.log.furg.br/WEBens/descobri/Fig25.htm>>)

A Frente Polar Atlântica, originada na Antártica, invade o continente sul-americano sob a forma de grandes anticiclones, a leste da cordilheira andina. Essa frente, condicionada pelo contraste térmico (continente-oceano) e pela orografia, divide-se em dois ramos que seguem caminhos distintos: a oeste e a leste do maciço brasileiro. O ramo leste se desloca pelo litoral em direção ao equador, alcançando latitudes próximas a  $10^{\circ}$  S durante o inverno e, raramente, alcançando o trópico no verão (Figura 4.3). O avanço da Frente Polar Atlântica dá origem a vigorosos ventos de sul/sudeste que podem influenciar a região adjacente a foz do RSF (BIGARELLA, 1972).

De maneira geral, na região da foz do RSF, os ventos predominantes são os ventos alísios de leste e de nordeste na primavera e verão, e ventos de leste e de sudeste mais comuns no outono e inverno, conforme as condições pré-estabelecidas pelos eventos meteorológicos acima descritos.

#### 4.1.3 Região Costeira e Estuário do Rio São Francisco

A largura da plataforma continental na região adjacente a foz do RSF varia de 20 a 40 Km, onde é possível encontrar duas massas de água: águas costeiras e águas tropicais de superfície, essas últimas apresentam salinidade entre 35,9 e 36,9 e podem ser encontradas bem próximas à foz do RSF em algumas ocasiões (MEDEIROS, 2003). Como parte da costa leste do Atlântico, a área é caracterizada por baixa produtividade primária e baixa carga de material em suspensão, com predominância de sedimentos terrígenos modernos, em sua maior parte relativamente empobrecidos de matéria orgânica (TINTELNOT, 1995; BARRETO ; SUMMERHAYES, 1975; SANTOS, 2007).

Segundo DOMINGUEZ et al. (1992), devido à velocidade e direção constantes dos ventos alísios, e a localização geográfica da costa nordeste brasileira em relação ao cinturão dos alísios, o campo de ondas gerado por esse regime de ventos tem grande impacto na deriva litorânea de sedimentos. A tabela 4.3 mostra as direções médias das principais frente-de-ondas que atinge a região adjacente à foz do RSF, médias derivadas de análises do padrão de circulação atmosférico (ventos alísios), e dados estatísticos de ondas publicados em HOGBEN AND LUMB (1967) e U.S. NAVY (1978).

Geralmente na região costeira do nordeste brasileiro as ondas de NE, E e SE predominam ao longo do ano, com as ondas leste mais importantes de janeiro a maio (verão-outono) e de setembro a novembro (primavera). Ondas de nordeste são mais comuns de novembro a fevereiro (verão), enquanto que ondas de sul/sudeste ocorrem de março a agosto (outono-inverno) (LEÃO ; DOMINGUEZ, 2000).

O estuário do RSF apresenta gradiente salino bem definido e a intrusão da cunha salina em direção ao estuário interno é bastante influenciada pela maré e muito menos pela variabilidade da vazão fluvial e dos ventos (MEDEIROS, 2003; KNOPPERS et al., 2006). A zona de mistura estuarina permanece relativamente estagnada na foz (Figura 4.4), podendo estender-se no máximo a 10km a montante mesmo em períodos extremos de maré baixa e vazão baixa e 30 km afora da foz (estuário externo). Próximo à foz ( $\pm 1$  a 2 Km) existem bancos de areia submersos que em maré baixa (principalmente de sizígia) ficam sujeitos a atuação de ondas e correntes, gerando uma forte zona de arrebentação que dificulta a navegação (MEDEIROS,

2003). A maré é classificada como semidiurna nessa região e varia de 1,5m na quadratura e 2,5m na sizígia (mesomaré) (SANTOS, 2007).

Tabela 4.3 – Frentes-de-onda incidentes na região de desembocadura Rio São Francisco. \* frequências dos ventos alísios causadores das frentes-de-onda (Fonte: BITTENCOURT et al., 2005)

Direção Propagação	Período de Onda (s)	Altura de Onda (m)	% Frequência *
NE	5.0	1.0	18
E	5.0	1.0	47
SE	6.5	1.5	30
SSE	6.5	1.5	5

A zona de máxima turbidez ocorre no estuário externo, abrangendo a região rasa de bancos submersos (0,5 a 5 km afora da desembocadura). A pluma sedimentar na foz do RSF não é uma pluma fluvial típica e sim uma pluma de re-suspensão com deriva predominantemente para sul do oeste, exceto no inverno quando uma contra corrente costeira fraca inverte a trajetória da pluma (U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE, 1967). Estudos conduzidos por MEDEIROS (2003) durante o período de 2001 e 2002 constataram que o material em suspensão apresentou comportamento não conservativo, com ganhos característicos entre as salinidades de 10 a 25, o que, juntamente com o regime de alta energia de ondas e a batimetria rasa da foz, caracteriza a re-suspensão como principal fonte que alimenta a pluma do RSF.

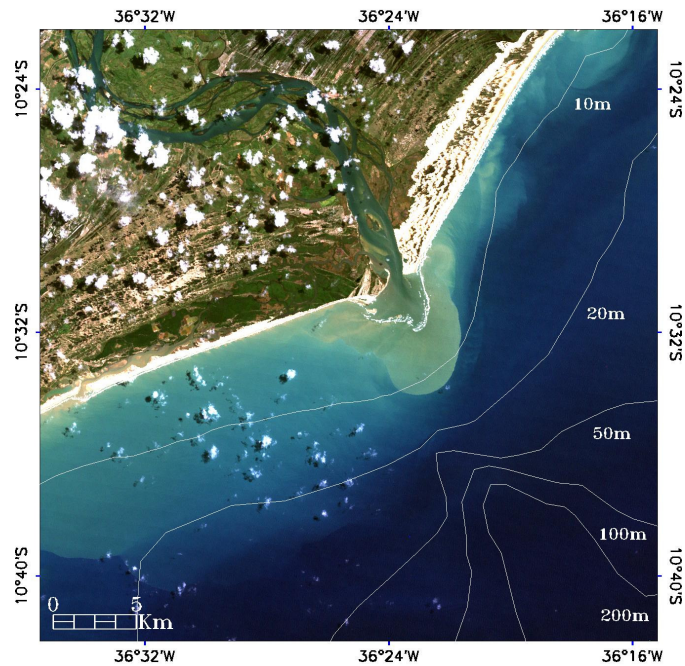


Figura 4.4 – Imagem Landsat-TM da foz do rio São Francisco. Data: 05/Set/2001.

#### 4.1.4 Bifurcação da Corrente Sul Equatorial

A plataforma adjacente à foz do RSF, além de ser bastante estreita: 20 a 40 km, está localizada numa região onde ocorre a bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE). Próxima à superfície (0-100m), a CSE é uma corrente larga confinada entre as latitudes 8° e 20°S (nas proximidades da costa leste brasileira) e que bifurca em média na região compreendida entre as latitudes 10° e 14°S, originando a Corrente do Brasil (CB) e a Corrente Norte do Brasil (CNB), Figura 4.5. Embora a variabilidade espacial e temporal dos alísios seja alta, o sinal sazonal é particularmente forte e condiciona a migração da bifurcação da CSE (RODRIGUES et al., 2006).

As conseqüências dessa interação oceano/atmosfera têm alcance diversos, dentre os quais, ressalta-se a geração de anomalias de circulação que modulam o comportamento das correntes oceânicas da borda oeste do atlântico sul, entre as latitudes 10°S e 17°S, e que, em última instância, determinam a localização geográfica da bifurcação da CSE. A bifurcação atinge a posição mais ao sul no mês de Julho, 17°S, impulsionada por uma anomalia de circulação anticiclônica (sentido anti-horário no hemisfério sul, Figura 4.6-a, Figura 4.7-a), e atinge a posição mais ao norte no mês de Novembro, 10°S,

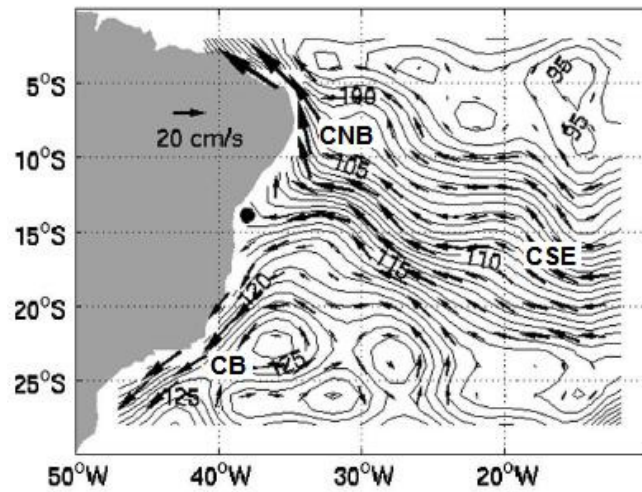


Figura 4.5 – Corrente geostrofica média anual na superfície do mar. Círculo preto representa a localização média da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE). CNB=Corrente Norte do Brasil; CB=Corrente do Brasil (Fonte: adaptado de RODRIGUES et al., 2006).

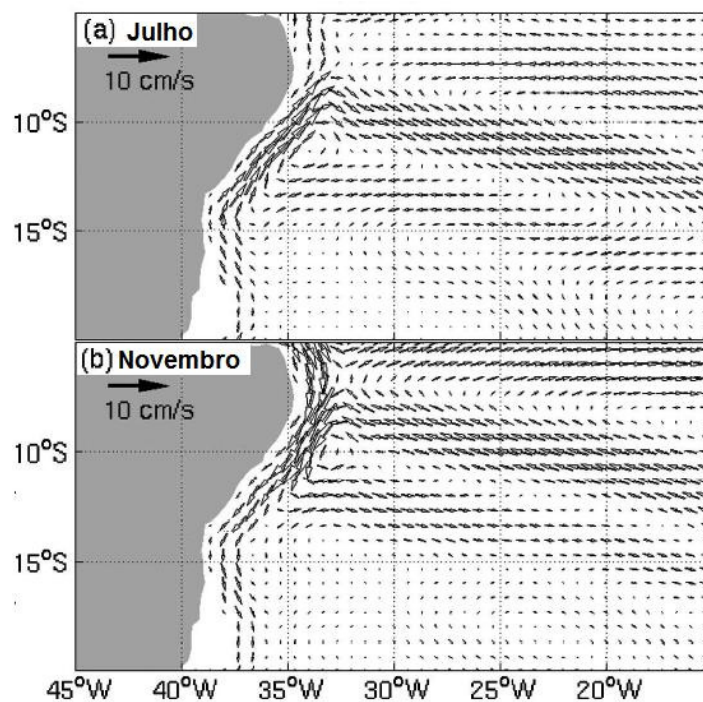


Figura 4.6 – Anomalia de circulação superficial ( $\text{cm s}^{-1}$ ) relativo ao campo médio anual de velocidade de corrente oceânica superficial: a) Julho, representativa do inverno; b) Novembro, representativa primavera/verão (Fonte: adaptado de RODRIGUES et al., 2006).



impulsionada por uma anomalia de circulação ciclônica (sentido horário no hemisfério sul, Figura 4.6-b, Figura 4.7-b). Vale ressaltar que a anomalia de circulação considerada é em relação à velocidade média anual da superfície do oceano na região. A superposição dessa anomalia sobre o campo de corrente determina o padrão de circulação local, Figura 4.7-a,b. Outra implicação interessante, resultante do mecanismo envolvido na migração da CSE, é o decréscimo da capacidade de transporte (em termos do volume de água) das correntes do Brasil e Sul Equatorial nos meses de Junho/Julho, e o subsequente aumento dessa capacidade a partir de Setembro até Novembro (RODRIGUES et al., 2006).

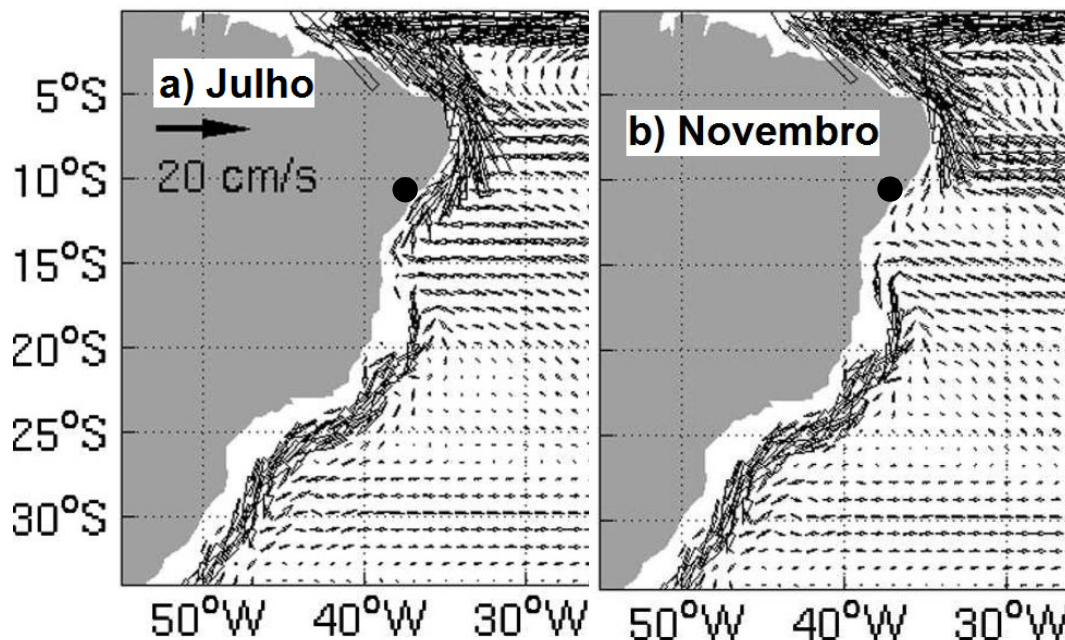


Figura 4.7 – Campo de corrente oceânica superficial modelado (a) Julho e (b) Novembro. Círculo preto: foz do rio São Francisco (Fonte: adaptado de RODRIGUES et al., 2006).

#### 4.1.5 Sistema Costeiro de Caravelas, Rio Doce e Rio Paraíba do Sul

A dinâmica costeira das plumas do Sistema Costeiro de Caravelas (SCC), do rio Doce (RD) e do Rio Paraíba do Sul (RPS) foram avaliadas e comparadas com a pluma do RSF para caracterizar os padrões de dispersão do material em suspensão desses sistemas. Sem ir muito além do propósito do presente trabalho, cujo foco principal é o RSF, apresentamos a seguir um resumo das principais características que discriminam esses sistemas. Para efeito comparativo, algumas características do RSF são novamente expostas.



As quatro áreas localizam-se na costa Leste do Brasil (Figura 4.1), que se estende entre a Foz do Rio São Francisco (lat. 10. 3°S) ao norte, e o Cabo de São Tomé (Lat. 22°S) ao sul. Nela drenam duas importantes bacias brasileiras, as bacias do Rio São Francisco ( $A_B = 0,63 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e do Atlântico Leste ( $A_B = 0,55 \times 10^6 \text{ km}^2$ ), representando 7,5 e 6,6 % do território brasileiro, respectivamente. As áreas de estudo compreendem a pluma do Rio São Francisco (RSF), gerada pela maior fonte pontual de água da região, e as dos Rios Doce (RD) e Paraíba do Sul (RPS) de médio porte, representando as maiores fontes pontuais da Bacia Atlântico Leste. A região de Caravelas, aqui referida como Sistema Costeiro de Caravelas (SCC), Atlântico Leste, foi escolhida como representativa de uma área sujeita ao aporte fluvial difuso oriundo de diversos rios de pequeno porte: Jucuruçu, Itanhém, Caravelas e Peruípe, como também da sua importância ecológica devido à proximidade dos recifes de Abrolhos.

Tabela 4.4 – Características Fisiográficas da Região de Estudo. \*tanto a descarga quanto o comprimento é a média dos três rios (Jacuruçu, Itanhém e Peruípe). Por falta de informações, a vazão do rio Caravelas não foi adicionada. (Fonte: ANA; SOUZA ; KNOPPERS, 2003; MEDEIROS, 2003; COSTA, 1994)

Rio	Área Bacia (km <sup>2</sup> )	Extensão Rio (km)	Vazão (m <sup>3</sup> /s) Média Anual	Extensão da Plataforma Adjacente à Foz (km)	Maré na Foz
RSF	636919	2870	1800	30	Mesomarés 2 a 4m
SCC*	65420	240	86	220	Mesomarés 2 a 4m
RD	83400	853	900	40	Micromarés < 2m
RPS	55500	1145	865	100	Micromarés < 2m

A costa leste do Atlântico apresenta características de margens passivas tropicais com correntes de borda ocidentais (CASTRO ; MIRANDA, 1998). A plataforma é estreita e aberta — com exceção para a região do SCC, onde a extensão da plataforma chega a 200km (LEÃO, 1999) —, quase que inteiramente recoberta de sedimentos carbonáticos de origem marinha (MILLIMAN, 1975; JENNERJAHN ; ITTEKKOT, 1999), revelando a pequena influência dos aportes continentais e o impacto da Corrente do Brasil, derivada da Corrente Sul Equatorial. De maneira geral, os ventos predominantes na região de estudo são os ventos alísios de E e NE na primavera e verão, e ventos de E e de SE mais comuns no outono e inverno, conforme posicionamento da ITCZ e da ZD (DOMINGUES ; BITTENCOURT, 1994). A Tabela 4.4 mostra as características fisiográficas pertinentes a cada sistema.

Na região da foz dos rios São Francisco, Doce e Paraíba do Sul há predominância de sedimentos terrígenos modernos (TINTELOT, 1995), em sua maior parte relativamente empobrecidos de matéria orgânica. A região adjacente ao SCC apresenta sedimentos compostos basicamente de carbonatos (mais de 75%), derivados de corais e algas incrustantes que formam os recifes da região de abrolhos (LEÃO ; DOMINGUES, 1999). Nas proximidades das desembocaduras dos rios ocorrem bancos rasos e barras arenosas.

#### 4.2 COLETAS EM CAMPO

Durante o presente estudo, coletas de campo foram conduzidas na foz do RSF e região costeira adjacente (Figura 4.8) nos meses de Out/2006, Jan-Fev/2007 e Abr/2008. Amostras de água na superfície foram coletadas e filtradas no mesmo dia para estimativa de TSS e da concentração de clorofila. Em geral corresponderam a coletas de amostras de água através de transectos ao longo do gradiente estuarino e do eixo principal de dispersão da pluma costeira. As amostras de TSS foram filtradas em filtros previamente pesados, Whatman GF/F, dimensão nominal do poro de 0.7  $\mu\text{m}$ , em seguida secados e pesados novamente. A clorofila-a foi determinada por fluorescência em fluorímetro Turner 10-AU-005 após extração em 5mL de acetona 90% a  $-4\text{ }^\circ\text{C}$  por 12 horas.

Medidas de radiância ( $L$ , unidade:  $\text{Wm}^{-2}\text{ sr}^{-1}\text{ nm}^{-1}$ ) da superfície da água foram coletadas concomitantemente às amostras de água (para os meses de Out/2006 e Abr/2008), utilizando-se um radiômetro portátil, *Analytical Spectral Devices* (ASD), com amostragem de 325 a 1075nm, e resolução espectral de 1nm (resolução hiperespectral). Em cada estação de coleta mediu-se a radiância proveniente de cada alvo, ou seja, da superfície da água ( $L_w$ ), do céu ( $L_s$ ) e da placa de referência ( $L_p$ ). A geometria de aquisição radiométrica seguiu as recomendações de MOBLEY (1999):  $L_w$  foi medido com ângulo zenital de visada de  $45^\circ$  e ângulo azimutal relativo de  $135^\circ$ .

Para cada alvo, cinco espectro de radiância foram adquiridos e a média foi calculada durante o pós-processamento, obtendo-se assim as reflectâncias da água ( $R_w$ ) e do céu ( $R_s$ ):

$$R_w = [L_w / (L_p * \pi)] * R_p \quad (4.1)$$

$$R_s = [L_s / (L_p * \pi)] * R_p \quad (4.2)$$

onde  $R_p$  é o albedo da placa lambertiana utilizada nas medidas em campo. Para subtrair efeitos residuais da reflexão do céu na superfície da água e calcular a reflectância de sensoriamento remoto,  $R_{rs}$ , subtraiu-se de  $R_w$  o acréscimo devido a  $R_s$ :

$$R_{rs} = R_w - R_s * r(i) \quad (4.3)$$

onde  $r(i) = 0.028$  é a reflectância de Fresnel para o ângulo zenital ( $i$ ) de  $45^\circ$  (MOBLEY, 1999).

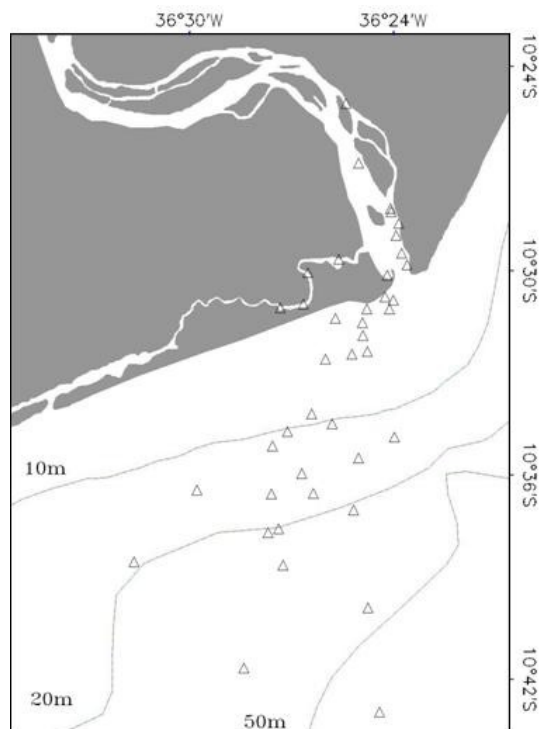


Figura 4.8 – Coletas realizadas na Foz do Rio São Francisco. Os triângulos representam os pontos onde foram coletadas amostras de água (clorofila e TSS) e medidas radiométricas.

Também, para o presente trabalho, buscou-se levantar as informações pretéritas de TSS coletadas *in situ* em campanhas oceanográficas nas regiões de interesse, e com isso verificar a performance do algoritmo empírico para estimativa do TSS utilizando imagens Landsat. O transporte do material particulado na foz do RSF foi estudado por Medeiros (2003) que realizou campanhas no período de Nov/2000 a Jan/2002. O navio oceanográfico Victor Hensen realizou campanhas para o SCC, RD e RPS durante a perna 1 (10 a 22 Dezembro de 1994), dentro do

program de pesquisa JOPS II (Knoppers et al. 1999b). Carneiro (1998) excursionou na foz do RPS entre Jul/1994 e Jul/1995. A metodologia de coleta e análise do TSS pode ser encontrada nessas últimas três publicações citadas. Em geral, corresponderam a coletas de amostras de água através de transectos ao longo do gradiente estuarino e do eixo principal de dispersão da pluma costeira desde a fonte fluvial até a marinha, caracterizada por águas tropicais de superfície da Corrente Sul Equatorial (KNOPPERS et al., 2006). Amostras mensais de água foram coletas na ponte do município de Propriá, localizado a 80 km da foz do RSF, para quantificação do TSS transportado pelo RSF durante o ano de 2004; foram aqui utilizadas para calibração das imagens CBERS-2.

### 4.3 IMAGENS DE SATÉLITES

#### 4.3.1 Imagens LANDSAT e CBERS

Embora projetado para o mapeamento terrestre, os sensores TM e ETM, a bordos dos satélites Landsat-5 e Landsat-7, respectivamente, também foram utilizados para o monitoramento do material em suspensão presente nos ambientes aquáticos (TASSAN, 1987a; TASSAN, 1987b; RITCHIE et al., 1976; OLIVEIRA et al., 2005; DOXARAN et al., 2006). O sensor CCD, a bordo do satélite Sino Brasileiro CBERS-2 (sigla para *China-Brazil Earth Resources Satellite*; em português, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), também destinado ao mapeamento terrestre, é utilizado nesse trabalho para quantificar o material em suspensão na foz do RSF (<http://www.cbbers.inpe.br/>).

O satélite Landsat-5 iniciou sua atividade em 01/03/1984 e encerrou em 06/10/2007, após o satélite sofrer um problema em suas baterias. O Landsat-7 foi lançado em 15/04/1999 e está inativo desde 2003. Foram lançados três satélites no âmbito do programa CBERS. O segundo, o CBERS-2, em 21 de outubro de 2003. E o primeiro satélite, o CBERS-1, foi lançado em 14 de outubro de 1999 e operou com sucesso por quase quatro anos, até agosto de 2003. As características operacionais a bordo dos satélites Landsat e Cbers estão relacionadas na Tabela 4.5.

As imagens Landsat e Cbers foram adquiridas do banco de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Na inexistência de imagens coincidentes com as datas

de coleta de TSS *in situ*, buscou-se imagens em datas mais próximas possíveis. Caso isto ainda não fosse possível, optou-se por verificar a existência de imagens para o mesmo período do ano, dos anos anteriores e posteriores, supondo uma certa regularidade sazonal no regime hídrico. A Tabela 5.1 mostra as datas dos trabalhos de campo e as respectivas imagens Landsat.

Tabela 4.5 – Bandas dos sensores TM, ETM+ e CCD a bordo dos satélites Landsat-5, Landsat-7 e CBERS-2 e suas respectivas resoluções espectral, espacial e temporal.

Sensor	Banda	R.Espectral	R.Espacial	R.Temporal
TM	1	0,45-0,52	30m	16 dias
	2	0,50-0,60		
	3	0,63-0,69		
	4	0,76-0,90		
	5	1,55-1,75		
	6	10,4-12,5	120m	
	7	2,08-2,35	30m	
ETM+	1	0,45-0,52	30m	16 dias
	2	0,50-0,60		
	3	0,63-0,69		
	4	0,76-0,90		
	5	1,55-1,75		
	6	10,4-12,5	60	
	7	2,08-2,35	30	
	8	0,50-0,90	15	
CCD	1	0,45-0,52	20	26 dias
	2	0,52-0,59		
	3	0,51-0,73		
	4	0,63-0,69		
	5	0,77-0,89		

**Processamento das Imagens Landsat:** inicialmente as imagens foram registradas na projeção UTM/SAD69 utilizando-se como referência as imagens Landsat de referência disponíveis no site da NASA (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>) com acurácia de  $\pm 50$  metros. Após a conversão dos níveis digitais em radiância, utilizando o programa 6S (Vermote et al., 1997), as imagens foram processadas por meio do modelo de correção atmosférica, também disponível no programa 6S, para eliminar ou minimizar os efeitos atmosféricos de espalhamento e atenuação da radiância medida pelo satélite.

Basicamente, esse modelo de correção atmosférica busca modelar a atenuação da luz vinda do oceano (sinal de interesse) e a luz atmosférica difusa, espalhada diretamente em direção ao satélite, ou refletida pela superfície do oceano em direção ao sensor. Na ausência de perfis atmosféricos *in situ* à época da aquisição das imagens, o modelo 6S dispõe de uma base de modelos atmosféricos representativos de diferentes condições ambientais. Para nossas condições, foi escolhido o modelo atmosférico tropical marítimo. A partir das imagens Landsat, corrigidas dos efeitos atmosféricos e convertidas em valores de radiância ao nível da superfície do oceano pelo modelo 6S, foram geradas imagens de refletância de sensoriamento remoto utilizando o *software* Envi 4.2. É importante ressaltar que, devido a baixa resolução espectral das imagens Landsat, a extração das propriedades ópticas inerentes, tais como o coeficiente de absorção e espalhamento dos constituintes opticamente ativos, fica impossibilitada, assim como algoritmos mais sofisticados que utilizam essas propriedades para estimar os constituintes opticamente ativos.

**Processamento das Imagens CBERS-2:** num primeiro momento, as imagens CBERS-2 foram georreferenciadas da mesma forma que as imagens Landsat, em seguida os níveis digitais das imagens CBERS-2 foram convertidos para valores de reflectância conforme metodologia proposta por PONZONI (2006). A correção atmosférica das imagens CBERS-2 foi efetuada com a ajuda das imagens MODIS processadas pelo programa APS (como será apresentado nos resultados, a correção atmosférica das imagens MODIS efetuada pelo programa APS é muito boa). Para tal, uma área afastada da costa foi escolhida de forma que a interferência das águas costeiras fosse mínima (Figura 4.11-a, região compreendida pelo retângulo R). Nessa região, estimou-se o valor médio da reflectância para as bandas 4, 11 e 12 (região espectral do visível, cor verde) das imagens MODIS e calculou-se novamente a média das três bandas. Para a mesma região geográfica, calculou-se para as imagens CBERS-2 o valor médio da reflectância na banda 2 (região espectral do visível, cor verde). Dessa forma temos os valores de reflectância das imagens MODIS (Refl\_MODIS), os quais sofreram correção atmosférica, e os valores de reflectância das imagens CBERS-2 (Refl\_CBERS), que não foram corrigidos dos acréscimos devido às interferências atmosférica. Para remover esses acréscimos, calculou-se a diferença entre Refl\_CBERS e Refl\_MODIS e subtraiu-se o resultado da banda 2 das imagens CBERS-2, levando em consideração a proximidade temporal entre as imagens.

#### 4.3.2 Sensores para Monitoramento Oceânico e Processamento das Imagens MODIS

A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), no ano de 1978, colocou em órbita o satélite NIMBUS-7, que carregava o primeiro sensor protótipo para o levantamento de informações radiométricas da superfície do oceano, o *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS). Superando às expectativas experimentais iniciais que previam um tempo de atividade aproximadamente de um ano, o sensor esteve em atividade por quase 10 anos, parando de operar em 1986 (EVANS ; GORDON, 1994).

O sucesso do CZCS estimulou o lançamento de novos sensores para coletar informações da cor do oceano. Após um hiato de mais de 10 anos, em Agosto de 1997, o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) foi lançado, abrindo caminho para as próximas gerações de sensores orbitais que operam na região visível do espectro eletromagnético e projetados para aplicações oceanográficas (McCLAIN et al., 2004).

Os sensores CZCS e SeaWiFS foram como que os protótipos do sensor *MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Dois sensores MODIS estão em atividade a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados em Dezembro de 1999 e Maio de 2002, respectivamente. O MODIS possui um frequência espacial adequada para o monitoramento global dos oceanos, sendo que o tempo de revisita de uma mesma região é de aproximadamente de um a dois dias (SALOMONSON et al., 1989).

Ambos os sensores SeaWiFS e MODIS possuem bandas similares para o mapeamento da superfície do oceano, entretanto o sensor MODIS possui bandas mais estreitas do que o SeaWiFS (IOCCG, 1998). Em relação a razão sinal/ruído, o sensor MODIS é aproximadamente três vezes mais sensível do que o SeaWiFS, ou seja, favorece uma melhor discriminação dos componentes particulados e dissolvidos presentes no ambiente marinho (GOWER ; BORSTAD, 2004).

A análise conduzida nesse trabalho privilegiou os dados coletados pelo sensor MODIS, principalmente pelas seguintes razões: 1) séries temporais das propriedades ópticas de plumas estuarinas utilizando imagens MODIS têm caráter pioneiro no Brasil; 2) a missão MODIS serve de ligação entre os sensores atualmente em operação e a próxima geração de sensores que monitorarão a cor do oceano; 3) as bandas do sensor MODIS possuem resoluções espaciais de 250m, 500m e 1000m, viabilizando a geração de pseudo-bandas com resolução espacial de 250m

(LADNER et al., 2007), propícias para estudos de plumas estuarinas de média escala, como é o caso do Rio São Francisco; 4) os dados do sensor MODIS são disponíveis totalmente sem custos. Optou-se pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua; o sensor MODIS-Terra possui significativos problemas radiométricos (HOGE et al., 2003). As principais características do satélite Aqua estão presentes na Tabela 4.6, e as características das 36 bandas do sensor MODIS são dispostas na Tabela 4.7 (NASA, 2008).

Tabela 4.6 – Características do Satélite Aqua (Fonte: NASA, 2008)

Missão	Earth Observing System (EOS)
Instituição Responsável	NASA
País/Região	Estados Unidos
Satélite	AQUA
Lançamento	4/5/2002
Situação Atual	Ativo
Órbita	Circular, polar e heliossíncrona
Altitude	705 km
Inclinação	98,2º
Tempo de Duração da Órbita	99 min
Horário de Passagem	1:30 P.M.
Período de Revisita	1 a 2 dias
Instrumentos Sensores	AMSR-E, MODIS, AMSU, AIRS, HSB e CERES

Inicialmente, os dados brutos coletados pelo sensor MODIS/Aqua são recebidos por estações em terra e encaminhados para o *Goddard Space Flight Center* (GSFC). Nessa instituição, os dados são submetidos a uma rotina de processamentos, organizada nos seguintes níveis: 1) nível L0 – remoção de sobreposições de área existentes nos dados brutos; 2) nível L1A – transformação de dados brutos em números digitais; 3) nível L1B – transformação de níveis digitais em radiância; 4) nível L2 – dados de radiância são processados por algoritmos específicos para obtenção de parâmetros geofísicos diversos.



Tabela 4.7 – Características do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua. A largura da banda é dada em nano metros (nm). A resolução espacial das bandas 1 e 2 é de 250m, das bandas 3 a 7 é de 500m, e das bandas 8 a 36 é de 1000m (Fonte: NASA, 2008).

Uso Primário	Banda	Largura Banda	Uso Primário	Banda	Largura Banda
Terra/Nuvem/Aerosóis Delimitação	1	620 - 670	Temperatura Superfície/Nuvem	20	3 660 - 3 840
	2	841 - 876		21	3 929 - 3 989
Terra/Nuvem/Aerosóis Propriedades	3	459 - 479		22	3 929 - 3 989
	4	545 - 565	23	4 020 - 4 080	
	5	1230 - 1250	Temperatura Atmosfera	24	4 433 - 4 498
	6	1628 - 1652		25	4 482 - 4 549
	7	2105 - 2155	Vapor de Água Nuvens de Cirrus	26	1 360 - 1 390
Cor do Oceano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica	8	405 - 420		27	6 535 - 6 895
	9	438 - 448		28	7 175 - 7 475
	10	483 - 493	Propriedades Nuvens	29	8 400 - 8 700
	11	526 - 536		Ozônio	30
	12	546 - 556	Temperatura Superfície/Nuvem	31	10 780 - 11 280
	13	662 - 672		32	11 770 - 12 270
	14	673 - 683	Altura Nuvem	33	13 185 - 13 485
	15	743 - 753		34	13 485 - 13 785
16	862 - 877	35		13 785 - 14 085	
Atmosfera Vapor de Água	17	890 - 920		36	14 085 - 14 385
	18	931 - 941			
	19	915 - 965			

As imagens MODIS utilizadas nesse trabalho foram adquiridas do GSFC, nível de processamento L1B, num total de 278 imagens, representativas do período de Agosto/2002 a Dezembro/2007, perfazendo uma média de 4 imagens por mês. No *Naval Research Laboratory* (NRL), *Stennis Space Center/Mississippi/USA*, as imagens foram processadas utilizando o programa de processamento de imagens *Automated Processing System* (APS; Martinolich, 2006). O APS é um poderoso sistema de processamento de imagens de satélites que inclui calibrações espaciais e radiométricas, remoção de ruídos *striping*, correções atmosféricas, cálculo da temperatura da superfície do mar e algoritmos bio-ópticos específicos. O algoritmo para correção atmosférica em águas costeiras implementado no APS é o mesmo prescrito pela *NASA's Fifth Reprocessing* (STUMPF et al., 2003; ARNONE et al., 1998). O APS mantém compatibilidade com os códigos de processamentos da NASA/Goddard, considerados o estado da arte em termos de processamento de imagens de satélites (GREEN ; GOULD, 2008). A reamostragem das bandas do sensor MODIS utilizando a técnica proposta por LADNER et al. (2007), também embutido no APS, permitiram a geração de pseudo-bandas com resolução espacial de 250m. A

reflectância de sensoriamento remoto para as respectivas bandas do sensor MODIS, com resolução espacial de 250m, foi o produto derivado dos processamentos efetuados com o programa APS.

#### 4.4 ALGORITMOS

##### 4.4.1 Implementação do Algoritmo QAA

O algoritmo QAA (*Quasi-Analytical-Algorithm*, LEE et al., 2002; 2007) foi implementado no ambiente de programação IDL/Envi 4.1. As propriedades ópticas inerentes puderam então ser estimadas por meio do algoritmo QAA e das reflectâncias de sensoriamento remoto extraídas das imagens MODIS pelo APS (ou da reflectância obtida por meio dos dados radiométricos coletados *in situ*). Num primeiro momento as propriedades ópticas inerentes estimadas foram: coeficiente de absorção total ( $a_t$ ), coeficiente de absorção do CDOM e detritos ( $a_{CDM}$ ), coeficiente de absorção fitoplâncton ( $a_{ph}$ ), e coeficiente de retroespalhamento do material particulado em suspensão ( $b_{bp}$ ). O coeficiente de espalhamento do material particulado em suspensão ( $b_p$ ) foi então derivado de  $b_{bp}$  por meio da relação proposta por GOULD et al. (1999):

$$b_{bp} = 0.01829 * b_p + 0.00006 \quad (4.4)$$

##### 4.4.2 Estimativa do Total de Sólido em Suspensão (TSS)

Para estimativa do TSS a partir das imagens dos satélites, três procedimentos distintos foram realizados devido aos diferentes sensores aqui utilizados. O primeiro método faz uso do algoritmo empírico proposto por TASSAN (1987) e os dados de reflectância obtidos a partir das imagens Landsat. O segundo método utiliza dados de TSS coletados no leito do RSF (próximo ao município de Propriá) para calibrar as imagens CBERS-2. O terceiro método usa o coeficiente de espalhamento estimado a partir das imagens MODIS (ou estimado a partir dos dados radiométricos coletados *in situ* com o radiômetro portátil) e o algoritmo empírico proposto por GOULD et al. (2006).

***Primeiro Método: Estimativa do Total de Sólido em Suspensão - Imagens Landsat***

Os primeiros estudos com o objetivo de derivar algoritmos para se estimar o TSS na água a partir de dados de refletância obtida por meio das imagens Landsat começaram a ser realizados na década de 70 (RITCHIE ET AL., 1976; HOLYER, 1978; AMOS ; ALFOLDI, 1979). Inúmeros outros trabalhos apareceram nas últimas décadas (KHORRAN, 1981; TASSAN, 1987; NOVO ET AL., 1989; MERTES ET AL., 1993; WARRICK ET AL., 2004; DOXARAN ET AL., 2006), mostrando a complexidade dos processos de interação (reflexão, refração, absorção e espalhamento) da luz com superfície líquida, com a água pura, com os sedimentos em suspensão e substâncias dissolvidas mais os pigmentos clorofilados e a necessária correção para os efeitos atmosféricos. Devido a essa complexidade, diversos algoritmos empíricos estão disponíveis, alguns de fácil implementação, outros, mais elaborados para satisfazer condições específicas.

A seguinte relação funcional entre o total de sólido em suspensão (TSS, em mg/L) e a refletância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ ) pode ser encontrada em diversos trabalhos (KHORRAN, 1981; TASSAN, 1987; MERTES ET AL., 1993; TASSAN, 1997):

$$\log(TSS) = a + b \log(R_{rs}(570nm)) \quad (4.5)$$

onde,  $a$  e  $b$  são constantes e  $R_{rs}(570nm)$  é a refletância medida na banda 2 do satélite Landsat. Tassan (1987), por meio de experimentos realizados no mar Adriático, obteve a seguinte equação:

$$\log(TSS) = (3.08 \pm 0.27) + (1.70 \pm 0.14) \log(R_{rs}(570nm)) \quad (4.6)$$

Uma análise de vários modelos de correlação entre TSS e  $R_{rs}$  é apresentada por XIA (1993). Segundo esse autor, o modelo logarítmico funciona desde que não existam concentrações muito altas, maiores do que  $300\text{g/m}^3$ . Embora existam outros algoritmos para estimativas da concentração de sedimento em suspensão, optou-se pelo algoritmo logarítmico pela facilidade de implementação e pelo desempenho satisfatório mencionado nas publicações consultadas (TASSAN, 1987; XIA, 1993; MERTES ET AL., 1993; TASSAN, 1997).

**Segundo Método: Estimativa do Total de Sólido em Suspensão – Imagens CBERS-2**

Buscou-se a curva de regressão que melhor ajusta as concentrações de sedimento coletadas no RSF no ano 2004 e os valores de reflectância situados próximos à localidade onde as coletadas de TSS foram realizadas (as coletas foram realizadas no município de Propriá, 80 km da foz do RSF). Graças a alta resolução espacial das imagens CBERS-2 (20 metros) foi possível relacionar as reflectâncias com os valores de TSS coletados na calha do RSF. A Figura 4.9 apresenta a curva de regressão exponencial do TSS versus a reflectância (após correção atmosférica) derivada da banda 2 das imagens CBERS-2.

Ou seja, a carga de TSS foi estimada a partir das imagens CBERS-2 utilizando a equação:

$$Y=0.312e^{38.915X} \quad (4.7)$$

onde,  $Y$ =TSS (mg/L) e  $X$ =reflectancia da banda2 do satélite CBERS-2 (sensor CCD).

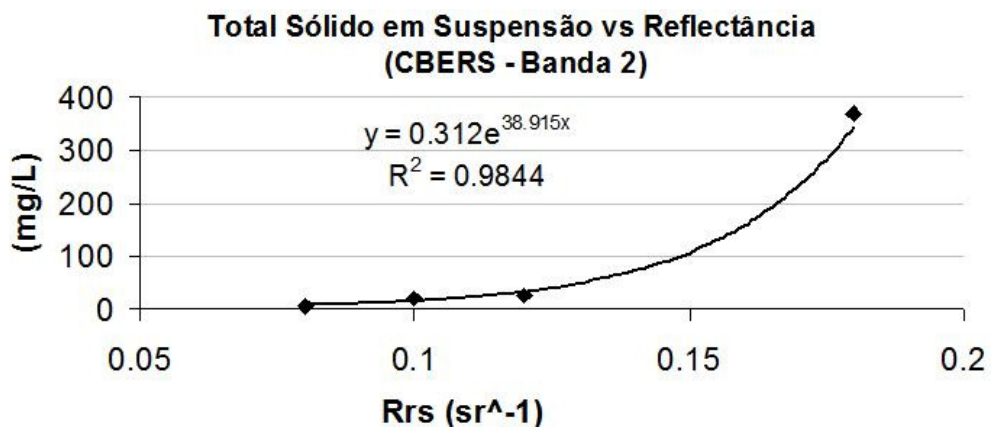


Figura 4.9 - Curva de regressão do Total de Sólido em Suspensão versus a Reflectância derivada das imagens CBERS-2

***Terceiro Método: Estimativa do Total de Sólido em Suspensão – Coeficiente de Espalhamento (imagens MODIS)***

Para estimar o total de sólido em suspensão, GOULD et al. (2006) propuseram uma equação que estabelece a relação entre o coeficiente de espalhamento do material particulado ( $\lambda=555$  nm) e o TSS (mg/L):

$$TSS=1.42354 * b_p(555) \quad (4.8)$$

Os dados radiométricos coletados *in situ* e convertidos para reflectância de sensoriamento remoto, conforme item 4.2, juntamente com o algoritmo QAA, foram utilizados para se estimar o coeficiente de espalhamento do material particulado em suspensão  $b_p(555)$ , e a Equação 4.8 foi utilizada para estimar o TSS.

#### 4.4.3 Particionamento das IOP's

Devido ao fato de que o CDOM e o material detrítico serem caracterizados por espectros de absorção exponenciais decrescentes similares com o aumento do comprimento de onda (BRICAUD et al., 1981; ROESLER et al., 1989), o algoritmo QAA (assim como os algoritmos semi-analíticos) não distingue esses constituintes, e, como uma solução prática, esses dois constituintes opticamente ativos são integrados numa única componente de absorção denominada de coeficiente de absorção do material dissolvido colorido/detrítico ( $a_{CDM}$ , SIEGEL et al., 2002).

O particionamento de  $a_{CDM}$  consiste em vários passos e equações e segue a metodologia proposta por GOULD e ARNONE (2003) e GOULD et al. (2006). A Figura 4.10 mostra, de maneira geral, o fluxograma de partição do coeficiente de absorção do CDOM, sedimento e material detrítico.

De maneira geral, os principais parâmetros de entrada são:  $a_{ph}$ ,  $a_{CDM}$  e  $b_{bp}$  estimados por meio das imagens MODIS e do algoritmo QAA. O TSS é estimado empiricamente a partir da equação 4.8. Posteriormente o TSS é separado na parte orgânica (MOP) e inorgânica (MIP). O coeficiente de absorção do sedimento/detrítico,  $a_{sd}$ , é estimado a partir da MIP. E finalmente o

$a_{CDOM}$  é derivado do  $a_{CDM}$ ,  $a_d$  e  $a_s$ , sendo que  $a_d$  é estimado a partir do coeficiente de absorção do fitoplâncton, e  $a_s$  a partir de  $a_{sd}$  e  $a_d$  (Figura 4.10).

Reconhecemos que os algoritmos utilizados para se obter o  $a_{CDOM}$  e o  $TSS$  foram desenvolvidos com dados oriundos de outra região, Golfo do México/USA, e que os parâmetros ópticos da água podem variar de região para região, conforme o tamanho, forma e composição das partículas em suspensão. Entretanto, buscamos aqui acessar a performance dos algoritmos para a região do RSF.

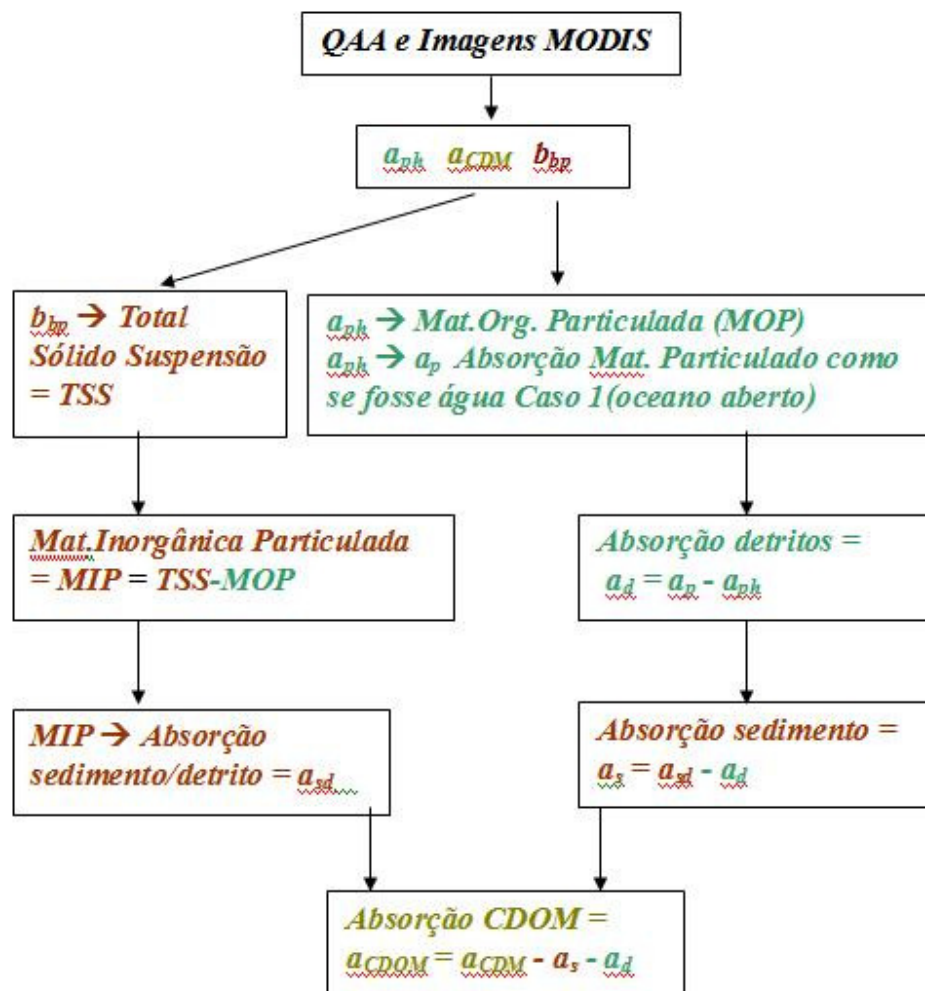


Figura 4.10 – Fluxograma de Partição do coeficiente de absorção do CDOM, sedimento e material detrítico.

## 4.5 SÉRIES TEMPORAIS

### 4.5.1 Diagramas Hovmoller

Para investigar a dinâmica espacial da pluma do RSF no período de Ago/2002 até Dez/2007, diagramas Hovmoller foram construídos utilizando o transecto ABC mostrado na Figura 4.11 (onde  $AB=40\text{Km}$  e  $BC=60\text{Km}$ ). Basicamente o transecto ABC está localizado ao longo do eixo principal de deslocamento da pluma durante um ciclo sazonal de um ano. O ponto A está localizado numa região onde principalmente durante os meses de Junho, Julho e Agosto ocorre um maior aporte de matéria devido à ressuspensão costeira mais acentuada e também à mudança de trajetória da pluma do RSF que nesse período flui de sul para norte (U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE,

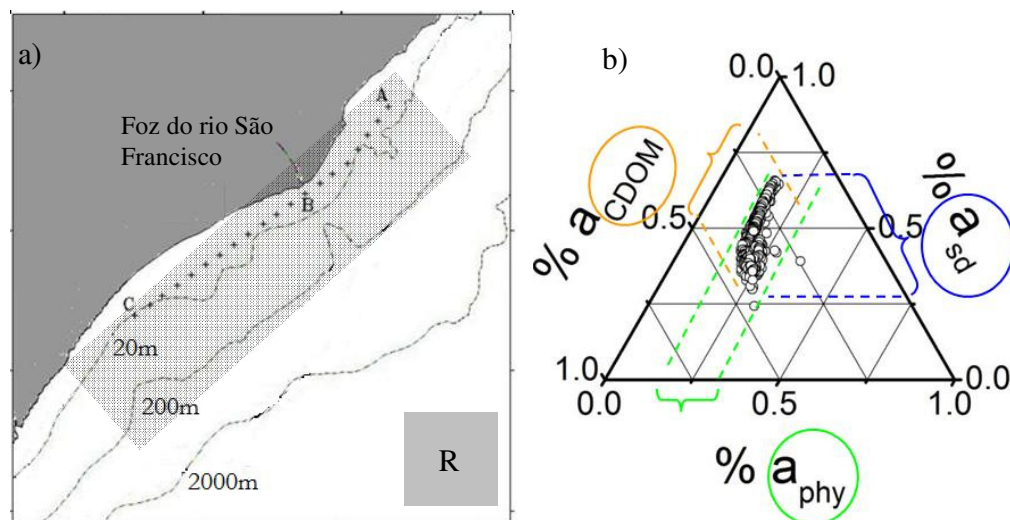


Figura 4.11 – a) transecto ABC utilizado para construir os diagramas Hovmoller; área sombreada representa a região de amostragem para gerar os diagramas ternários e a análise estatística; retângulo **R** define a região amostrada para gerar o limiar das isolinhas de absorção; b) diagrama ternário com o percentual representativo de cada coeficiente absorção, no caso, predomínio do  $a_{sd}$ .

1967). O ponto B está localizado a 3 km afóra da desembocadura do RSF, região do estuário externo geralmente não estratificada e enriquecida de TSS devido aos processos de ressuspensão que atuam próximo à foz do RSF, caracterizada também como região de máxima turbidez (KNOPPES et al., 2005; MEDEIROS, 2003). O ponto C delimita o alcance da pluma ao longo da

costa na sua trajetória predominante ao longo do ano. Entre esses três pontos, há variações que podem ser observados nos diagramas gerados.

Com os valores de TSS,  $a_{CDOM}(443nm)$ ,  $a_{ph}(443nm)$ , e TSM (Temperatura de Superfície do Mar) estimados, médias mensais dessas variáveis foram calculadas e os diagramas Hovmoller das médias mensais para cada variáveis foram gerados. Para subsidiar a interpretação dos diagramas, séries temporais mensais das variáveis ambientais: vento, vazão na foz do RSF e pluviosidade na bacia de drenagem do RSF foram também construídas. A correlação de Spearman (0.05%) entre as valores médios mensais das variáveis estimadas [TSS,  $a_{sd}(443nm)$ ,  $a_{CDOM}(443nm)$ ,  $a_{ph}(443nm)$ , e TSM] e os valores médios mensais das variáveis ambientais foi calculada; para tal, extraiu-se a média espacial de cada variável estimada por meio das imagens MODIS, considerando-se a região delimitada pelo retângulo sombreado da Figura 4.11-a. Dados de corrente oceânica superficial derivadas de satélites altímetros também foram utilizados para ilustrar o comportamento do fluxo de corrente nas proximidades do talude da plataforma adjacente à foz do RSF.

#### 4.5.2 Classificação Massas d'Água

Para verificar qual constituinte opticamente ativo (sedimento/detrito, CDOM, fitoplâncton) predomina nas águas adjacentes à foz do RSF durante o ciclo anual, médias sazonais dos coeficientes de absorção do sedimento/detrito [ $a_{sd}(443nm)$ ], do CDOM [ $a_{CDOM}(443nm)$ ] e do fitoplâncton [ $a_{ph}(443nm)$ ] foram calculadas (referenciadas de agora em diante como imagens sazonais médias). Dessa forma, a variação sazonal compreende os períodos de Verão (Dezembro, Janeiro, Fevereiro), Outono (Março, Abril, Maio), Inverno (Junho, Julho, Agosto) e Primavera (Setembro, Outubro, Novembro).

Levando-se em conta apenas a região sombreada (retângulo sombreado) da Figura 4.11-a e desconsiderando a área sobre o continente, para cada valor sazonal médio estimado de  $a_{sd}$ ,  $a_{CDOM}$  e  $a_{ph}$  em um mesmo ponto geográfico (mesmo pixel), calculou-se a contribuição relativa de cada coeficiente da seguinte forma:

$$a_{total}(443) = a_{sd}(443) + a_{CDOM}(443) + a_{ph}(443) \quad (4.9)$$

$$\% a_{sd}(443) = a_{sd}(443) / a_{total}(443) \quad (4.10)$$



$$\% a_{CDOM}(443) = a_{CDOM}(443) / a_{total}(443) \quad (4.11)$$

$$\% a_{ph}(443) = a_{ph}(443) / a_{total}(443) \quad (4.12)$$

em seguida os dados de porcentagem foram plotados em diagramas ternários como o exemplificado na Figura 4.11-b.

Complementando o processo de classificação, isolinhas dos coeficientes  $a_{sd}(443nm)$ ,  $a_{CDOM}(443nm)$  e  $a_{ph}(443nm)$  foram geradas. Para gerar as isolinhas, calculou-se o valor médio para cada um desses coeficientes numa região predeterminada (Figura 4.11-a, quadrado R). Com isso, buscou-se identificar qual é o valor médio dos coeficientes de absorção do sedimento/detrimento, CDOM e fitoplâncton na região mais oceânica, supostamente sem interferência de águas costeiras. O valor médio encontrado foi de  $0.018m^{-1}$ . Definimos então o valor de  $0.02m^{-1}$  como o limiar que separa os coeficientes de absorção das águas costeiras das águas mais oceânicas, e, dessa forma, identificar o alcance das águas costeiras sobre a plataforma adjacente à foz do RSF.

## 5. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados de acordo com a seqüência a seguir:

1) Para mostrar os resultados obtidos, primeiramente será apresentada a análise dos quatro sistemas da costa Leste do Brasil — Rio São Francisco (SE/AL), Caravelas (BA), Rio Doce (ES) e Rio Paraíba do Sul (RJ) — por meio de sensoriamento remoto acoplado a dados de matéria em suspensão coletados *in situ*. O objetivo aqui estabelecido é identificar diferenças nos padrões de dispersão de sedimento existentes entre as plumas desses sistemas fluviais.

2) Subsequentemente, a série histórica da vazão do RSF auxiliará na identificação dos eventos extremos ocorridos ao longo do período em que a vazão do rio tem sido monitorada. A dinâmica da pluma do RSF é então avaliada em função das forçantes físicas atuantes (vazão, vento, precipitação na bacia de drenagem e corrente costeira) e das variações dos parâmetros físicos e biogeoquímicos estimados por meio das imagens Landsat, CBERS-2 e MODIS .

3) Em seguida, os eventos extremos ocorridos durante os anos de 1979, 2004 e 2007 são avaliados em função das concentrações de TSS por meio de imagens Landsat, CBERS-2 e MODIS.

4) Finalmente, utilizando o estado da arte em termos de algoritmos para estimativas das propriedades opticamente ativas na coluna d'água, assim como imagens de satélite de alta resolução espectral destinadas ao monitoramento oceânico (imagens MODIS), é apresentada uma avaliação da pluma do RSF durante o período recente, especificamente entre os anos de 2002 a 2007. As propriedades ópticas inerentes estimadas por meio das imagens MODIS e do algoritmo QAA viabilizam então a classificação das massas d'águas da região adjacente ao estuário do RSF. A metodologia implementado tem como meta o monitoramento permanente da pluma do RSF e pode ser expandida para outros sistemas estuarinos da costa brasileira.

### 5.1 PLUMAS DE TURBIDEZ QUATRO SISTEMAS DA COSTA LESTE DO BRASIL

A identificação, quantificação e comparação das plumas de turbidez de quatro sistemas da costa Leste do Brasil foi realizada por meio de imagens Landsat e dados de matéria em suspensão coletados *in situ*, conforme informações adquiridas em trabalhos pretéritos (MEDEIROS, 2003; KNOPPERS et al., 1999b; CARNEIRO, 1998). Os quatro sistemas: Rio São

Francisco (SE/AL), Caravelas (BA), Rio Doce (ES) e Rio Paraíba do Sul (RJ), distinguem-se no aporte fluvial e na natureza da pressão humana nas bacias de drenagem.

### 5.1.1 Forçantes: Meteorológicas, Hidrológicas e Oceanográficas

Para análise dos 4 sistemas, as forçantes físicas atuantes são apresentadas na Tabela 5.1, assim como os períodos de coletas *in situ* e as datas de aquisições das imagens Landsat. A unidade do vento é apresentada na escala Beaufort (Força do Vento), mantendo assim a correspondência com as publicações de onde os dados foram extraídos. As coletas de campo realizadas em 17/06 e 22/08/2001 na foz do RSF são representadas pela imagem do dia 24/07/2000. A aferição das estimativas de sedimentos para as imagens do SCC foi efetuada considerando-se as mesmas datas de coletas de campo, o mesmo se deu para o RD.

Tabela 5.1 - Forçantes físicas atuantes no período de Coletas *In Situ* e durante as datas e horários de aquisição das imagens Landsat selecionadas. (Fonte: CARNEIRO, 1998; KNOPPERS et al, 1999b; MEDEIROS, 2003.). \*A descarga é soma da média da vazão diária dos três rios: Jacuçu/Itanhem/Penipe (informação da vazão do Rio Caravela não foi encontrada); \*\*não consta; \*\*\* Força1: 0,6-1,7m/s; Força2: 1,8-3,3m/s; Força3: 3,4-5,2m/s; Força4: 5,3-7,4m/s; Força5: 7,5-9,8m/s; Força6: 9,9-12,4m/s

Rio	Data Coleta <i>In Situ</i>	Data Imagem Landsat	Número Estações Transectos	Durante Coleta <i>In Situ</i>				Durante Aquisição Imagens Landsat								
				Estágio Maré	Níveis Mínimos/ Máximos (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Força e Direção Vento (***)	Estágio Maré	Níveis Mínimos/ Máximos (cm)	Nível Maré, na Hora de Aquisição Imagem (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Força e Direção Vento(***)				
RSF	10/02/2001	17/02/2001	6	Vazante	04; 208	1954	F 5 - E, NE	Enchente	68 ; 147	107	1995	F 4/5-E,SE				
	17/06/2001	24/07/2000	11	Enchente	49; 170	1140	F 5 - S, SE	Preamar	55 ; 156	154	1786	F 5 - E, SE				
	22/08/2001		17	Vazante	12; 188	1221	F 5 - S, SE									
	19/09/2001	05/09/2001	22	Vazante	00; 208	1174	F 5 - NE	Vazante	20 ; 178	55	1153	F 4/5-E, SE				
	25/01/2002	31/12/2000	17	Enchente	42; 166	1463	F 5 - NE	Vazante	49 ; 156	130	1906	F 6 - E, NE				
SCC*	14/01/1995		13	**	46; 247	38	F 5 - E	Vazante	46; 241	230	53	F 3/4 - NE				
	15/01/1995				33; 257	37	F 3 - NE									
	16/01/1995	07/01/1995			20; 269	36	F 4/5 - NE									
	17/01/1995	16/06/1995			11; 279	36	F 4 - N, NE									
	19/01/1995				10; 280	37	F 3 - NE									
	20/01/1995				10; 270	36	F 3/4 - N, NE									
RD	17/12/1994		8	Vazante	20; 115	1070	F 5 - NE	Vazante	20; 130	70	1070	F 5 - NE				
	18/12/1994	06/12/1994		Vazante	10; 110	1070	F 4/5 - NNE					Vazante	50; 120	100	306	F 2/3 - E
	19/12/1994	05/08/1996		Enchente	10; 110	1070	F 3 - SE					Vazante	10; 120	90	2775	F 4/5 - NE
	20/12/1994	27/12/1996		Enchente	05; 105	1070	F 2/3 - SE									
	21/12/1994			Vazante	05; 100	1070	F 1 - SE									
RPS	14/07/1994	06/07/1994	12	Enchente	20; 110	446	F 4/5 - SE	Enchente	30; 100	60	454	F 3 - NE				
	05/10/1994	10/10/1994	12	Enchente	05; 140	274	F 3/4 - SE	Vazante	30; 100	54	364	F 3/4 - NE				
	12/12/1994		21	Vazante	32; 97	753	F 5 - NE	Enchente	38; 90	42	760	F 5 - NE				
	13/12/1994	13/12/1994		Vazante	29; 100	678	F 5/6 - NE									
	14/12/1994			Vazante	27; 103	558	F 5 - NE									
	15/12/1994			Vazante	24; 105	457	F 4/5 - N, NE									

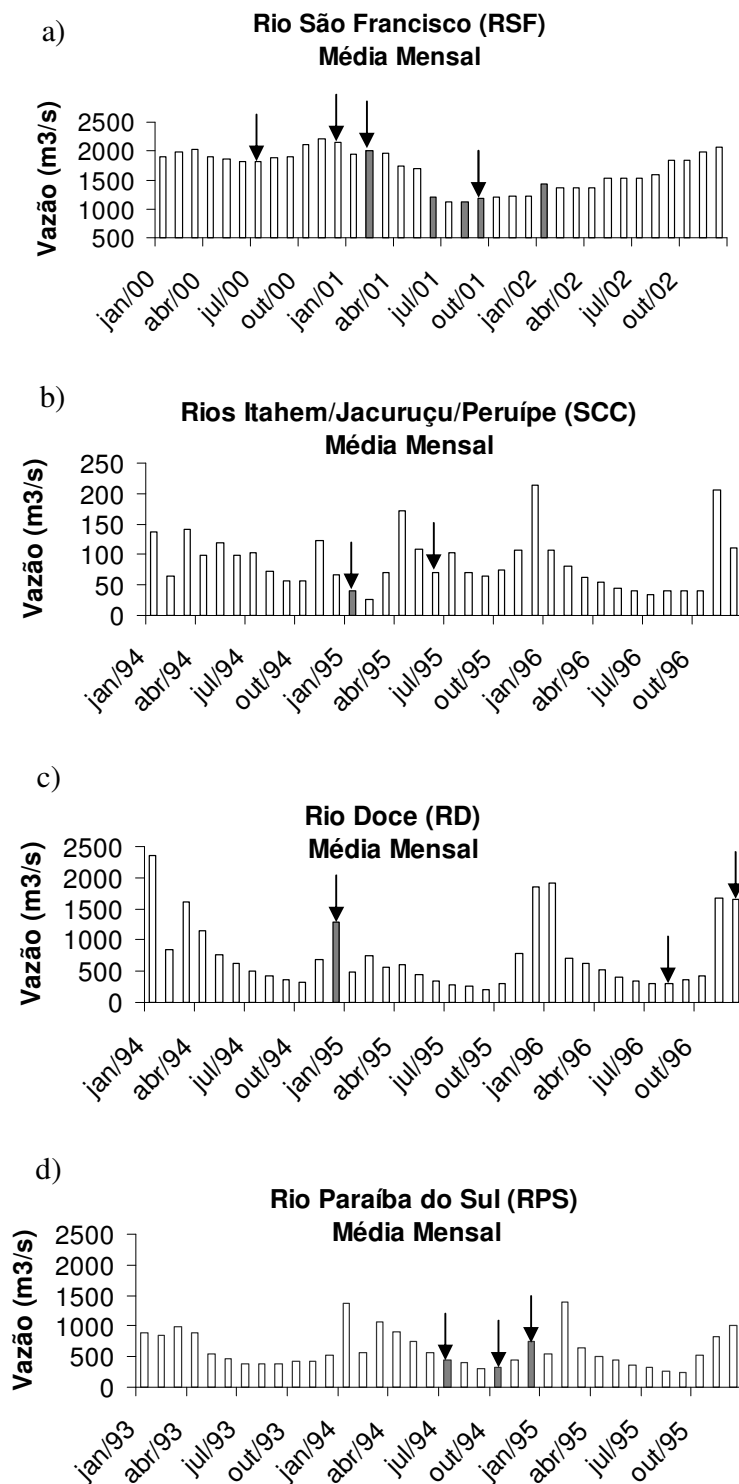


Figura 5.1 – Vazão Média Mensal dos Rios: —→ período aquisição imagem  
 ■ período coleta *In Situ*  
 (Fonte: ANA – Agência Nacional de Águas, 2008)

A Figura 5.1 mostra as vazões dos rios para os períodos de coleta *in situ* e de aquisição das imagens Landsat. A vazão do RSF durante o período de estudo passou por dois estágios: num primeiro momento, de Jan/2000 a Mai/2001, o rio apresentou uma vazão média mensal em torno de  $1800\text{m}^3/\text{s}$ , regularizada em função das barragens construídas à montante, e que acabaram com o ciclo sazonal natural que o rio possuía antes dos represamentos (KNOPPERS et al., 2006); num segundo momento, de Jun/2001 a Jan/2002, a vazão média mensal teve uma queda excepcional, baixando para  $1200\text{m}^3/\text{s}$ , devido a intensa estiagem que ocasionou a crise energética do ano de 2001 (MEDEIROS, 2003). A vazão média mensal dos rios representados pelo SCC apresenta valores bem reduzidos, — lembrando que o rio Caravelas não compõe a vazão aqui integrada devido à falta de informação a respeito de sua descarga —, inferiores a  $250\text{m}^3/\text{s}$ , atingindo valores da ordem de  $25\text{m}^3/\text{s}$  em determinadas épocas do ano, como em Fev/1995. O RD tem um comportamental sazonal bem marcado, com picos de vazão em Dez/Jan, e grande amplitude entre a época de baixa e alta vazão. O RPS também apresenta as maiores vazões em Dez/Jan, aproximadamente  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , porém, após uma queda acentuada em Fev/94, apresenta valores elevados também em Mar/Abr,  $1200\text{m}^3/\text{s}$ .

### 5.1.2 Avaliação do Algoritmo de TSS utilizando Imagens Landsat

A aferição do algoritmo logarítmico de conversão dos dados de refletância de sensoriamento remoto, derivados das imagens Landsat, para concentração de sedimentos foi realizada comparando-se as estatísticas, média e desvio padrão, das concentrações de sedimentos em suspensão observadas *in situ* para cada estação de coleta, contra valores retirados de caixas (tamanho  $10 \times 10$  pixels) escolhidas nas imagens processadas na mesma região amostrada em campo (Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5). É importante ressaltar, entretanto, que estas comparações não são absolutas, uma vez que as datas de coleta em campo podem diferir das datas das imagens.

Tabela 5.2 – Valores de TSS obtidos em campo e estimados pelas Imagens Landsat. Células realçadas correspondem às imagens temporalmente mais afastadas das datas de coleta *In Situ*.

Rio	Coleta <i>In Situ</i>	Data Imagem	<i>In Situ</i> - TSS (g/m <sup>3</sup> )		Imagem - TSS (g/m <sup>3</sup> )	
			Média	Desv.Padrão	Média	Desv.Padrão
<b>RSF</b>	10/02/2001	17/02/2001	<b>7.59</b>	6.37	<b>8.10</b>	4.94
	17/06/2001	24/07/2000	<b>7.70</b>	3.55	<b>6.51</b>	4.62
	22/08/2001		<b>9.19</b>	8.71		
	19/09/2001	05/09/2001	<b>14.64</b>	9.50	<b>12.60</b>	6.05
	25/01/2002	31/12/2000	<b>16.51</b>	2.82	<b>7.77</b>	3.47
<b>SCC</b>	14 a 20/01/1995	07/01/1995	<b>2.05</b>	0.60	<b>1.85</b>	0.40
		16/06/1995			<b>4.30</b>	1.11
<b>RD</b>	17 a 21/12/1994	06/12/1994	<b>11.26</b>	5.71	<b>11.35</b>	5.24
		05/08/1996			<b>6.78</b>	2.00
		27/12/1996			<b>12.95</b>	6.91
<b>RPS</b>	14/07/1994	06/07/1994	<b>15.41</b>	8.24	<b>14.86</b>	1.76
	05/10/1994	10/10/1994	<b>42.06</b>	38.41	<b>31.21</b>	16.14
	12 a 15/12/1994	13/12/1994	<b>12.97</b>	12.05	<b>10.19</b>	9.22

A comparação realizada serve, no entanto, como um indicativo da acurácia do procedimento de sensoriamento remoto na estimativa da concentração de sedimentos. A Tabela 5.2 mostra os valores de TSS obtidos *in situ* e os valores estimados por meio das imagens de satélite. As imagens cuja data de aquisição está relativamente mais afastada da data de coleta *in situ* geralmente apresentaram valores médios mais discrepantes dos valores médios obtidos *in situ*. De maneira geral, o algoritmo TSS (Equação 4.6) apresentou um resultado satisfatório, com valores médios próximo dos valores médios de TSS obtidos *in situ* quando há uma proximidade entre as datas de aquisição da imagem e a data de coleta *in situ*. Este algoritmo foi utilizado, juntamente com as imagens Landsat, para se estimar a carga de sedimento nas desembocaduras dos rios São Francisco, Sistema Costeiro de Caravelas, Doce e Paraíba do Sul.

### 5.1.3 Campos de TSS estimados a partir das Imagens Landsat

A utilização de imagens do satélite Landsat, juntamente com dados pretéritos de TSS coletados *in situ* para aferição das estimativas de TSS via sensoriamento remoto, representa a estratégia aqui abordada para a avaliação do potencial de dispersão de matéria em suspensão das plumas dos RSF, SCC, RD e RPS. Sendo assim, campos de TSS estimados a partir das imagens Landsat foram gerados, assim como gráficos do TSS (valores obtidos *in situ*) em relação à

distância da desembocadura dos rios (Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5). A força do vento durante os períodos de coletas, apesar das oscilações, não apresentou valores considerados atípicos para as respectivas regiões estudadas durante os períodos de coletas *in situ* e de aquisição das imagens Landsat.

**Rio São Francisco:** as estimativas de sedimento efetuadas para o RSF abrangem períodos de mínima e máxima descarga fluvial. Embora a cascata de barragens presente em seu leito tenha regularizado a vazão, ainda nota-se, em determinadas épocas, uma oscilação entre o período de mínima e máxima vazão, como o registrado no ano de 2001 (Figura 5.1a). Os campos de TSS estimados (Figura 5.2-a,b,c,d), mostram quatro situações distintas que revelam um panorama dos padrões de TSS presentes nas plumas de sedimentos estabelecidas na foz do RSF.

Na Figura 5.2-a nota-se, devido à maré preamar de quadratura atuante no momento da aquisição da imagem Landsat, e ventos de sudeste (Tabela 5.1), a intrusão de águas para a região interna do estuário, oriundas da região do pro-delta e adjacências, com uma carga de TSS em torno de  $14 \text{ g/m}^3$  alimentada por processos de ressuspensão que se estabelecem na região externa do estuário. A Figura 5.2-a1 evidencia essa zona de ressuspensão, com os maiores valores de TSS, da ordem de  $20 \text{ g/m}^3$ , encontrados em áreas localizadas a aproximadamente 2-5 km da desembocadura, onde processos costeiros de ressuspensão têm predominância (MEDEIROS, 2003). Essa zona de maior concentração de sedimento pode ser observada em todos os gráficos das Figuras 5.2-a1,b1,c1,d1. As Figuras 5.2-c,c1,d,d1 corroboram essa evidência, mostrando concentrações da ordem de  $5 \text{ g/m}^3$  na porção interna do estuário e na região à montante da desembocadura (valores negativos de distância, Figuras 5.2-c1,d1), enquanto que valores significativamente superiores são observados no estuário externo.

A Figura 5.2-b expõe uma condição de normalidade, onde a vazão do rio ( $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ ) é bastante próxima da regularizada, e o fluxo fluvial de TSS está próximo a  $5 \text{ g/m}^3$  (níveis de cinza mais claros no canal do rio). Nota-se que a porção sul da pluma de sedimento está menos confinada à região costeira, nesse caso, o vento de nordeste (Tabela 5.1) sopra praticamente tangente à linha de costa do estado de Sergipe com velocidades acima das observadas para as demais datas, da ordem de 10 a 12 m/s, favorecendo o transporte de *Ekman*, resultando em uma mudança do padrão de dispersão, com exportação de TSS à esquerda da direção do vento, para a região *offshore*.

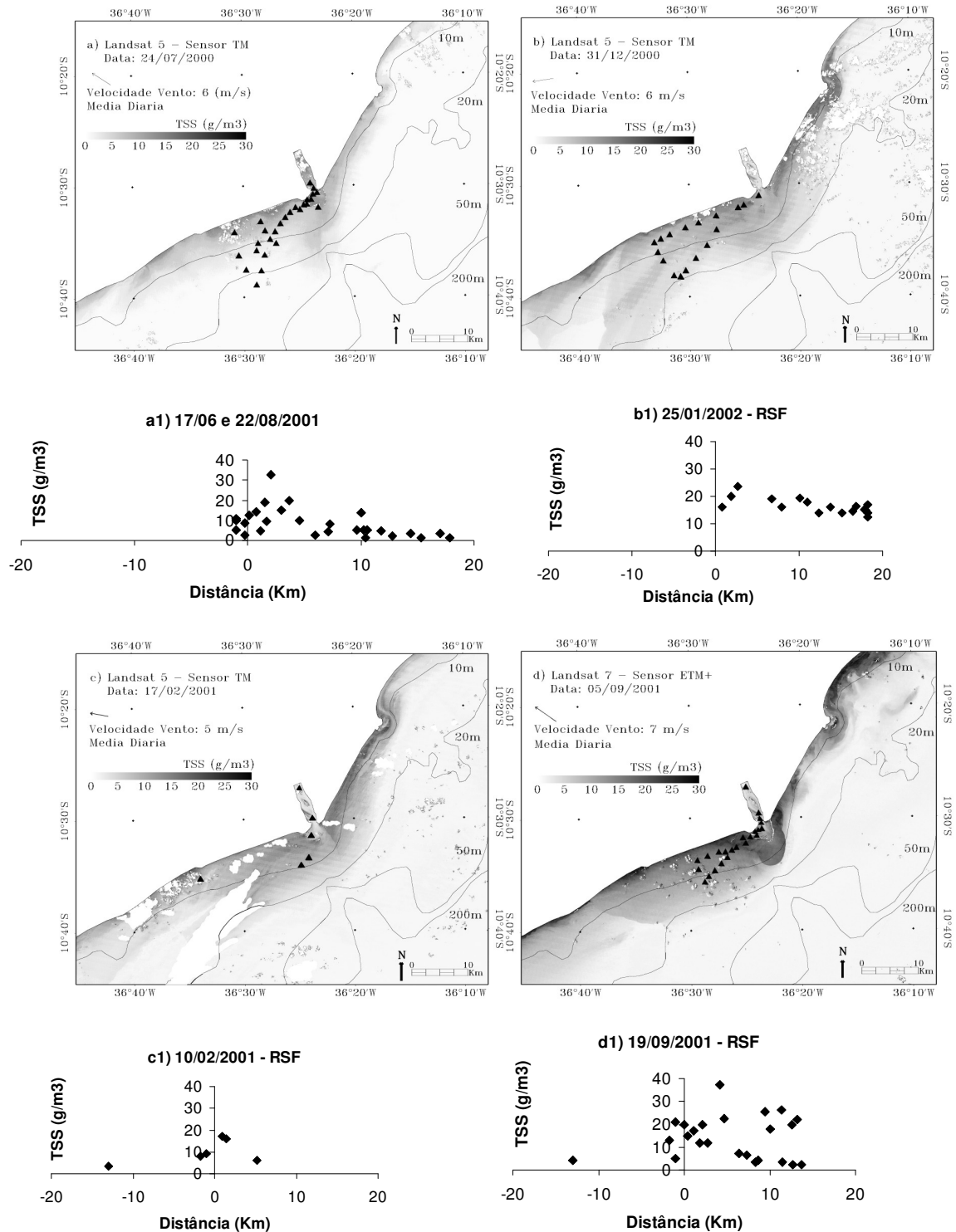


Figura 5.2 – Foz do Rio São Francisco. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c, d) e coletado *in situ* (a1, b1, c1, d1). A Tabela 5.1 discrimina as condições estabelecidas para cada situação. Triângulos em preto sobre as imagens indicam as posições de coleta de TSS *in situ*. Área em branco sobre a água = nuvens.



A Figura 5.2-c destaca a presença do molhe hidráulico devido ao jato, pobre em TSS (aproximadamente  $5 \text{ g/m}^3$ ), produzido pela descarga do rio, em torno de  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ , na região costeira, atuando como uma barreira hídrica no processo de deriva litorânea. As regiões adjacentes, tanto ao norte como ao sul da desembocadura, apresentam concentrações de TSS mais elevadas, indicando processos de ressuspensão ao longo da costa que passam a alimentar a pluma.

A Figura 5.2-d dá um exemplo das condições altamente empobrecidas de TSS ( $5 \text{ g/m}^3$ ) na região compreendida pelo leito do rio, semelhantes às condições oceânicas bem mais afastadas da costa, devido à retenção de TSS pelas barragens construídas à montante (KNOPPERS et al., 2006); e concentrações elevadas, da ordem de  $25\text{-}28 \text{ g/m}^3$ , nas regiões da zona de mistura estuarina sobre e além da zona de arrebentação costeira. Com maior amplitude e próxima da fase vazante máxima no momento da aquisição da imagem de satélite (Tabela 5.1), a maré de sizígia associada ao trem de ondas gerado por ventos de sudeste, podem ter sido determinantes no processo mais intenso de ressuspensão costeira: devido à turbulência gerada pelos forçantes vento e maré que no caso tinham direções opostas. As Figuras 5.2-d,d1, revelam claramente a pouca contribuição do RSF para a manutenção da pluma de sedimento em suspensão na região costeira.

Comparando-se as Figuras 5.2-b e 5.2-d, ambas de maré vazante, podemos dizer que a diferença marcante entre elas esteja relacionada ao fato de que para a primeira, o vento de nordeste ( $10 \text{ a } 12 \text{ m/s}$ ) é favorável a um transporte *offshore* devido ao efeito de *Ekman*, enquanto que para a segunda, o vento de sudeste ( $5 \text{ a } 9 \text{ m/s}$ ) favorece o empilhamento de água sobre a plataforma e o confinamento da pluma de TSS próximo à costa; nesse último caso, a oposição dos forçantes vento de sudeste e maré vazante de sizígia (Tabela 5.1) contribuem para uma maior turbulência costeira, conseqüentemente, maior ressuspensão. Outro fator que pode ter contribuído para essa diferença do padrão de dispersão aqui observado, é que no mês de Dezembro, imagem do dia 31/12/2000 (Figura 5.2-b), a corrente costeira característica na região adjacente à foz do RSF tem direção predominantemente para sudeste, e durante os meses de Junho, Julho e Agosto, imagem do dia 05/09/2001 (Figura 5.2-d), a corrente tem direção nordeste (U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE, 1967) que, associada ao vento de sudeste, podem restringir o alcance da pluma em sua porção sul para regiões mais distantes da costa e da desembocadura do rio.

**Sistema Costeiro de Caravelas:** o campo de TSS estimado (Figura 5.3-a), assim como os pontos de coleta in situ (Figuras 5.3-a1), revelam a baixa carga de sedimento nas regiões situadas sobre ou além da isóbata de 10m, região com predominância de sedimentos carbonáticos (LEÃO ; DOMINGUES, 2000), em geral não ultrapassando 5mg/L. É nessa região onde se encontram os bancos recifais de abrolhos, com seus arcos Costeiro e Externo (Figura 5.3-c). Porém, entre a costa e a isóbata de 10m é possível notar maior concentração de sedimento em suspensão (Figuras 5.3-a,b), região esta geralmente caracterizada por águas calmas e bastante turvas (LEÃO, 1999). O fluxo fluvial baixo e difuso, — considerando-se os rios Jacuruçu, Itahem, Caravelas e Peruípe as fontes de descarga fluvial na região; embora, por falta de dados de vazão, o rio Caravelas não componha a descarga fluvial integrada na Figura 5.1-b —, associado à velocidade de corrente sentido norte-sul, da ordem de 55cm/s (LEÃO, 1999), que predomina no canal de Caravelas (canal situado entre a costa e o Arco Costeiro, imediatamente após a isóbata de 10m, Figura 5.3c), limitam a troca de matéria entre a costa e os recifes, restringindo o alcance da pluma sobre a plataforma e atuando como uma barreira hídrica. Também, os recifes mais próximos da costa concorrem para a dispersão da energia das ondas oceânicas, minimizando a turbulência costeira.

A imagem do dia 16/06/1995 (Figura 5.3-b) foi coletada num período em que a vazão estava mais elevada, 60m<sup>3</sup>/s (Figura 5.1-b), contribuindo para a formação da pluma de turbidez costeira mais acentuada, da ordem de 20g/m<sup>3</sup>, deslocando aparentemente de sul para norte. Segundo LEÃO (1999), há duas seqüências de ondas na área, as quais coincidem com o regime dos ventos. As ondas que ocorrem durante a primavera/verão (outubro a fevereiro) são dirigidas pelos ventos de nordeste/leste, provocando um transporte de sedimento por deriva litorânea com sentido para sul, como observado na Figura 5.3a. Na seqüência de outono/inverno (março a setembro) dominam as ondas provenientes dos quadrantes de sudeste e sul/sudoeste, produzindo um transporte de sedimento por deriva litorânea com sentido para norte, como o observado na Figura 5.3-b, embora a direção média do vento para esse dia oscilou entre de leste/nordeste (Tabela 5.1). Porém, é mais provável que o padrão de deslocamento presente na Figura 5.3-b esteja mais associada à corrente de maré, cuja direção é de sul para norte (LEÃO, 1999), e particularmente nesse dia a maré era de sizígia, e vazante durante o instante de aquisição da imagem Landsat.

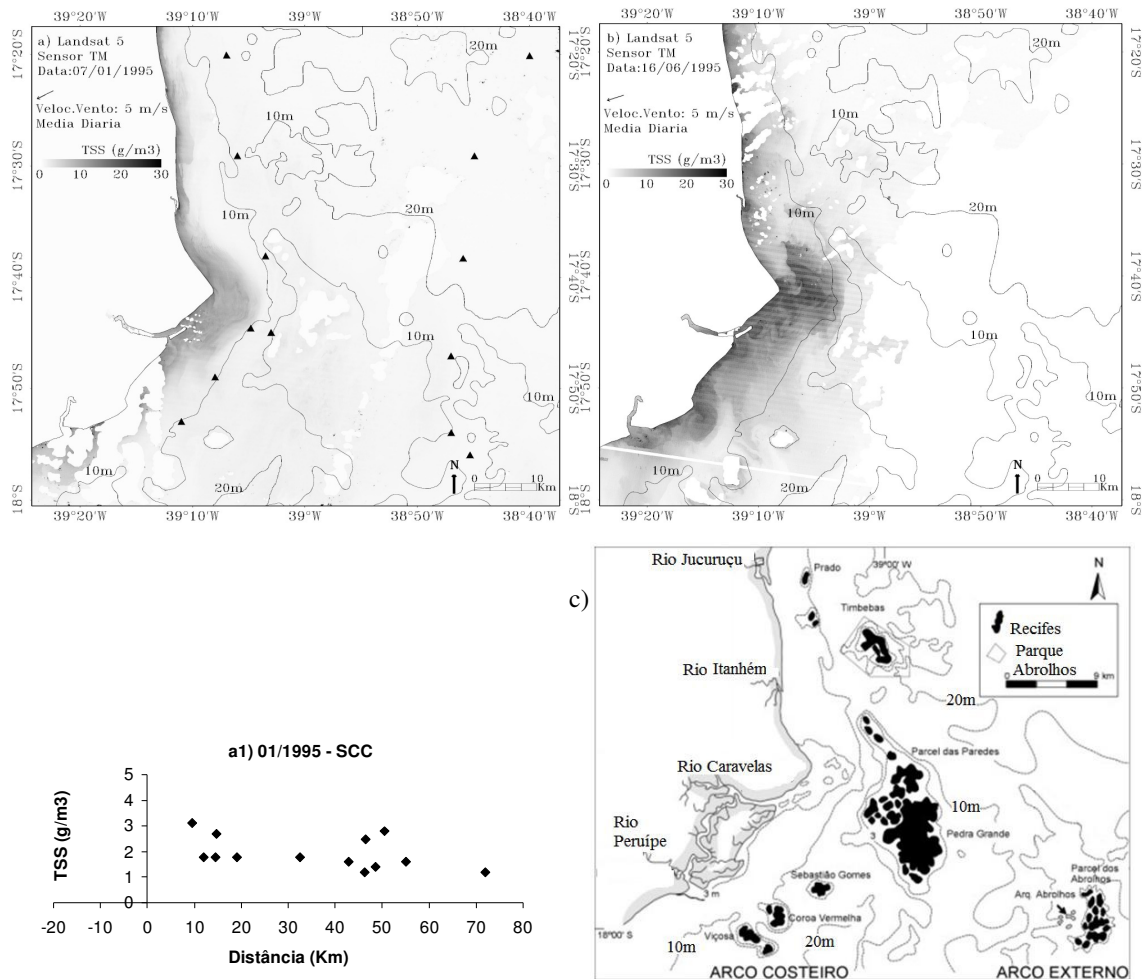


Figura 5.3 - Sistema Costeiro Caravelas. TSS ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b) e coletado *in situ* (a1); c) figura detalhada da região de Caravelas, mostrando os arcos costeiro e externo de recifes de corais (Fonte: LEAO, 1999). A Tabela 5.1 discrimina as condições estabelecidas para cada situação. Triângulos em preto sobre as imagens indicam as posições de coleta de TSS *in situ*. Área em branco sobre a água = nuvens.

**Rio Doce:** os campos de TSS estimados (Figuras 5.4-a,b,c) apresentam duas situações bem características. A primeira, representada por plumas de sedimento oriundas de descargas fluviais intensas (Figuras 5.4-a,c, Figura 5.1-c), mostra um padrão de dispersão que se estendem na direção *offshore*, com valores de TSS junto à desembocadura do rio da ordem de  $25\text{g}/\text{m}^3$ , como também mostrado pelo gráfico da Figura 5.4-a1. Nesse gráfico, podemos ver um gradiente decrescente de TSS a partir da desembocadura do RD, comportamento conservativo que sugere o rio como principal fonte do aporte de sedimento para alimentar a pluma costeira, com deposição gradativa do material ao longo da zona de dispersão da pluma. Aqui também, como no RSF, o

vento de nordeste, paralelo a linha de costa, favorece o transporte de *Ekman*, permitindo que a pluma de sedimento alcance a isóbata de 50m com valores de TSS da ordem de  $10\text{g/m}^3$ . A segunda situação (Figura 5.4-b), período em que o RD tinha sua menor vazão,  $306\text{m}^3/\text{s}$ , estabelece uma pluma de dispersão restrita à região costeira e com valores baixo de TSS (menores que  $10\text{mg/L}$ ). De maneira geral, há um acoplamento entre a vazão e a pluma de sedimento do RD, ou seja, a pluma é alimentada basicamente pela descarga fluvial sazonal, com picos de TSS nos períodos de maior descarga fluvial (Figuras 5.4-a,c, Figura 5.1-c), Dezembro/Janeiro.

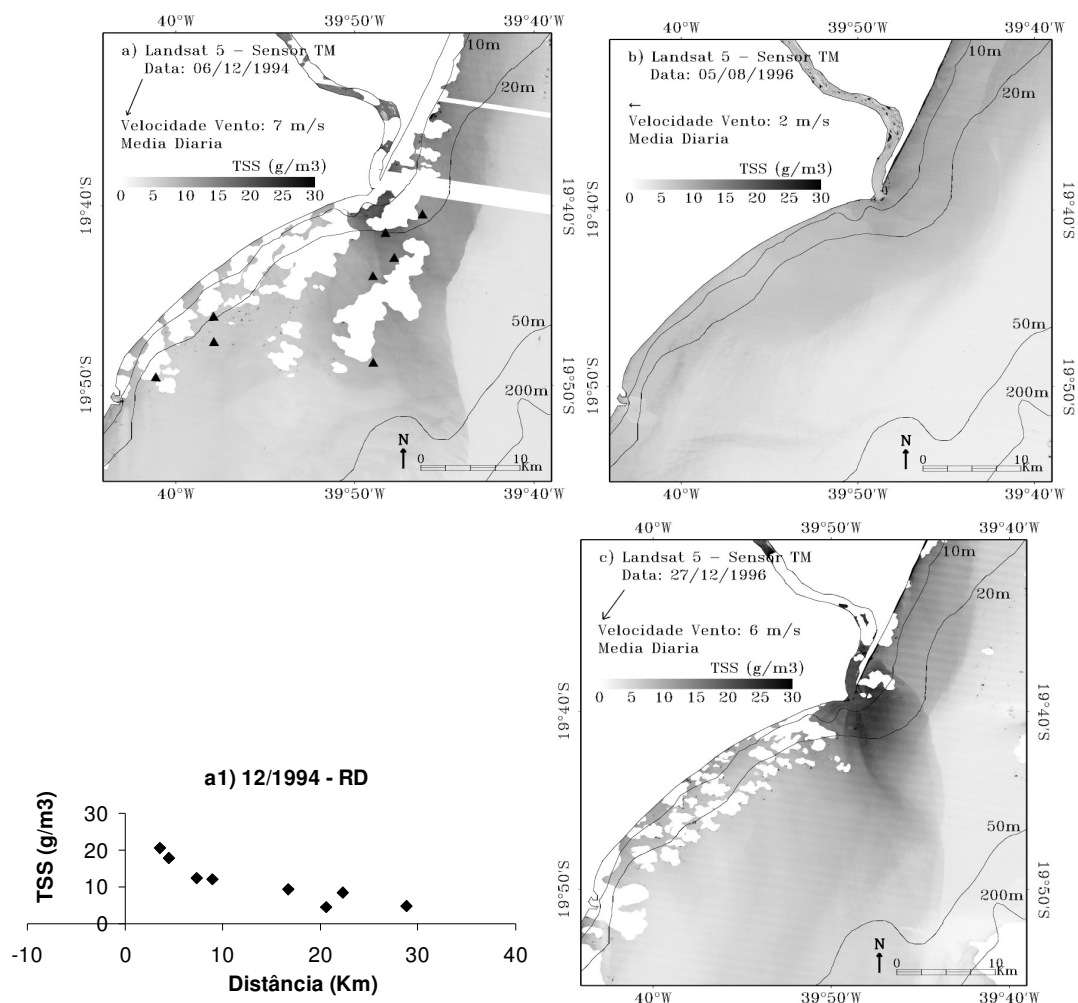


Figura 5.4 – Foz do Rio Doce. TSS ( $\text{g/m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c) e coletado *in situ* (a1). A Tabela 5.1 discrimina as condições estabelecidas para cada situação. Triângulos em preto sobre as imagens indicam as posições de coleta de TSS *in situ*. Área em branco sobre a água = nuvens.

**Rio Paraíba do Sul:** as Figuras 5.5-a,b,c mostram os campos de TSS estimados por meio das imagens do satélite Landsat para a região compreendida na foz do RPS. A Figura 5.5-a mostra pouca definição da pluma de sedimento na desembocadura do RPS, o material em suspensão deve-se predominantemente devido à processos de ressuspensão costeira; pouco sedimento é transportado pelo rio, como pode ser observado pela relativamente baixa carga de sedimento (10mg/L) presente no leito do RPS que encontrava-se no período de baixa vazão, 454m<sup>3</sup>/s (Figura 4.1-d). A Figura 5.5-b apresenta a maior carga de sedimento em suspensão na região costeira, com valores da ordem de 40g/m<sup>3</sup>, porém, a maior parte do sedimento em suspensão deve-se a processos de ressuspensão, pouca matéria em suspensão é observada na calha do RPS (gráfico da Figura 5.5-b1, valores negativos de distância) que encontrava-se no período de menor vazão, 364m<sup>3</sup>/s; o campo de vento praticamente é o mesmo que o das outras duas imagens (Tabela 5.1), de nordeste, levando a entender que o regime de ondas não seria tão diferente entre as imagens para justificar maior ressuspensão costeira. Porém, é provável que um regime intenso de ondas proveniente de um *swell* oriundo de regiões oceânicas remotas, contribuiu para acentuar o processo de ressuspensão costeiro. Na Figura 5.5-c, imagem do dia 13/12/1994, nota-se claramente teores mais elevados de TSS presentes no leito do rio, entre 25-30 g/m<sup>3</sup> (Figura 5.5-c1, valores negativos de distância), e uma pluma pequena e estreita dispersando-se, a partir da desembocadura, na direção sul e ampliando paralela à costa com concentrações de TSS menores devido à diluição e sedimentação gradativa dos materiais. Aqui é possível identificar um aporte de material do rio para a região costeira devido a vazão elevada, 760m<sup>3</sup>/s, apesar de haver também contribuições dos processos costeiros de ressuspensão para a pluma de sedimento. Embora a imagem tenha sido adquirida no estágio da maré enchente, a fase de quadratura possui pouca amplitude de maré para justificar uma intrusão de material em suspensão de maneira tão intensa rio acima. Segundo CARNEIRO (1998), para o RPS, também há um acoplamento entre a vazão e o transporte de material em suspensão, ou seja, nos períodos em que o rio possui a maior vazão, Dezembro/Janeiro (Figura 5.1-d), a pluma de sedimento recebe a maior carga de TSS oriunda do descarga fluvial; sendo que durante o período maior vazão, o particulado fluvial caracteriza-se por um material de origem mais inorgânico, prevalecendo durante a estiagem material de origem orgânica.

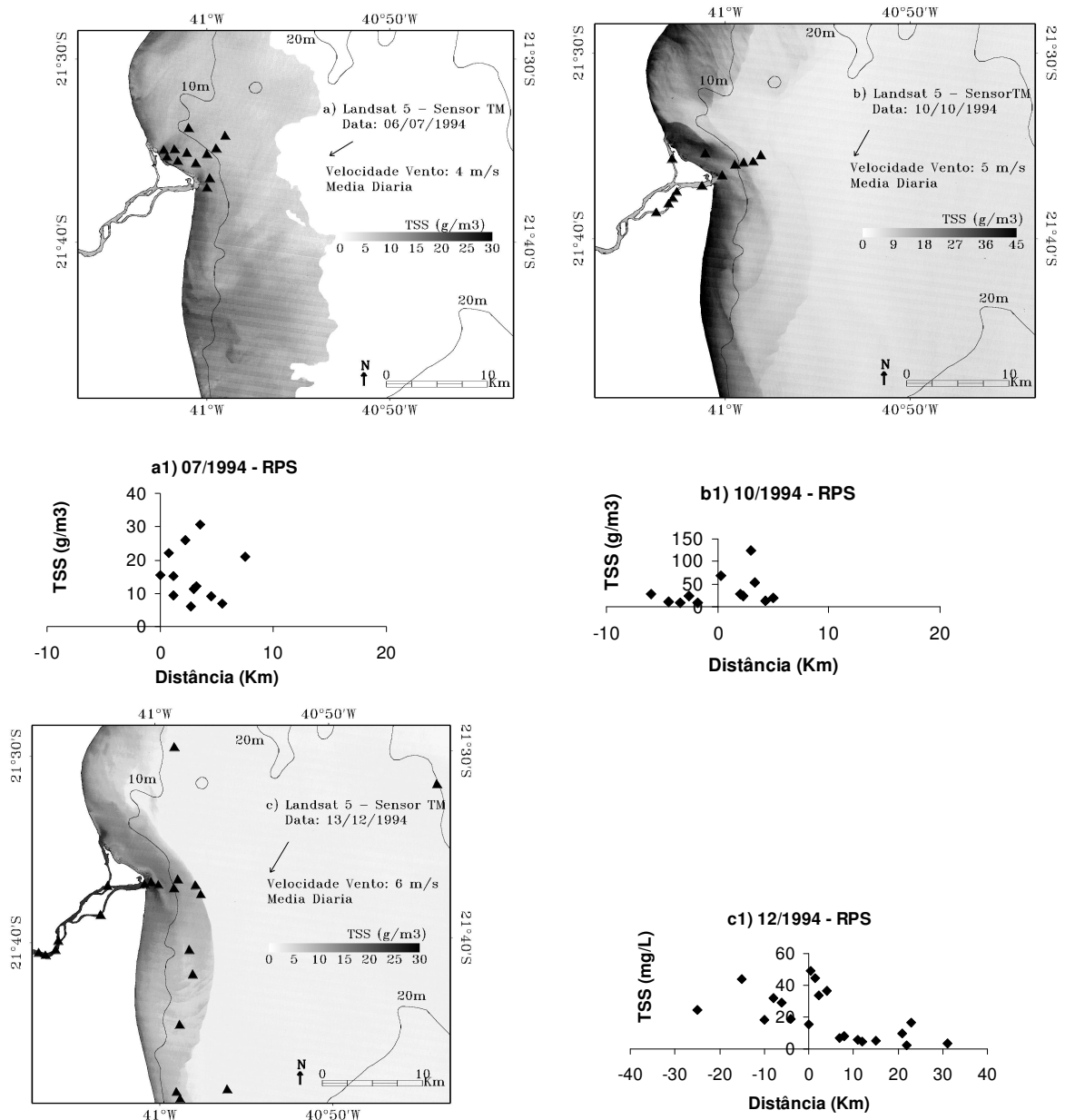


Figura 5.5 – Foz do Rio Paraíba do Sul. TSS ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) estimado por meio das imagens Landsat (a, b, c) e coletado *in situ* (a1, b1, c1). A Tabela 5.1 discrimina as condições estabelecidas para cada situação. Triângulos em preto sobre as imagens indicam as posições de coleta de TSS *in situ*. Área em branco sobre a água = nuvens.

## 5.2 OS EVENTOS EXTREMOS

### 5.2.1 Série Histórica da Vazão do RSF

As Figuras 5.6-a,b mostram a série histórica da vazão obtida da estação fluviométrica da cidade de Propriá, localizada a 80 km da foz do RSF (ANA, 2008) — existe uma lacuna de dados durante os anos de 1974 a 1976 devido a problemas de registro das estações fluviométricas. Durante o período compreendido entre os anos de 1940 a 1986 a vazão do RSF possuía sua sazonalidade. Naquela época, as maiores vazão eram registradas nos meses de Dezembro a Maio, destacando-se os meses de Fevereiro/Março/Abril que geralmente apresentavam o ápice da descarga, os meses de Junho a Novembro apresentam vazões geralmente semelhantes e próximas de  $2000\text{m}^3/\text{s}$ . Nota-se também que o período de persistência da vazão média mensal acima de  $4000\text{m}^3/\text{s}$  prolongava-se por pelo menos três meses.

Após o ano de 1986, a vazão perdeu a sazonalidade e permaneceu próxima de  $2000\text{m}^3/\text{s}$ , data essa coincidente com o início de operação da hidroelétrica instalada no reservatório de Itaparica (Tabela 5.3). Durante os anos de 1990 a 1993 houve uma retomada da sazonalidade da descarga fluvial, porém no ano de 1994 a vazão volta ao patamar regularizado de  $\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$ , justamente quando o reservatório de Xingó iniciou sua operação (Tabela 5.3).

De maneira geral, os reservatórios atuam como reguladores da vazão, fazendo com que a região a jusante receba um pique de cheia menor. Em outubro de 1955 (período de baixa vazão: junho a novembro, Figuras 5.6-a,b), o RSF registrou a menor vazão média mensal jamais lida,  $\sim 600\text{m}^3/\text{s}$ ; argumenta-se que se ocorrer uma estiagem semelhante a de 1955, a vazão mínima garantida do rio de  $\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$  será mantida em função das barragens (CHESF, 2008); analisando a série histórica da vazão média mensal, parece que a vazão mínima de  $\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$  tem sido garantida, exceto durante a estiagem de 2001, quando houve uma queda abaixo desse valor mínimo (Figuras 5.6-a,b).

Outro fator potencializado pelos reservatórios é a perda de água por evaporação, o fenômeno é mais acentuado no setor Baixo-Médio da bacia do RSF. Somente no reservatório de Sobradinho, em razão de sua elevada relação área\_superficial/profundidade\_média, estima-se uma evaporação da ordem  $240\text{m}^3/\text{s}$  (ANA, 2008).

Vazões médias mensais próximas a  $8000\text{m}^3/\text{s}$  nas estações de verão e outono (dezembro a maio) eram eventos freqüentes que marcavam a sazonalidade natural do RSF durante o período de 1940 a 1986. Após esse período, vazões médias mensais próximas a  $4000\text{m}^3/\text{s}$  são associadas a condições atípicas para o regime da vazão regularizada que vigora atualmente. Os anos de 1946, 1949, 1979, 1992, 2004 e 2007 apresentam, nas estações de verão e/ou outono, vazões médias mensais bastante discrepantes, em termos relativos, das vazões observadas nos anos imediatamente antecedentes ou precedentes aos respectivos eventos considerados. Particularmente, os eventos extremos que ocorreram durante o verão e/ou outono de 1979, 1992, 2004 e 2007 coincidem com a fase de transição mais acentuada do regime de descarga fluvial.

As Figuras 5.7-a,b,c,d apresentam a vazão diária do RSF na estação do município de Propriá (80 km da foz do rio) durante esses anos. Os anos de 1979 e 1992 apresentam maior persistência de altas vazões (atingindo  $14000\text{m}^3/\text{s}$  e  $10000\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente) durante as estações de verão e/ou outono. No ano de 2004, os maiores valores de vazão ocorreram no final de Janeiro, prolongando até meados de Fevereiro (chegando a  $9000\text{m}^3/\text{s}$  em Fevereiro; pouca persistência, porém intensa), com mais uma elevação no final de Abril e primeira quinzena de Maio; em 2007 houve maior persistência da vazão, praticamente todo o mês de Fevereiro e Março, com valores da ordem de  $6000\text{m}^3/\text{s}$ .



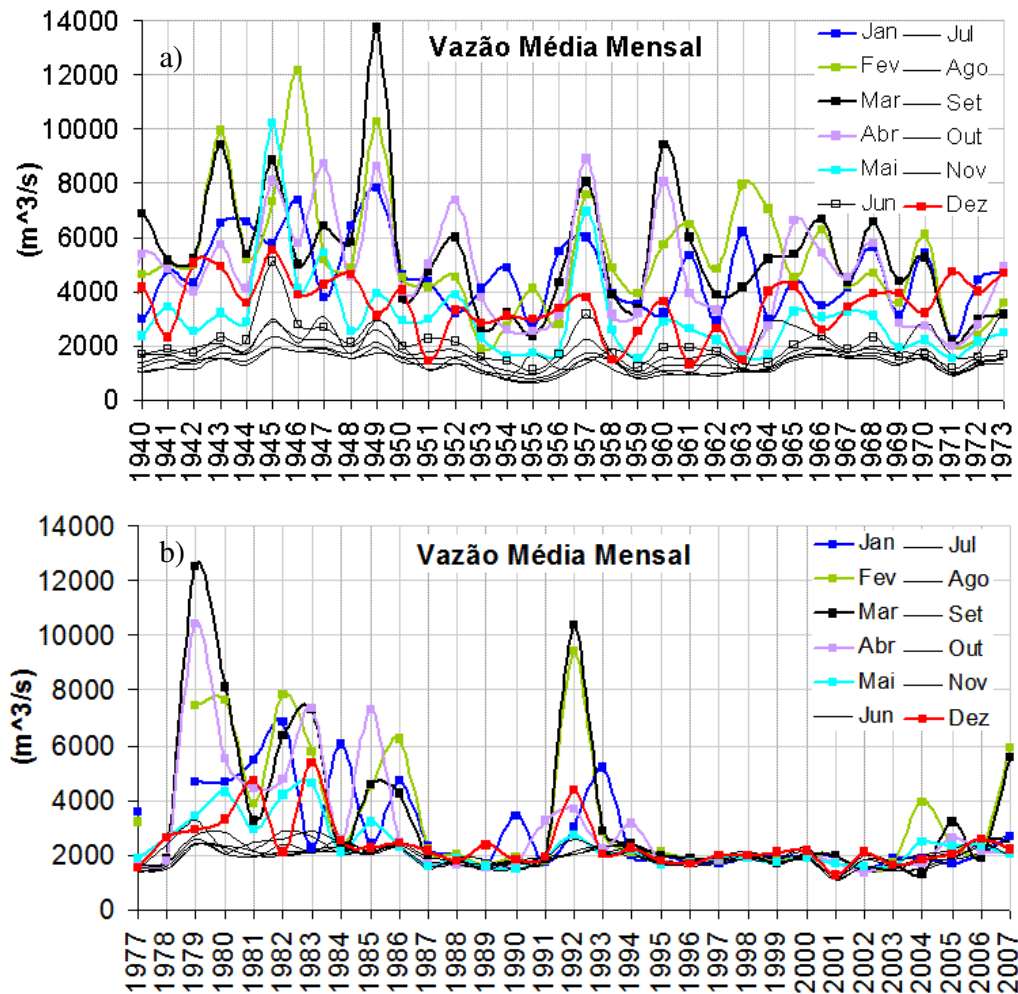


Figura 5.6 – Vazão média mensal do rio São Francisco: a) 1940 a 1973; b) 1977 a 2007. Estação de Propriá: 49705000, 80 km da foz do rio (Fonte: ANA, 2008).

Tabela 5.3 – Principais barragens localizadas no rio São Francisco. Ano de funcionamento e capacidade de armazenamento (Fonte: CHESF, 2008).

Hidroelétricas	Ano de Funcionamento	Capacidade de armazenamento de água (km <sup>3</sup> )	Localização na Bacia
Três Marias	1952	21	Alto curso
Sobradinho	1980	34	Sub-médio
Paulo Afonso I- BSF	1955	0.12	Baixo curso
Paulo Afonso II A - BSF	1965		
Paulo Afonso II B –BSF	1968		
Paulo Afonso III – BSF	1972		
Paulo Afonso IV- BSF	1980		
Apolônio Sales (Moxotó)	1977	1.2	Baixo curso
Itaparica	1988	10.8	Baixo curso
Xingó	1994	3.8	Baixo curso

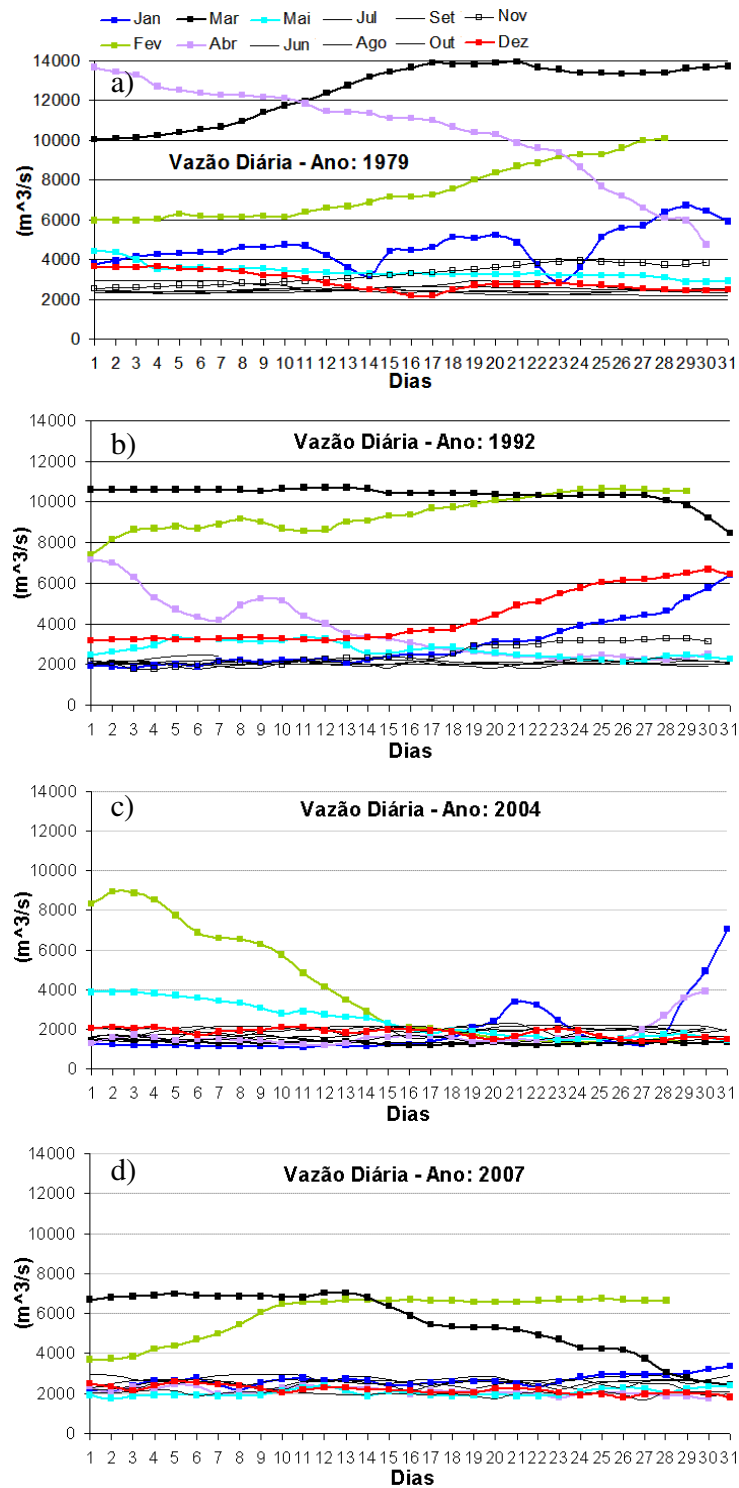


Figura 5.7 – Vazão diária do rio São Francisco durante os períodos de eventos extremos: a) ano de 1979; b) ano de 1992; c) ano de 2004; d) ano de 2007. Estação de Propriá: 80 km da foz do rio (Fonte: ANA, 2008).

### 5.2.2 Eventos Extremos Ocorridos Durante os anos de 1979, 2004 e 2007

Para visualizar as plumas do RSF durante os eventos extremos de 1979, 2004 e 2007 imagens Landsat-MSS, CBERS-2 e MODIS foram processadas de acordo com a disponibilidade destas e o evento considerado. Não foi encontrada imagem que mostrasse a cheia de 1992. As Figuras 5.8-a,b (imagens Landsat3, sensor MSS, composição bandas 1, 2 e 3) mostram duas situações que caracterizavam a dinâmica do RSF durante o período em que o rio possui seu ciclo sazonal unimodal de aporte fluvial, ou seja, antes das construções das barragens.

Na primeira, Figura 5.8-a, a imagem Landsat do dia 26/03/1979 mostra a pluma do RSF durante o evento de extrema vazão registrado nesse ano (próxima de  $14000\text{m}^3/\text{s}$ , Figura 5.7-a). Apesar da carga de TSS não ter sido estimada para o caso das imagens Landsat3, pelo aspecto visual da cena, é possível notar uma carga significativa de material em suspensão, assim como as transgressões fluviais conseqüentes do aumento da vazão ( $\sim 14000\text{m}^3/\text{s}$ ) e uma pluma que alcança, possivelmente, além dos 100 km de extensão, na plataforma continental, ultrapassando a isóbata de 200m (infelizmente a cena Landsat não cobriu toda a extensão da pluma). As transgressões fluviais, com maior ou menor intensidade, eram freqüentes antes do represamento das águas do RSF e durante os meses de maior descarga fluvial. Essas transgressões incorporavam, das margens inundadas, um excedente de matéria orgânica e inorgânica, quer particulada, quer dissolvida, que posteriormente eram transportadas pelo fluxo fluvial assim que a cheia entrasse em sua fase de regressão.

Na segunda situação, Figura 5.8-b, a imagem Landsat do dia 01/10/1979 mostra o RSF em sua fase de baixa vazão (próxima a  $2000\text{m}^3/\text{s}$ , Figura 5.7-a) e uma pluma costeira pouco expressiva, situação essa bastante próxima das condições tamponadas hoje observadas na foz do RSF devido à regularização da vazão pelas barragens.

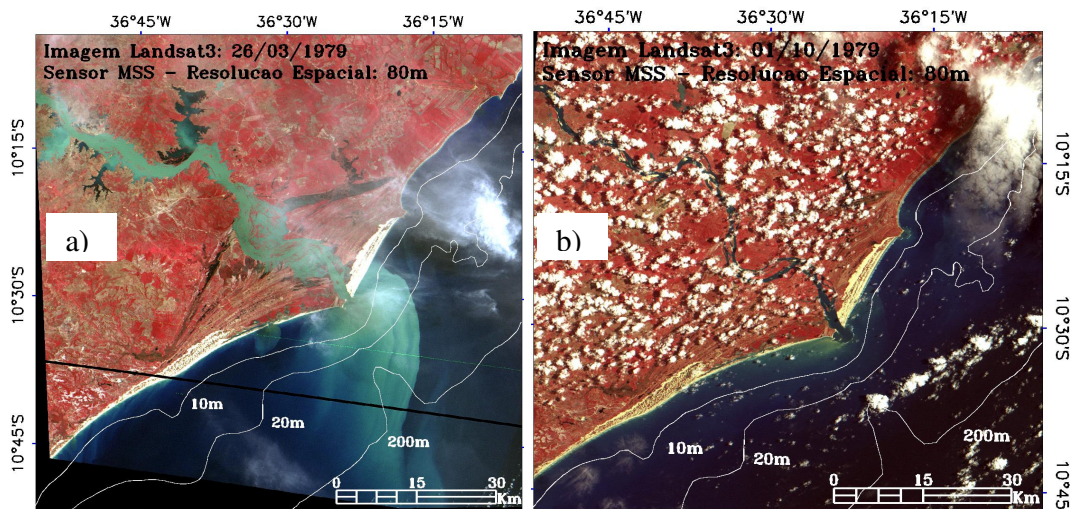


Figura 5.8 – Imagens Landsat 3 mostrando um trecho do rio São Francisco e a pluma na região da foz: a) 26/03/1979; b) 01/10/1979. Composição bandas 1, 2 e 3 do sensor MSS. Área branca sobre o oceano=nuvens.

Objetivando comparar o ciclo de TSS conduzido pelo evento extremo de 2004, imagens CBERS-2 foram processadas para estimar a carga de TSS. As estimativas de TSS derivadas das imagens CBERS-2 foram então comparadas com as estimativas de TSS derivadas das imagens MODIS com intuito de se aferir as estimativas.

As Figuras 5.9-a,b mostram a carga de TSS estimada a partir da imagem MODIS e CBERS-2 para o dia 08/Maio/2004. Uma concordância muito boa é observado entre as estimativas. As Figuras 5.9-c,d mostram a carga de TSS estimada a partir da imagem MODIS e CBERS-2 para o dia 26/Fev/2004 e 20/Fev/2004, respectivamente. Também aqui observa-se uma concordância muito boa, a carga de TSS ligeiramente mais acentuada apresentada pela imagem CBERS-2 do dia 20/Fev/2004 é devido à maior proximidade da ocorrência do evento extremo, cujo ápice foi durante os dias 2 e 3 de Fevereiro de 2004, conforme Figura 5.7-c. De certa maneira, essa comparação contribui para validar ambos os métodos utilizados para se estimar o TSS, já que as imagens CBERS-2 foram calibradas com dados de TSS coletados *in situ*.

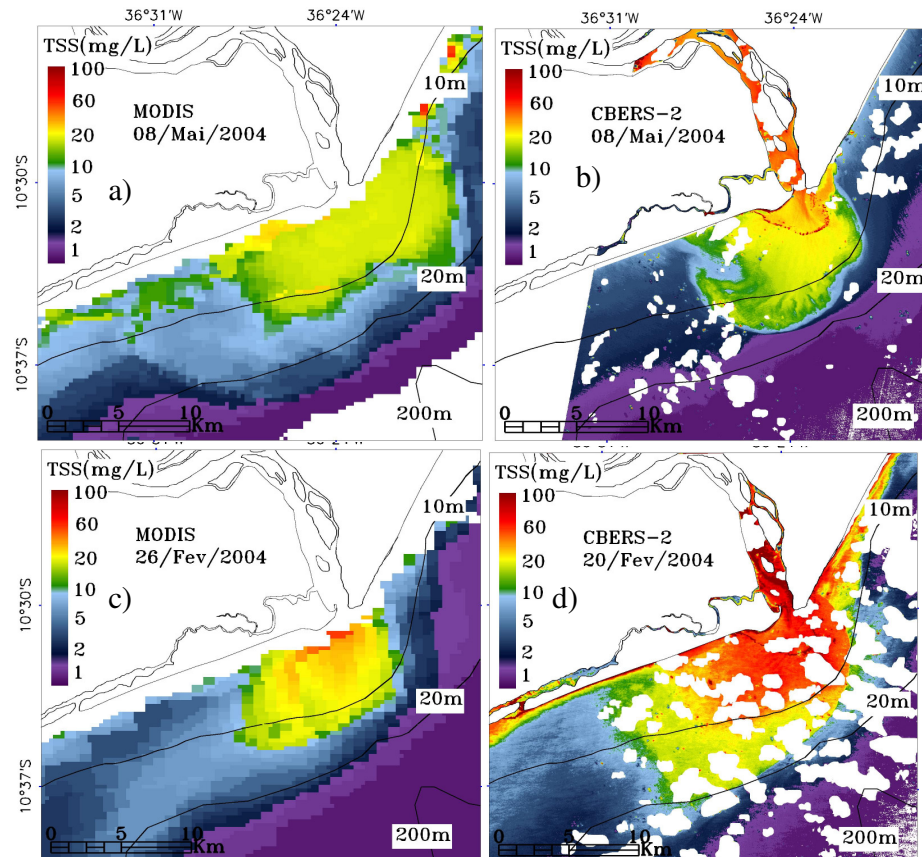


Figura 5.9 – Carga de TSS estimada a partir das imagens CBERS-2 e MODIS. TSS estimado a partir da: a) imagem MODIS, 08/Maio/2004; b) imagem CBERS-2, 08/Maio/2004; c) imagem MODIS, 26/Fev/2004; d) imagem CBERS-2, 20/Fev/2004. Área branca sobre o oceano=nuvem.

Coletas (amostras de água) realizadas na ponte de Propriá, 80 km da foz do RSF, durante o ano de 2004, revelam concentrações elevadas de TSS transportada pelo rio nos dias 18/Janeiro e 13/Fevereiro, 250mg/L e 500mg/L, respectivamente, decaindo para valores próximos de 5mg/L em 25/Setembro, conforme Figura 5.10. A pluma e as frentes geradas por essa carga de TSS transportada pelo rio podem ser observadas por meio das Figuras 5.11-a,b,c,d,e,f.

A Figura 5.11-a mostra a estimativa de TSS referente ao dia 25/Jan/2004, com valores de TSS superiores a 300mg/L na região do pro-delta (Figura 5.11-b); representa a fase inicial do evento extremo, quando as chuvas começaram a cair sobre toda a bacia de drenagem. A Figura 5.7-c apresenta a descarga fluvial dos dias precedentes ao dia 25/Janeiro/2004, observa-se um pico de vazão durante os dias 21 e 22 de Janeiro, da ordem de  $4000\text{m}^3/\text{s}$ ; essa lavagem inicial carregou para o leito do rio quantidades expressivas de TSS. No final de Janeiro e início de

Fevereiro/2004 a vazão atingiu seu valor máximo ( $\sim 9000\text{m}^3/\text{s}$ ), Figura 5.7-c, fazendo com que o RSF transportasse uma carga de TSS da ordem de  $500\text{mg/L}$  (Figura 5.10, dia 13/Fev/2004). Após esse pico, o fluxo fluvial voltou a regredir, assim como a carga de TSS. A Figura 5.11-c mostra a concentração de TSS durante o dia 20/Fev/2004, quando a vazão já estava próxima de  $2000\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 5.7-c); a pluma do RSF não possui concentrações tão elevadas de TSS como as de Janeiro e início de Fevereiro, porém ainda é significativa e apresenta um padrão de dispersão mais difuso do que a imagem de Janeiro.

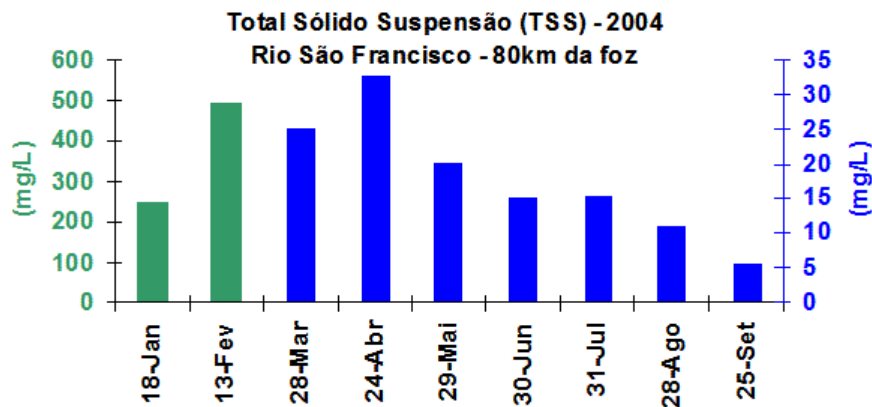


Figura 5.10 – Concentrações de TSS coletadas no RSF, próximo a cidade de Propriá (80 km da foz), durante o ano de 2004.

Em 08/Maio/2004 (Figura 5.11-d), a pluma do RSF possui frentes bem definidas e valores de TSS próximos a  $20\text{mg/L}$ , alimentada pela descarga fluvial que transportava concentrações de TSS da ordem de  $35\text{mg/L}$  (Figura 5.10). Em 03/Jun/2004 (Figura 5.11-e) o RSF apresenta concentrações de TSS próximas a  $15\text{mg/L}$ , ainda acima do seu valor médio usual de  $5\text{mg/L}$  (MEDEIROS, 2003). A Figura 5.11-f finaliza a seqüência de imagens mostrando o caso típico da pluma do RSF, onde o cordão arenoso que circunda a região externa do pró-delta do RSF alimenta a pluma do RSF devido à ressuspensão costeira, ressuspensão esta ocasionada pelos ventos e pelo regime de ondas. A grande quantidade de matéria depositada nessa região externa do pro-delta durante o período de cheia é agora ressuspensa e mantém uma pluma bastante expressiva, com carga de TSS da ordem de  $30\text{mg/L}$ .



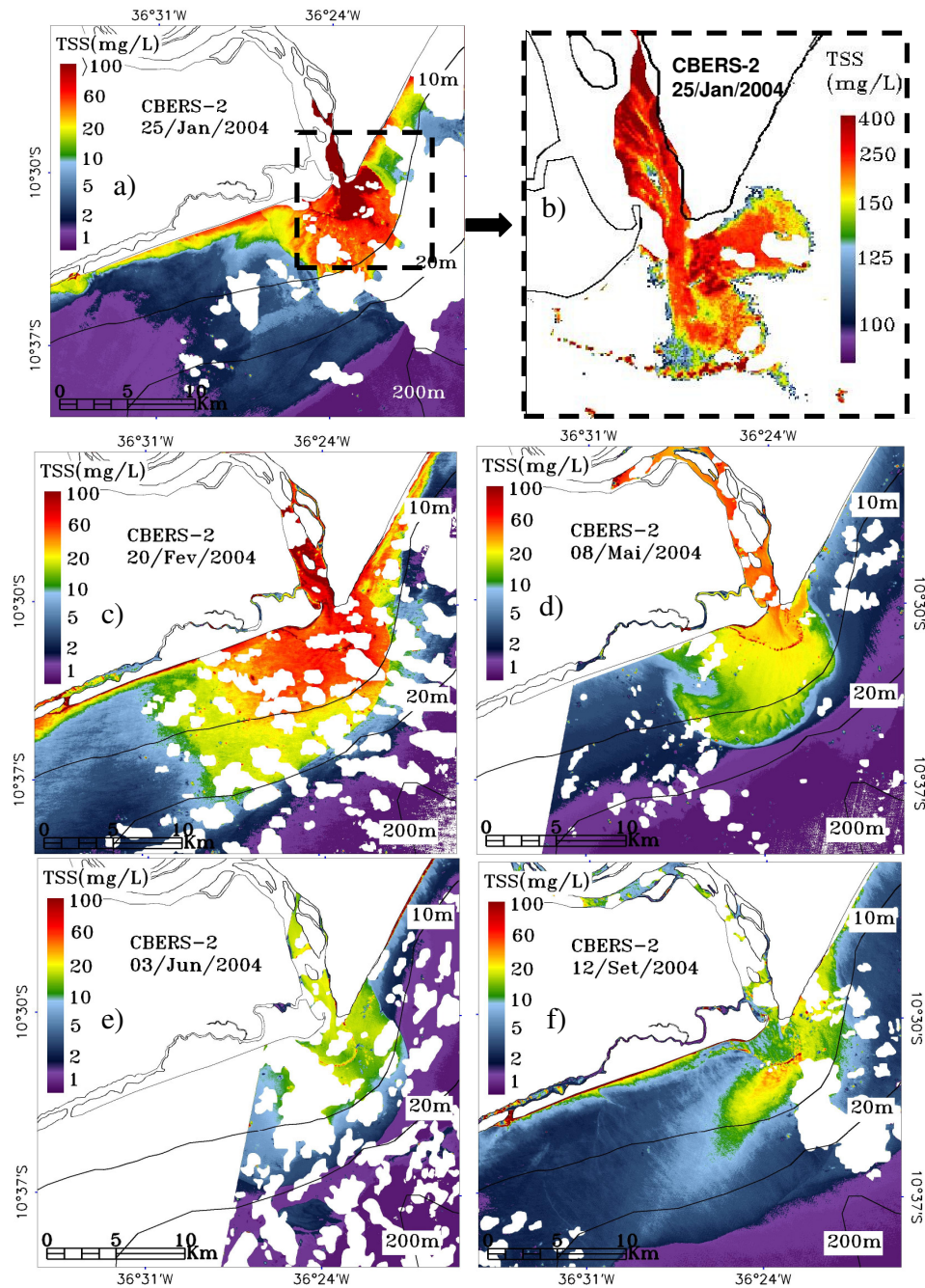


Figura 5.11 – Variação da carga de TSS estimada a partir das imagens CBERS-2 evidenciando o período de extrema vazão registrado em 2004. a) 25/Jan/2004 ; b) Zoom da região do pró-delta do RSF, 25/Jan/2004, barra de escala vai de 100 a 400mg/L; c) 20/Fev/2004; d) 08/Maio/2004; e) 03/Jun/2004; f) 12/Set/2004. Área branca sobre o oceano=nuvens.

A enchente que ocorreu no RSF em 2007, apesar do volume significativo de água, mais de  $6000\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 5.7-d), e da persistência, não gerou plumas de turbidez tão expressivas como as plumas de 2004. Concentrações mensais de TSS foram coletadas no RSF durante todos os meses de 2007 (município de Propriá), e permaneceram abaixo das  $25\text{mg}/\text{L}$ , sendo que o mês de Fevereiro/2007 apresentou o maior valor, da ordem de  $24\text{mg}/\text{L}$ .

As Figuras 5.12-a,b,c,d apresentam as estimativas das concentrações de TSS durante o período mais intenso do regime fluviométrico. A Figura 5.12-a representa uma pluma de turbidez com concentrações de TSS da ordem de  $20\text{mg}/\text{L}$  e quase alcançando a isóbata de 200m; nesse dia, 25/Fev/2007, a vazão do RSF atingiu seu valor máximo ( $6500\text{m}^3/\text{s}$ ), permanecendo próximo desse valor até 14/Março/2007 (Figura 5.7-d). A estimativa de TSS do dia 06/Mar/2007, Figura 5.12-b, evidencia uma pluma dispersa, com cargas de TSS próximas de  $20\text{mg}/\text{L}$ , cobrindo uma área vasta devido à persistência da alta vazão que permaneceu próxima a  $6000\text{m}^3/\text{s}$  por quase um mês. A estimativa de TSS do dia 31/Março/2007, Figura 5.12-c, evidencia o momento de regressão da pluma, com concentrações de TSS da ordem de  $20\text{mg}/\text{L}$ , nessa fase, a vazão do RSF estava se aproximando do seu valor regularizado de  $2000\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 5.7-d). Na Figura 5.12-d, estimativa de TSS do dia 09/Abril/2007, a pluma está confinada à costa e concentrações também da ordem de  $20\text{mg}/\text{L}$  na região próxima à foz do rio. A partir dessa data as concentrações de TSS do RSF permanecem próximas a  $5\text{mg}/\text{L}$  e sua pluma restrita à zona litorânea e alimentada pela ressuspensão costeira com valores de TSS inferiores a  $10\text{mg}/\text{L}$ .



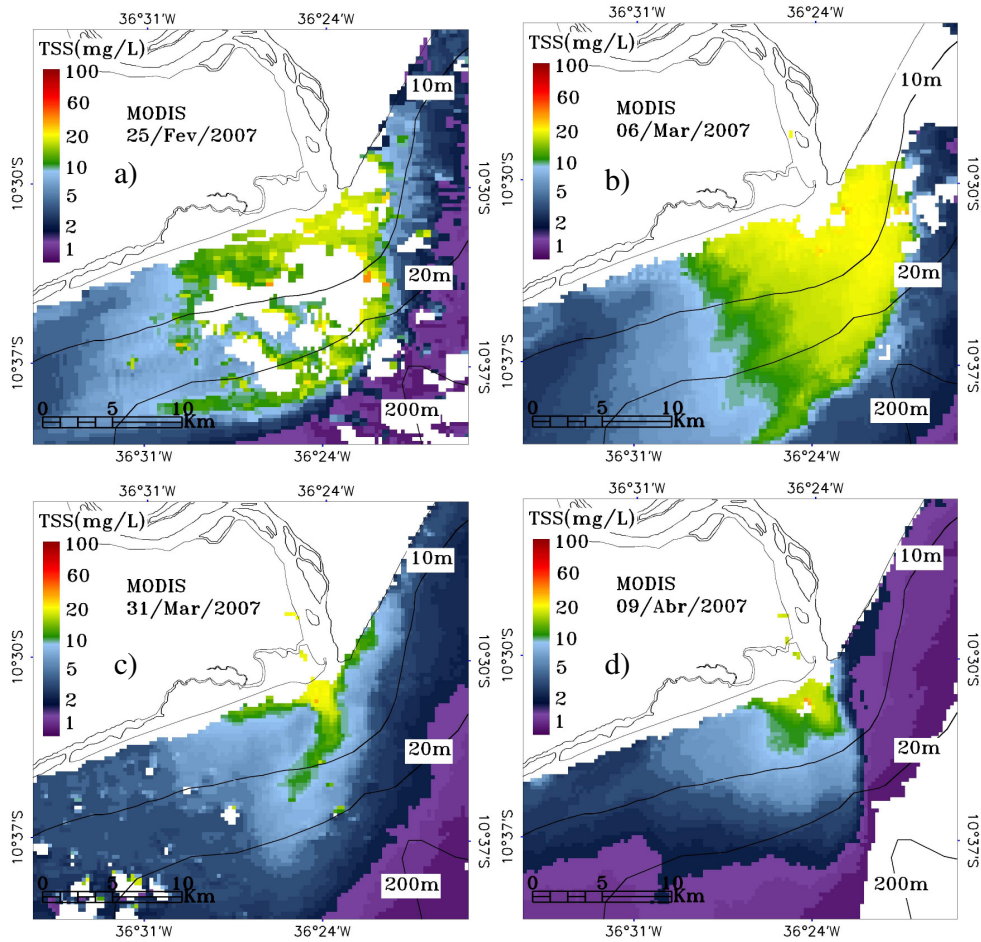


Figura 5.12 – Variação da carga de TSS estimada a partir das imagens MODIS evidenciando o período de extrema vazão registrado em 2007. a) 25/Fev/2007; b) 06/Mar/2007; c) 31/Mar/2007; d) 09/Abr/2007. Área branca sobre o oceano=nuvens.

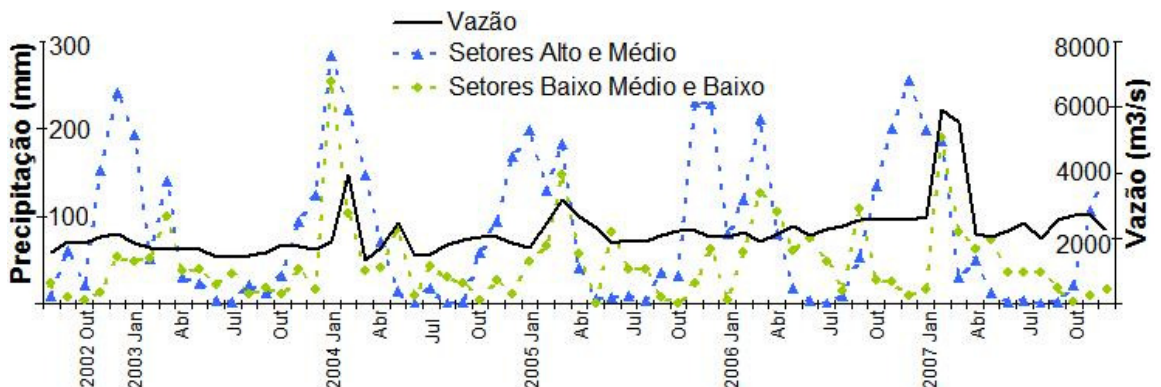


Figura 5.13 – Precipitação na bacia drenagem e vazão do RSF (Fonte: ANA, 2008).

### 5.3 SÉRIE TEMPORAL E ESPACIAL DA PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO

O alcance da presente análise vai além das estimativas de TSS, buscamos aqui estimar as propriedades ópticas inerentes do meio marinho por meio das imagens MODIS e do algoritmo QAA. Os coeficientes de absorção do sedimento/detrimento, CDOM e do fitoplâncton estimados a partir da série temporal de imagens MODIS permitem diagnosticar as variabilidades dos principais constituintes opticamente ativos (fitoplâncton, CDOM e material inorgânico em suspensão) ao longo do período proposto, assim como verificar a dinâmica biogeoquímica da pluma do RSF e das águas costeiras adjacentes em função dessas variações.

Dentro do possível, os dados derivados dos sensores orbitais e utilizados na presente análise foram comparados com dados coletados *in situ*, reforçando a qualidade das estimativas. Num primeiro momento serão expostas essas aferições, em seguida, os impactos da bifurcação da CSE sobre a dinâmica da pluma do RSF, e, como objetivo final, os diagramas Hovmoller das Propriedades Ópticas Inerentes e a Classificação das Massas d'Água concluem o desfecho do presente capítulo.

Para análise da série temporal durante o período de Agosto/2002 a Dezembro/2007, os dados pluviométricos da bacia do RSF e da vazão foram obtidos junto a Agência Nacional de Águas (<http://www.ana.gov.br/>). A vazão é referente à estação fluviométrica do Município de Propriá, localizada a 80 km da foz do RSF. Os dados de vento procedem do *Remote Sensing Systems* (<http://www.remss.com>), derivados do sensor SeaWinds a bordo do satélite QuickScatt ([http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA\\_CATALOG/quikscatinfo.html](http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/quikscatinfo.html)).

#### 5.3.1 Aferições

##### 5.3.1.1 Campo de Vento Estimado por Satélite

As Figuras 5.14-a,b apresentam os valores da velocidade média do vento e direção média do vento, respectivamente, derivados do satélite Quikscat durante o mês de Outubro/2006. Para a região na foz do rio São Francisco o valor médio do vento derivado do satélite Quikscat é de 7,2m/s com direção 260 graus, resultando num campo de vento de leste com uma leve tendência à nordeste. A Figura 5.15 mostra os valores da velocidade do vento coletados *in situ* durante a campanha de campo de Outubro/2006. É interessante observar que há

uma variabilidade significativa da intensidade do vento no decorrer do dia. O valor médio dos dados coletados *in situ* foi de 5,87m/s e direção predominantemente de Leste.

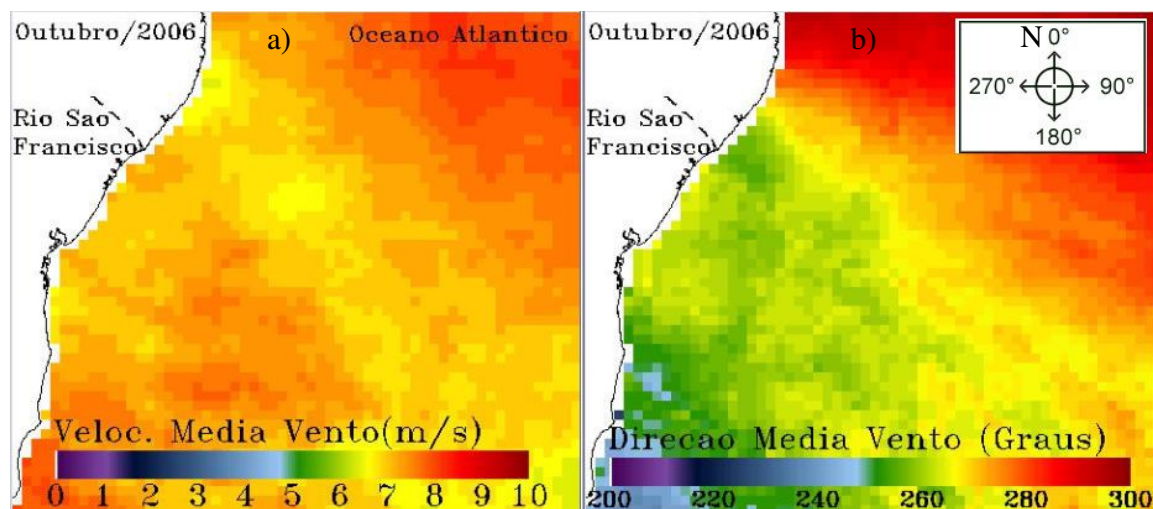


Figura 5.14 – Média do vento em Outubro/2006; a) velocidade do vento; b) direção do vento. Dados do satélite Quikscat (Fonte: <http://www.remss.com>).

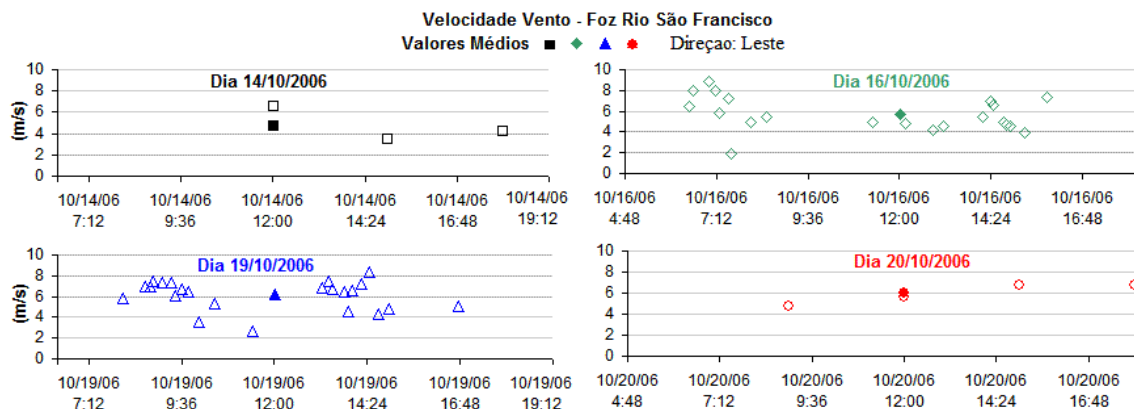


Figura 5.15 – Velocidade do vento na foz do Rio São Francisco. Medidas realizadas *in situ* em Outubro/2006. A direção do vento durante o período de coleta foi predominantemente de Leste.

Em relação à direção, ambas as médias (coletadas pelo satélite QuickScat e *in situ*) possuem praticamente a mesma direção. Porém, vemos que o módulo da velocidade média do vento obtida por meio do satélite Quikscat está um pouco acima da média coletada *in situ*, entretanto há de se considerar que o vento sobre a pista oceânica tende a ter maior intensidade do que o medido na região costeira, devido à própria interferência continental que exerce uma barreira física sobre o campo de vento advindo das regiões oceânicas. De maneira geral, pode-se

dizer que há uma boa concordância entre os dados de vento obtidos remotamente e os coletados em campo. Os dados de vento do satélite Quikscat serão utilizados posteriormente na análise temporal e espacial das propriedades ópticas estimadas a partir das imagens MODIS.

### 5.3.1.2 Correção Atmosférica das Imagens MODIS

O processamento das imagens MODIS requer uma acuidade no processo de correção atmosférica para eliminar ou pelo menos minimizar as contribuições atmosféricas sobre a reflectância de sensoriamento remoto. Para verificar a correção atmosférica efetuada pelo algoritmo de correção atmosférica presente no programa APS (detalhes do algoritmo de correção atmosférica podem ser obtidos em LADNER et al., 2007), medidas radiométricas foram coletadas *in situ*, em seguida convertidas para reflectância de sensoriamento remoto,  $R_{rs}$ , e integradas para simular as bandas do sensor MODIS, possibilitando, dessa forma, a comparação entre a  $R_{rs}$  coleta *in situ* e a  $R_{rs}$  coletada pelo sensor MODIS. As datas de coletas *in situ* compreendem os meses de Out/2006 e Abr/2008. O período de Abr/2008, embora não faça parte da análise da série temporal das imagens MODIS, representou mais uma oportunidade para coletar medidas radiométricas *in situ*, com isso, verificar a acurácia do procedimento de correção atmosférica para uma estação do ano diferente da coleta de Out/2006, pressupondo uma certa diferença das condições atmosféricas entre as estações do ano.

A Figura 5.16 apresenta os valores de  $R_{rs}$  coletados *in situ* (linhas contínuas) e derivados das imagens MODIS (linhas tracejadas). Os comprimentos de onda aqui considerados compreendem o intervalo de 400 a 650 nm — região de interesse para as estimativas das propriedades ópticas inerentes utilizando o algoritmo QAA. As coletas *in situ* realizadas durante os dias 13 e 20 de Outubro/2006 possuem imagens MODIS concomitante aos respectivos períodos de coleta. As coletas realizadas em 24 e 26 de Abril/2008 foram comparadas com uma imagem MODIS adquirida no dia 25/04/2008. Analisando os formatos das curvas de  $R_{rs}$ , é possível observar uma grande correspondência entre as reflectâncias adquiridas *in situ* e as estimadas a partir das imagens MODIS. As curvas de reflectância dos dias 13 e 20/Out/2006 mostram que os valores de  $R_{rs}$  adquiridos no dia 20 possuem uma maior similaridade entre os dados orbitais (MODIS) e os coletados *in situ*, provavelmente devido às melhores condições meteorológicas apresentadas no dia 20, com praticamente nenhuma cobertura de nuvem.

As coletas realizadas *in situ* durante os dias 24 e 26 de Abril/2008 foram comparadas com uma imagem do dia 25 de Abril/2008 por não haver imagens no dia 24 e 26, isentas de nuvens, que cobrissem a área de coleta; sabemos que esta não é a melhor condição, entretanto, a comparação evidencia padrões bastante semelhantes entre as curvas das medidas radiométricas coletadas *in situ* e as obtidas pelo sensor MODIS.

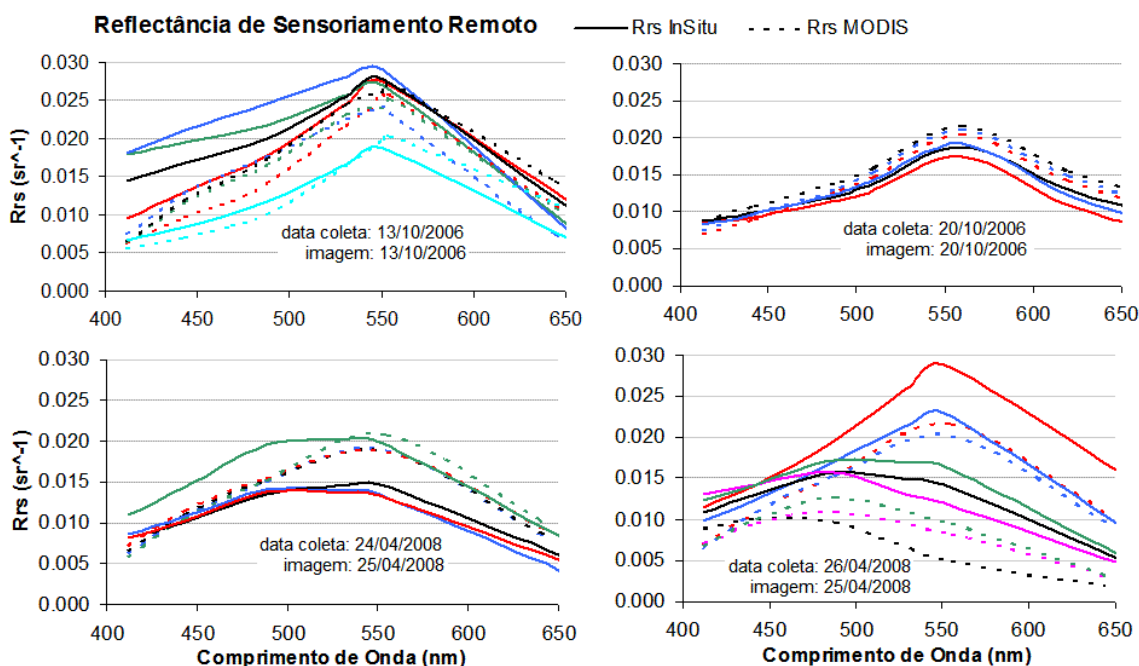


Figura 5.16 – Comparação dos valores de reflectância de sensoriamento remoto coletados *in situ* e derivados das imagens MODIS.

Pela análise das curvas, não é possível afirmar se há uma superestimação ou subestimação dos valores de reflectância ao longo de todo o espectro considerado devido à correção atmosférica das imagens MODIS, pois os espectros de reflectância do sensor MODIS oscilam entre valores subestimados, como é o caso das reflectâncias do dia 13/10/2006, e superestimado, como é o caso observado no dia 20/10/2006. Entretanto, e de maneira geral, para os comprimentos de onda de 400 a 430nm parece haver uma subestimação dos valores de  $R_{rs}$  derivado das imagens MODIS. Os valores de  $R_{rs}$  coletados *in situ* e obtidos a partir das imagens MODIS apresentam uma alta correspondência, principalmente a coleta realizada no dia 20/10/2006, onde as condições meteorológicas favoráveis permitiram uma comparação mais robusta.

Devemos também observar que: a) as medidas radiométricas *in situ* são pontuais, enquanto o sensor MODIS integra a radiância proveniente de uma área de aproximadamente de  $0.09\text{km}^2$ ; b) a aquisição da informação radiométrica por plataformas orbitais é obtida num intervalo de tempo relativamente curto, de alguns minutos, ou seja, é uma “fotografia” quase que instantânea das condições estabelecidas na superfície da água, enquanto as medidas radiométricas coletadas *in situ* são adquiridas em intervalos temporais bem mais flexíveis, permitindo que uma dada assinatura espectral seja significativamente diferente quando coletada num mesmo ponto geográfico, porém, em horários diferentes (deriva das feições oceânicas superficiais).

### 5.3.1.3 Aferições do Algoritmo de TSS

O total de sólido em suspensão coletado *in situ* (amostras de água filtradas em filtros GF/F  $0.7\ \mu\text{m}$ ) foi comparado com o total de sólido em suspensão estimado por meio do algoritmo de TSS expresso pela Equação 4.8 [ $TSS=1.42354 * b_p(555)$ ]. Os pontos de coleta podem ser visualizados na Figura 4.1. O coeficiente de espalhamento do material particulado em suspensão [ $b_p(555)$ ], necessário para a estimativa do TSS, foi derivado da  $R_{rs}$  coletadas *in situ* (coletadas concomitantes às amostras de água) usando o algoritmo QAA. A Figura 5.17 apresenta os valores do TSS estimados a partir das  $R_{rs}$  coletadas *in situ*, e os valores do TSS obtidos por meio das filtrações de amostras de água. Uma significativa relação foi observada, com  $R^2=0.7671$  (numero amostral=27).

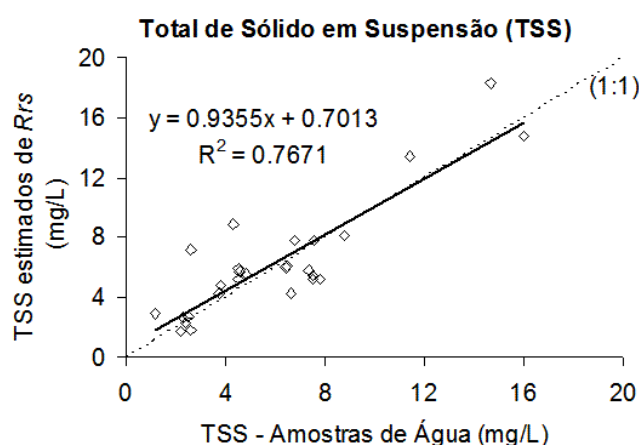


Figura 5.17 – TSS obtidos por meio de filtrações de amostras de água (eixo X) versus TSS estimado pelo algoritmo de TSS (eixo Y).

#### 5.3.1.4 Derivação do Coeficiente de Absorção do Fitoplâncton a Partir da $R_{rs}$ Coletada *In Situ*

O espectro do coeficiente de absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(\lambda)$ , foi derivado da reflectância de sensoriamento remoto,  $R_{rs}$ , coletada *in situ* (Figura 4.8) na região do estuário interno e externo do RSF. Apenas as  $R_{rs}$  coletadas em condições favoráveis (intervalo do dia entre 10:00hs e 15:00hs; céu com baixa cobertura de nuvens) foram selecionadas. O algoritmo QAA foi utilizado para estimar o coeficiente de absorção para o comprimento de onda 443nm [ $a_{ph}(443)$ ]. Em seguida, a relação empírica proposta por LEE et al. (1998), Equação 5.1, foi utilizada para construir o espectro a absorção para o intervalo:  $400 \leq \lambda \leq 750$ nm.

$$a_{ph}(\lambda) = \{ (a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \ln[a_{ph}(443)]) \} a_{ph}(443) \quad (5.1)$$

Os valores de  $a_0$  e  $a_1$  estão tabelados na última publicação acima citada. Para  $\lambda = 443$ nm:  $a_0(443) = 1$  e  $a_1(443) = 0$ .

Os valores de  $a_{ph}(443)$  variaram de 0,025 a 0,162 para concentrações de clorofila-a variando de 0,20 a 4,90  $\mu\text{g/L}$ . LEE e CARDER (2004b), em estudos realizados na região *Baja California* (25°N), costa oeste dos Estados Unidos da América, verificaram  $a_{ph}(443)$  da ordem de 0,013 a 0,24  $\text{m}^{-1}$  para concentrações de clorofila-a variando entre 0,16 e 11,3  $\mu\text{g/L}$ .

Para facilitar a visualização, os espectros de absorção relativos às concentrações de clorofila-a menores do que 1  $\mu\text{g/L}$  foram dispostos na Figura 5.18-a; a Figura 5.18-b apresenta os espectros para concentrações superiores a 1  $\mu\text{g/L}$ . Na Figura 5.18-a, baixas concentrações de clorofila-a (0,20; 0,32; 0,46  $\mu\text{g/L}$ ) apresentaram curva espectral de absorção bastante expressiva, provavelmente devido a erros que eventualmente podem interferir na coleta dos dados radiométricos — ondas capilares, por exemplo, podem favorecer a reflexão especular da luz incidente no momento da coleta radiométrica —, ou mesmo, erros associados à metodologia de extração e quantificação da clorofila-a. Para as concentrações de clorofila-a acima de 1  $\mu\text{g/L}$ , as respectivas curvas espectrais de absorção apresentam melhor concordância com as variações das concentrações de clorofila-a (Figura 5.18-b).



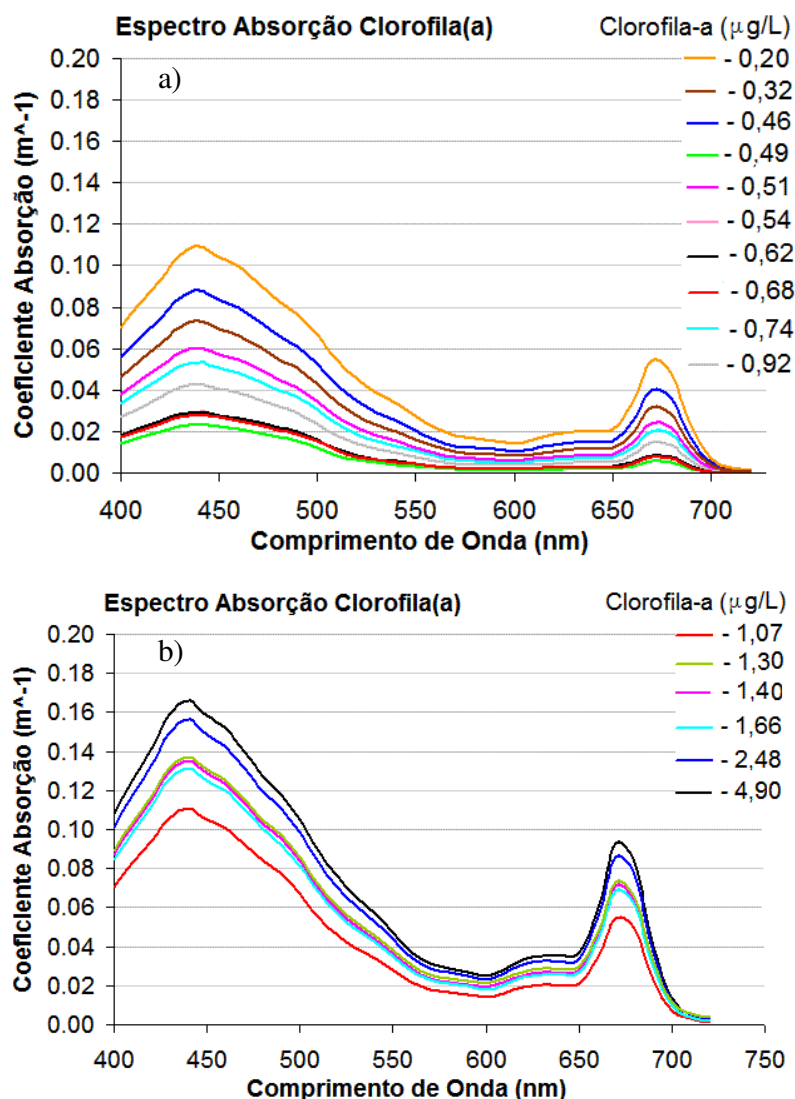


Figura 5.18 – Espectro do coeficiente de absorção do fitoplâncton estimado a partir das  $R_{rs}$  coletadas na foz do rio São Francisco durante os períodos: Out/2006 e Abr/2008.

Devido às dificuldades de aquisição das medidas radiométricas *in situ* (condições meteorológicas desfavoráveis; disponibilidade restrita de equipamento para efetuar as coletas radiométricas; limitações logísticas relacionadas às campanhas oceanográficas), o conjunto de pontos amostrados foi insuficiente para uma análise estatística que resultasse em uma relação empírica entre o coeficiente de absorção fitoplantônico e a concentração de clorofila-a para a região da foz do RSF. Entretanto, as figuras 5.18-a,b sugerem que  $a_{ph}(443) < 0.08\text{m}^{-1}$  está relacionado a concentrações de clorofila-a menores de  $1 \mu\text{g/L}$ , enquanto que  $a_{ph}(443) > 0.08\text{m}^{-1}$  implica concentrações de clorofila-a superiores a  $1 \mu\text{g/L}$ . Ressaltamos que a presente análise



busca identificar se as variações dos coeficientes de absorção fitoplanctônico estimados por meio das imagens MODIS e do algoritmo QAA correspondem às variações das respectivas concentrações de clorofila-a constatadas *in situ*. Pelo exposto acima, uma relação bastante satisfatória entre essas variações é observada. Não temos a pretensão de estimar as concentrações de clorofila-a por sensoriamento remoto nesse momento, mas sim observar suas alternâncias por meio de um indicador, no caso, o coeficiente  $a_{ph}(443)$ .

Embora as variações das concentrações de clorofila-a amostradas aqui estejam dentro de um intervalo relativamente restrito (de 0,20 a 4,90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ele é bastante razoável em relação à dinâmica fitoplanctônica da foz do RSF. Campanhas realizadas ao longo do gradiente estuarino (porção interna e externa) do RSF durante os anos de 2000, 2001 e 2002, constataram concentrações de clorofila-a entre 0,2 e 5,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mantendo-se na maioria das vezes abaixo de 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sinal da baixa biomassa fitoplanctônica e condições oligotróficas da região (MEDEIROS, 2003).

#### 5.3.1.5 Aferição das Estimativas Derivadas das Imagens MODIS

Das coletas oceanográficas realizadas em campo, a do dia 13/10/2006 possui imagem MODIS concomitante. A coleta do dia 20/10/2006 também possui imagem MODIS, porém, não há dados referentes às concentrações de TSS e fitoplâncton, apenas dados radiométricos — problemas com o manuseio das amostras de água comprometeram a análise.

Aproveitando a coleta do dia 13/10/2006, valores das concentrações de TSS e do coeficiente de absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(443)$ , (Figura 5.19-a,b), estimados a partir da imagem MODIS foram comparados com os dados coletados *in situ* — comparados com as concentrações de TSS e clorofila-a obtidas por filtragem das amostras de água e, também, comparado com os valores de  $a_{ph}(443)$  e TSS estimados a partir da  $R_{rs}$  coletada *in situ* com o radiômetro —, Figuras 5.20-a,b,c. Os valores dos coeficientes de absorção do sedimento/detrimento,  $a_{sd}(443)$ , e CDOM,  $a_{CDOM}(443)$ , estimados a partir da imagem MODIS também são apresentados (Figuras 5.19-c,d).

Não há dados *in situ* das concentrações de CDOM para as datas de coletas realizadas nesse trabalho. Posteriormente, na análise da série temporal, os valores de  $a_{CDOM}(443)$  serão comparados com dados pretéritos para verificar se as variações de  $a_{CDOM}(443)$  identificadas ao

longo do período considerado nesse estudo (Ago/2002 a Dez/2007) são condizentes com as variações das concentrações dessa substância observadas em épocas anteriores.

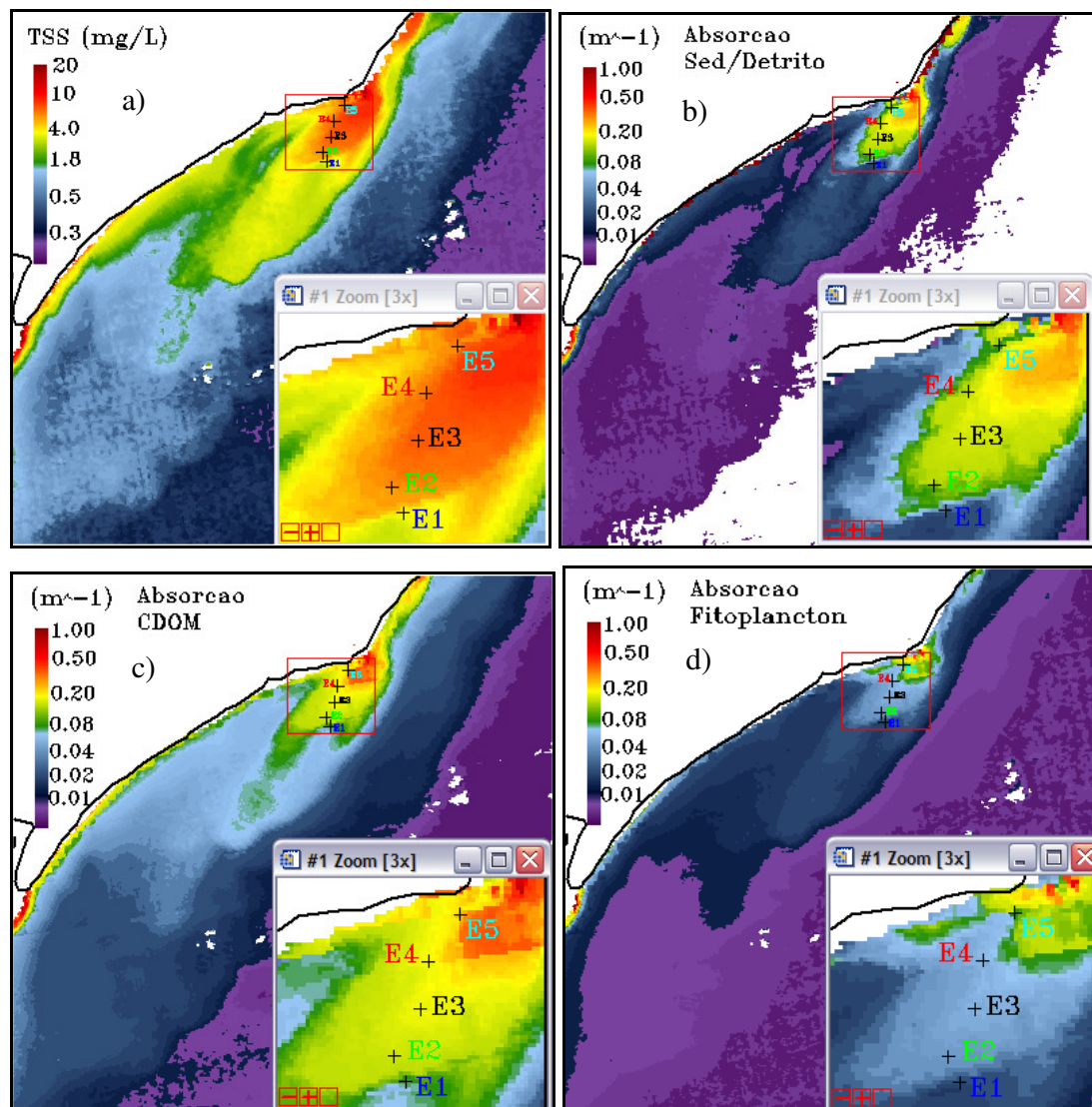


Figura 5.19 – Pluma do Rio São Francisco; a) estimativa do total de sólido em suspensão (TSS); estimativas do coeficiente de absorção: a) sed/detrimento,  $a_{sd}(443)$ ; b) CDOM,  $a_{CDOM}(443)$ ; c) fitoplâncton:  $a_{ph}(443)$ . Data da imagem MODIS: 13/10/2006. Estações oceanográficas discriminadas por: E1, E2, E3, E4 e E5, coletadas no mesmo dia da imagem MODIS.

A reflectância de sensoriamento remoto,  $R_{rs}$ , adquirida *in situ* nas estações E1, E2 e E3 possui uma discrepância em relação a  $R_{rs}$  coletada pelo sensor MODIS (Figura 5.20-a), principalmente para os comprimentos de onda menores do que 500nm, região espectral importante para a quantificação do  $a_{ph}(443)$ . Para os comprimentos de onda superiores a 500nm há uma correspondência maior entre as curvas. Na Figura 5.20-b, nota-se uma pequena

diferença entre os valores do TSS estimados por meio das  $R_{rs}$  (tanto da  $R_{rs}$  coletada *in situ* com o radiômetro, como a derivada do sensor MODIS) e as concentrações obtidas pelas filtrações das amostras de água. Por outro lado, os valores do coeficiente de absorção da clorofila-a para o comprimento de onda 443nm,  $a_{ph}(443)$ , apresentam uma diferença significativa (Figura 5.20-c) para os pontos de coletas referentes às estações E1, E2 e E3. Para esse caso, as estimativas de  $a_{ph}(443)$  derivadas do sensor MODIS têm maior coerência com os valores das concentrações de clorofila-a coletadas *in situ* (filtração de amostra de água), indicando possíveis erros associados à aquisição das medidas radiométricas *in situ*; possivelmente a reflectância do céu na superfície da água não tenha sido suficientemente removida do espectro de reflectância da água, superestimando os valores de  $R_{rs}$  nos comprimentos de onda menores do que 500nm.

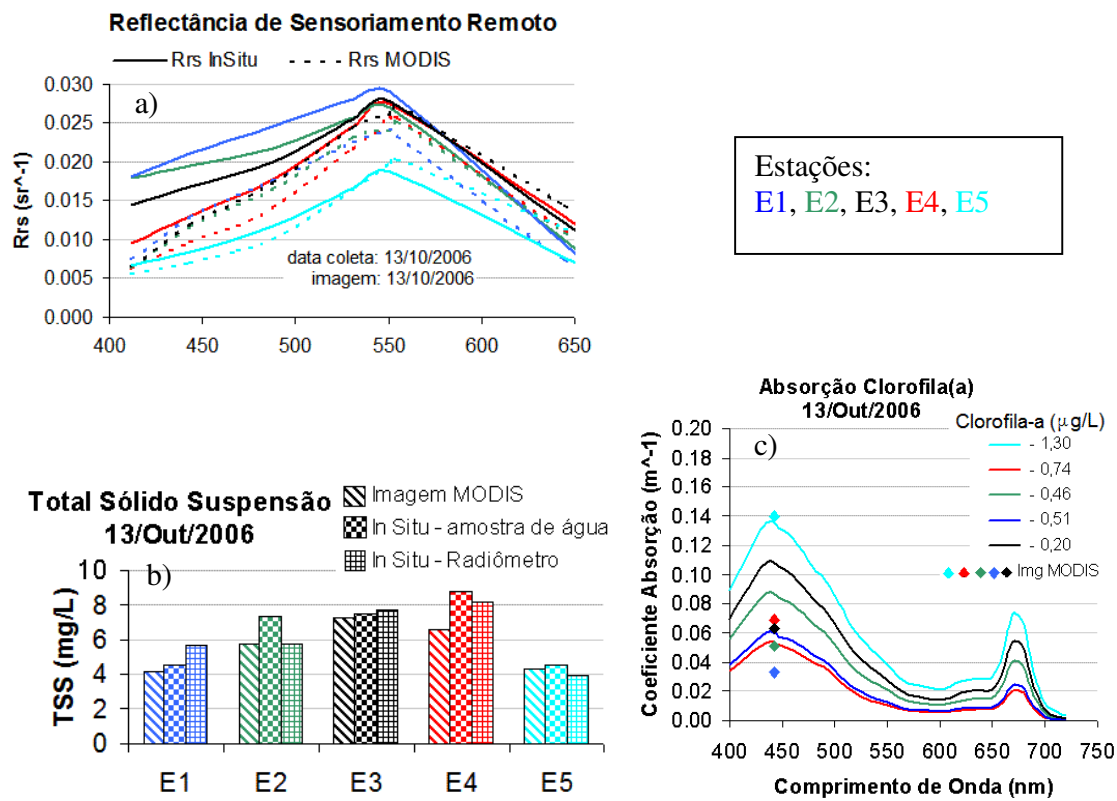


Figura 5.20 – a)  $R_{rs}$  coletada *in situ* e derivada da imagem MODIS; b) TSS coletado *in situ* (amostras de água) e estimado: através das imagens MODIS, e por meio dos dados radiométricos coletados *in situ*; c) curva espectral  $a_{ph}(\lambda)$  estimada a partir de dados radiométricos coletados *in situ*, e valores de  $a_{ph}(443)$  estimados das imagens MODIS (concentrações de clorofila-a são mostradas).

### 5.3.2 Dinâmica da Pluma do Rio São Francisco e a Bifurcação da Corrente Sul Equatorial

As Figuras 5.21-a,b,c,d apresentam as concentrações diárias do TSS estimadas a partir das imagens MODIS acopladas a dados de velocidade de corrente oceânica geostrófica superficial (média semanal conforme as datas das respectivas imagens MODIS) obtidas do sistema de informações altimétricas AVISO ([www.aviso.oceanobs.com](http://www.aviso.oceanobs.com)). As Figuras 5.21-a,b,d mostram o comportamento da pluma do RSF e das águas costeiras adjacentes durante o final da primavera: 17/Nov/2004, verão: 25/Jan/2005, e início do outono: 05/Mar/2006, respectivamente. Nas três é possível observar que a pluma do RSF tem deslocamento predominante para sul, embora vórtices e meandros interfiram na dinâmica superficial de maneira diversa, como sinalizado pelo campo de corrente geostrófica das respectivas imagens. A Figura 5.21-a expõe o confinamento das águas costeiras junto à plataforma continental, favorecido pelo vento de leste, e mais ao sul um vórtice anticiclônico impulsionando o transporte *offshore*. Ao largo, sobre a plataforma, Figura 5.21-b, podemos ver um campo de corrente que conduz as águas costeiras para as regiões oceânicas: uma circulação robusta impulsionada por ventos de NE alimenta o transporte *offshore*. A Figura 5.21-d realça uma situação intermediária, com as águas costeiras sendo conduzidas sobre a plataforma, na direção sul.

Na estação de inverno, Figura 5.21-c, é possível observar que o padrão predominante de dispersão da pluma, de norte para sul, é invertido, deslocando-se agora de sul para norte, aumentando as concentrações de TSS na região ao norte da desembocadura do RSF; também, maiores concentrações de TSS localizadas no trecho entre o rio Sergipe e o RSF evidenciam, nessa época do ano, o aporte de matéria do primeiro para as adjacências do segundo.

Avaliando as estimativas de TSS acopladas ao campo de velocidade de corrente oceânica geostrófica superficial, Figuras 5.21-a,b,c,d, é possível identificar uma relação bastante semelhante entre o padrão de dispersão das águas costeiras junto à pluma do RSF e o fluxo oceânico superficial da borda oeste do atlântico sul entre as latitudes 10° e 17°S.



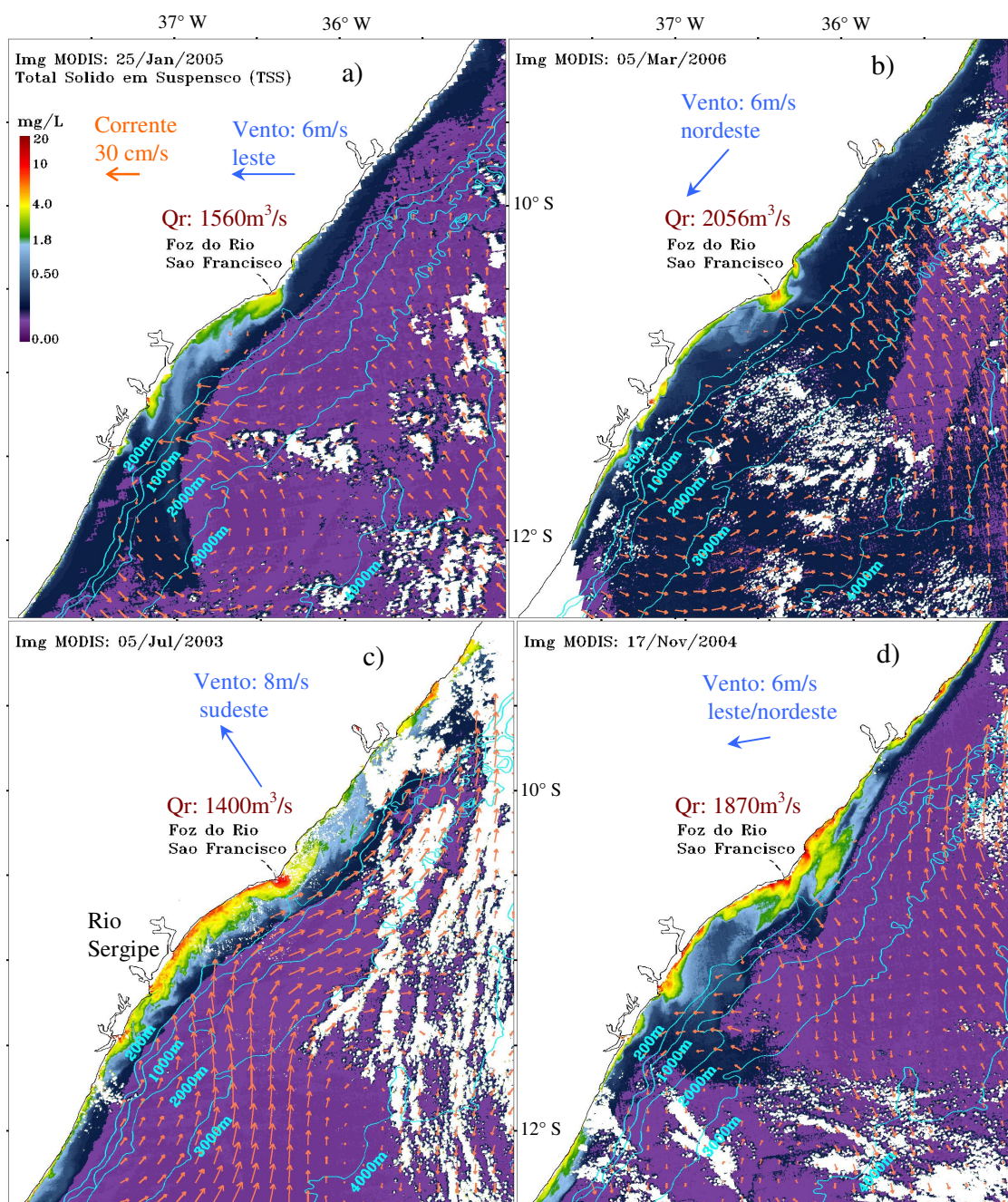


Figura 5.21 – Concentrações do TSS derivadas das imagens MODIS dos dias: a) 25/Jan/2005; b) 05/Mar/2006; c) 05/Jul/2003; d) 17/Nov/2004. Corrente geostrófica (média semanal) representada pelas setas laranjas. Qr=descarga fluvial (média diária). O vento (média diária). Área branca sobre o oceano=nuvens.

### 5.3.3 Diagramas Hovmoller - Série Tempora/Espacial da Pluma do Rio São Francisco

Buscamos, por meio dos diagramas Hovmoller, capturar a variabilidade espacial e temporal da pluma do RSF dando prioridade para um transecto específico, bidimensional (Figura 4.4). A amostragem ao longo do transecto geralmente representa o comportamento médio da pluma do rio, considerando que a vazão, atualmente regularizada, exerce pouca interferência na dinâmica da pluma. Entretanto, devido à maré, ao regime de vento e às correntes costeiras, a pluma do rio pode sofrer oscilações que ocasionalmente não são capturadas pelo transecto de amostragem escolhido, no entanto, pela baixa frequência verificada, parece não comprometer o propósito da análise.

As Figuras 5.22-a,b apresentam as médias mensais da pluviosidade na bacia de drenagem, da vazão do rio e do regime de ventos próximo à foz do RSF durante o período de Agosto/2002 a Dezembro/2007. A pluviosidade (Figura 5.22-a) na bacia de drenagem do RSF (Figura 2.1) é relativamente bem marcada, com valores mais acentuados de precipitação média mensal (250mm) nos setores Alto e Médio da bacia, e concentrados nos períodos de Novembro a Março. Já nos setores Baixo-Médio e Baixo da bacia do RSF, o regime pluviométrico possui sazonalidade menos definida, com menores precipitações durante os meses de Agosto a Dezembro, — exceto o mês de Setembro/2006 que apresentou um valor médio maior (100mm).

A média mensal da vazão do RSF (Figura 5.22-a) permaneceu próxima de  $2000\text{m}^3/\text{s}$ , com regime sazonal praticamente extinto devido às barragens (MEDEIROS, 2003). Porém, durante os meses de Fevereiro/2004 e Fevereiro-Março/2007, como já abordado anteriormente quando falamos dos eventos extremos, ocorreram dois picos de vazão (valor médio mensal), da ordem de  $4000\text{m}^3/\text{s}$  e  $6000\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Enquanto o pico de vazão de 2004 está associado às chuvas concomitantes ao longo de toda a bacia do RSF (precipitação da ordem de 300mm), o pico de vazão de 2007 é o resultado de uma primeira fase de precipitação nos setores Alto e Médio (300mm), seguido, subsequentemente, por uma precipitação um pouco menos significativa nos setores Baixo-Médio e Baixo (200mm) — na abordagem dos eventos extremos ressaltamos as diferenças entre essas duas situações de cheia. Dois picos menores de vazão também podem ser observados, um em Maio/2004 ( $2500\text{m}^3/\text{s}$ ), acompanhado por uma precipitação um pouco mais intensa nos setores Baixo-Médio e Baixo, e outro pico em



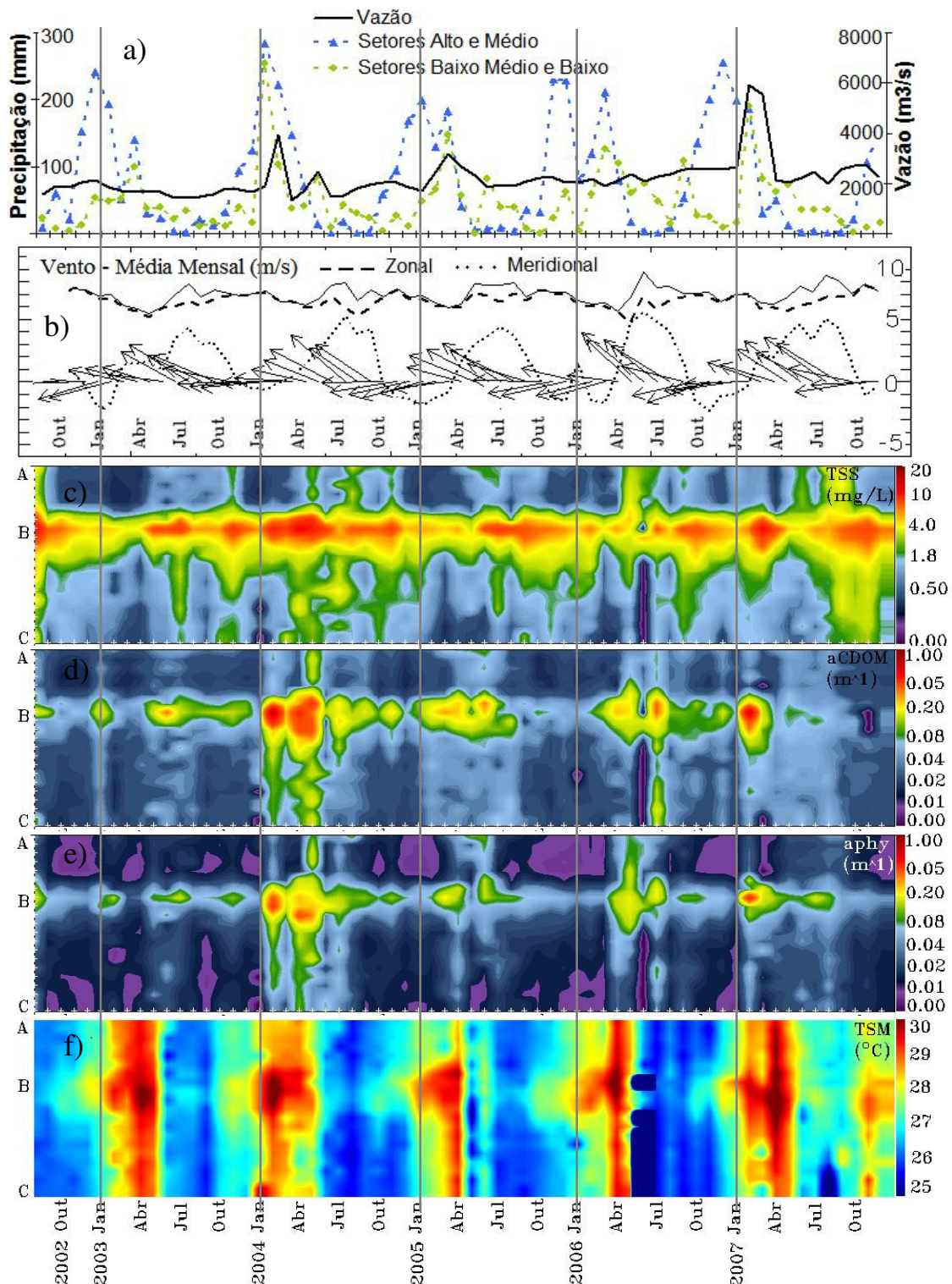


Figura 5.22 – a) precipitação na bacia drenagem e vazão do RSF; b) regime de ventos na foz do RSF; diagramas Hovmoller: c) do TSS; d) absorção CDOM,  $a_{CDOM}(443nm)$ ; e) absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(443nm)$ ; f) da temperatura de superfície do mar. A Figura 4.4-a mostra o transecto ABC escolhido para construir o diagrama hovmoller.

Março/2005 ( $3200\text{m}^3/\text{s}$ ), acompanhado por uma precipitação mais intensa ao longo de toda a bacia do RSF, próxima a 170mm.

O regime de vento que vigora na região da foz do RSF apresenta um padrão sazonal marcado, com predomínio de ventos de leste/nordeste no verão e ventos mais intensos de sudeste no inverno, e variações dessas direções para as demais estações (Figura 5.22-b). O segundo semestre do ano apresenta campo de vento com maior intensidade.

Os diagramas Hovmoller do TSS,  $a_{CDOM}(443\text{nm})$ ,  $a_{ph}(443\text{nm})$  (Figuras 5.22-c,d,e) mostram, de maneira geral, que os maiores valores estão concentrados junto à foz do RSF (ponto B nas figuras), com variações distribuídas ao longo do transecto ABC (conforme mostra a Figura 4.4-a) e ao longo dos anos conforme a precipitação na bacia de drenagem, a vazão e o regime de ventos estabelecido na região adjacente ao estuário do RSF. A Figura 5.22-c evidencia o transporte predominante de TSS para a região ao sul do estuário do RSF (transecto BC); porém, principalmente durante os meses de Junho a Agosto, a pluma têm sua trajetória invertida por uma corrente costeira que flui de sul para norte (U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE, 1967). Essa inversão da trajetória da pluma está bem acentuada no diagrama de TSS (Figura 5.22-c, transecto BA), principalmente durante os períodos de: Junho a Agosto/2004, Maio a Junho/ 2006 e Julho a Setembro/2007, períodos caracterizados por ventos com componentes meridionais mais intensas, da ordem de 5m/s (Figura 5.22-b), reforçando a importância dessa componente para o acréscimo de material em suspensão na porção ao norte da desembocadura do RSF.

As concentrações de TSS próxima à foz do RSF (Figura 5.22-c, ponto B) permaneceram em torno de 5mg/L durante os meses de Dezembro a Abril (exceto: Fevereiro-Abril/2004, e Fevereiro-Março/2007, eventos extremos), justamente na época do ano caracterizada por maiores precipitações na bacia de drenagem, porém, ventos de E e NE menos intensos — evidenciando o desacoplamento entre o regime pluvial, a vazão e o transporte de sedimento.

Nos demais meses dos anos os ventos geralmente são mais intensos e provenientes de Sudeste (de Junho a Agosto), Leste e Nordeste (Figura 5.22-b). Esse regime de ventos mais intenso que ocorre de Junho a Novembro reforça a carga de material em suspensão na pluma devido à ressuspensão costeira, com valores médios mensais de TSS variando de 5 a 10mg/L (Ponto B, Figura 5.22-c), decrescendo, tanto ao norte como ao sul da desembocadura do rio, para valores inferiores a 4mg/L com o distanciamento da foz. Chuvas intercaladas nos meses de



Junho a Agosto, que ocorrem geralmente nos setores Baixo-Médio e Baixo da bacia, também proporcionam um acréscimo de matéria para o estuário do RSF. De Agosto a Novembro de 2007, houve uma maior persistência da intensidade do regime de vento que provavelmente contribuiu para uma carga de TSS mais dispersa durante esse período (Figuras 5.22-b,c).

Os períodos de: Fevereiro a Maio/2004, e Fevereiro a Março/2007 apresentaram concentrações mensais médias de TSS próximas de 18mg/L e 15mg/L, respectivamente, na região da foz do rio São Francisco (ponto B, Figura 5.22-c). As altas descargas, ocasionadas pelos regimes intensos de precipitações (Figura 5.22-a) que excederam os níveis de armazenamento de água dos reservatórios, proporcionaram concentrações de TSS superiores aos valores médios mensais observados em outras ocasiões. Ressaltando que em Maio/2004 houve um segundo pico menos intenso de vazão ( $2500\text{m}^3/\text{s}$ ) causado por chuvas nos setores Baixo-Médio e Baixo que estendeu a permanência dessa condição atípica. Como visto anteriormente (Eventos Extremos), a pluma do RSF durante o mês de Janeiro apresentou valores bastante elevados de TSS. Entretanto, devido à cobertura de nuvens, as imagens MODIS com maior carga de sedimento (período compreendido entre o final de Janeiro e início de Fevereiro) não fizeram parte da análise temporal, minimizando os impactos na carga de material estimada por meio das imagens MODIS.

Os diagramas Hovmoller do  $a_{CDOM(443)}$  e  $a_{ph(443)}$ , (Figuras 5.22-d,e), mostram que embora o padrão sazonal de deslocamento da pluma do RSF seja o mesmo que o observado para o TSS (Figura 5.22-c), as feições identificadas por meio das variações de  $a_{CDOM(443)}$  e  $a_{ph(443)}$  apontam para maiores concentrações de CDOM e de fitoplâncton durante o primeiro semestre de cada ano, permanecendo mais insistentemente, porém não exclusivamente, durante os meses de Fevereiro/Março e Junho/Julho, evento aparentemente relacionado com o regime da precipitação na bacia de drenagem do rio; antecipando os resultados estatísticos, a TSM (Figura 5.22-f) não possui correlação significativa com  $a_{CDOM(443)}$  e  $a_{ph(443)}$ , e parece não ser um dos principais parâmetros que determina as variações dessas variáveis.

Os intervalos de valores de  $a_{CDOM(443)}$  e  $a_{ph(443)}$  ficaram entre  $0,03\text{-}0,70\text{m}^{-1}$  e  $0,01\text{-}0,45\text{m}^{-1}$ , respectivamente. Os maiores valores de  $a_{CDOM(443)}$  e  $a_{ph(443)}$  são observados para os períodos de maior vazão: Fev/Mai-2004 e Fev/Mar-2007. Estudos realizados no Golfo do México durante o período de 2002 a 2005 encontraram valores da ordem de  $0,04\text{-}1,4\text{m}^{-1}$  e  $0,02\text{-}$

$1,38\text{m}^{-1}$  para o  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$ , respectivamente (GREEN ; GOULD, 2008; GREEN et al., 2008).

Com o propósito de agrupar a série temporal de Agosto/2002 a Dezembro/2007 (estimada a partir das imagens MODIS) e realçar as feições predominantes que caracterizam a dinâmica estuarina do RSF ao longo do ciclo anual, valores mensais médios de TSS,  $a_{CDOM}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$  e TSM foram calculados considerando-se todos os anos. As Figuras 5.23-a,b,c,d mostram os respectivos diagramas Hovmoller.

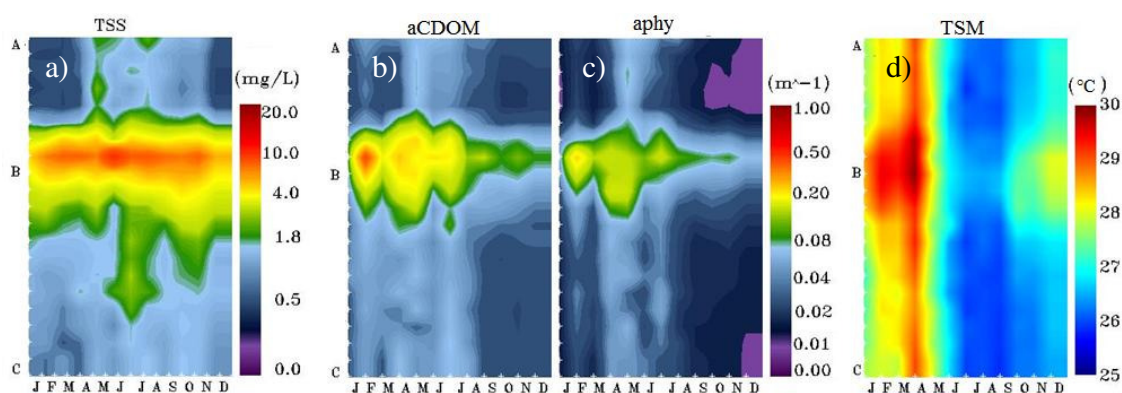


Figura 5.23 – Diagramas Hovmoller: a) do TSS; b) absorção CDOM,  $a_{CDOM}(443\text{nm})$ ; c) absorção do fitoplâncton,  $a_{ph}(443\text{nm})$ ; d) TSM-temperatura da superfície do mar. Médias mensais ao longo do período de Agosto/2002 até Dezembro/2007. J=Janeiro, F=Fevereiro, etc. A Figura 4.4-a mostra o transecto ABC escolhido para construir o diagrama Hovmoller.

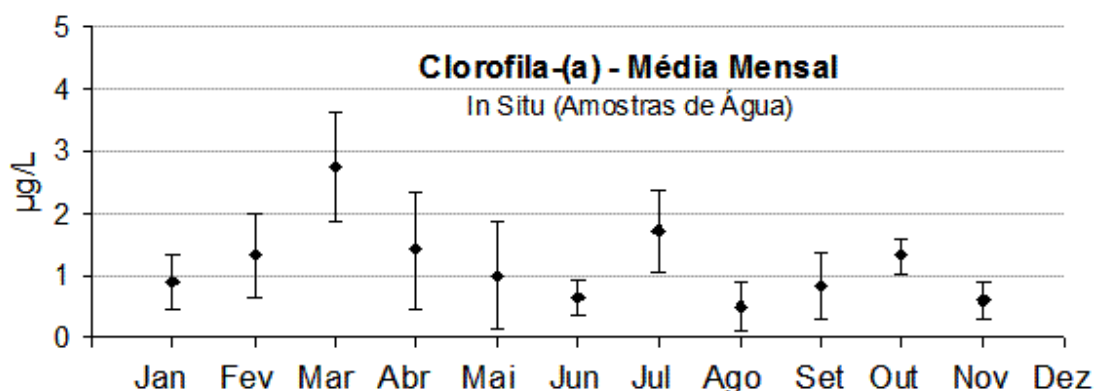


Figura 5.24 – Concentração mensal média de clorofila-a presente na pluma do RSF durante as coletas *in situ* realizadas nos anos de: Nov/2000 a Jan/2002, Out/2006, Jan-Fev/2007 e Abr/2008 (conforme descrito no item 4.1).

Resumidamente, observa-se: a) as maiores concentrações de TSS,  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$ , localizadas próximas a foz do RSF (ponto B nas Figuras); b) transporte predominante de norte para sul (ponto A para o ponto C), porém, a inversão dessa direção durante os meses de Maio a Agosto (ponto C para o ponto A); c) maior resuspensão costeira durante os meses de Junho a Outubro observado no diagrama de TSS (Figura 5.23-a); d) maiores concentrações de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  durante o primeiro semestre do ano (Figuras 5.23-b,c). É interessante observar que o período de Junho a Outubro, caracterizado por processos de ressuspensão mais acentuados, não reflete em maiores concentrações de CDOM e fitoplâncton (Figuras 5.23-a,b,c), provavelmente em função da baixa concentração de elementos biogênicos e material orgânico associados ao material ressuspenso e retrabalhado pelos processos oceanográficos costeiros.

A partir das coletas realizadas na foz do RSF nos anos de: Nov/2000 a Jan/2002, Out/2006, Jan-Fev/2007 e Abr/2008 (conforme descrito no item 4.1), buscamos comparar os valores de clorofila-a observados *in situ* com as estimativas de  $a_{ph}(443)$  obtidas por meio das imagens MODIS. Sem nos preocuparmos com a localização geográfica precisa do ponto de coleta, mas considerando apenas os pontos coletados ao logo da pluma do RSF e região costeira adjacente, calculamos a média mensal das concentrações de clorofila-a obtidas *in situ* (Figura 5.24). Observa-se uma correspondência bastante satisfatória entre as variações de  $a_{ph}(443)$ , Figura 5.23-c, e as variações das concentrações de clorofila-a coletadas *in situ*, Figura 5.24, — maiores valores concentrados no mês de Março e Julho, e no primeiro semestre do ano —, evidenciando que as variações de  $a_{ph}(443)$  mostram claramente o aumento e a diminuição da concentração de clorofila-a.

O mesmo tipo de comparação (utilizando dados *in situ*) foi feito para o CDOM, porém, nesse caso, concentrações de carbono orgânico dissolvido (DOC) e concentrações de pigmentos amarelos foram comparadas com as estimativas de  $a_{CDOM}(443)$ . Embora o CDOM represente apenas uma fração do DOC, observa-se uma boa correlação entre o  $a_{CDOM}(443)$  e a concentração de DOC nas regiões costeiras (VECCHIO ; BLOUGH, 2004; SIEGEL et al., 2002). A concentração de pigmentos amarelos está diretamente relacionada com as substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, e húmica) que conferem cor à água, ou seja, a matéria orgânica dissolvida colorida ou CDOM. Apesar da coloração marrom-amarelada ser atribuída aos compostos húmicos, não pode ser descartada a influência de complexos organo-metálicos de íons férricos ou mangânicos (MANTOVANI ; NOVO, 1996).

BESSA ; PAREDES (1990), durante o ano hidrológico de 1984-1985, avaliaram o transporte de DOC e pigmentos amarelos no setor Baixo do RSF (30 km a montante da foz, Figura 2.1). Segundo esses autores, a relação positiva entre as substâncias pigmentos amarelos e DOC no espaço de tempo relativo à elevação do fluxo do rio, Figura 5.25, demonstra a influência da matéria orgânica terrestre no nível do DOC em trânsito, uma vez que estas substâncias representam uma fração da matéria orgânica continental, da qual o carbono orgânico é o seu índice referencial. Por outro lado, a tendência de comportamento inverso destes materiais na fase de estabilização da descarga (Figura 5.25) vem sugerir a existência de contribuição biológica *in situ* para o DOC. Eles salientam que na área situada a montante da estação observada, há uma extensa zona de caatinga onde predominam solos férteis e que boa parte do conteúdo orgânico em trânsito tem sua origem a partir desses materiais, que são carregados para o leito do rio durante a estação chuvosa. Na época, os reservatórios já exerciam influência sobre o fluxo fluvial, porém não de maneira tão acentuada como o período pós 1993, quando o reservatório de Xingó, situado a 180 Km da foz do RSF, iniciou sua operação, regularizando definitivamente a vazão (KNOPPERS et al., 2006; MEDEIROS, 2003).

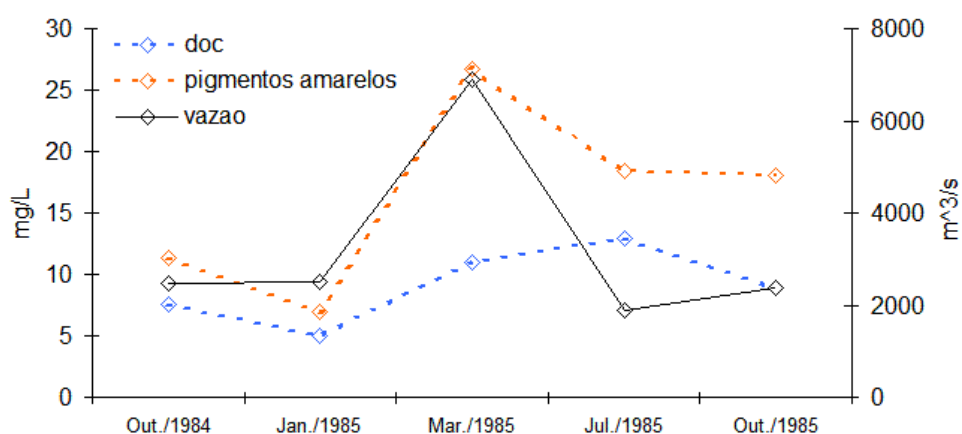


Figura 5.25 – Concentrações de carbono orgânico dissolvido (DOC) e pigmentos amarelos medidos durante o ano hidrológico de 1984-1985 no setor Baixo do RSF (30 km a montante da foz). Curva contínua: vazão do rio durante o período de coleta (Fonte: BESSA ; PAREDES, 1990).

Embora o regime fluvial tenha sido modificado durante o intervalo de tempo compreendido entre o trabalho de BESSA ; PAREDES (1990) e a série temporal aqui analisada

(Ago/2002 a Dez/2007), a sazonalidade observada para a distribuição do CDOM e fitoplancton parece depender, em última instância, do regime pluviométrico.

A Tabela 5.4 apresenta os valores da correlação de Spearman (0,05%, valores em vermelho são significativos) entre as valores médios mensais das variáveis estimadas: TSM, TSS,  $a_{sd}(443nm)$ ,  $a_{CDOM}(443nm)$ ,  $a_{ph}(443nm)$ , e os valores médios mensais das variáveis ambientais: vazão, vento (zonal, meridiona e módulo) e precipitação na bacia de drenagem do RSF (setores: Alto e Médio, Baixo-Médio e Baixo). A TSM apresentou correlação apenas com o vento e a precipitação; o TSS com  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$  e o vento; o coeficiente  $a_{sd}(443)$  apresentou correlação significativa com  $a_{ph}(443)$  e o vento; o  $a_{CDOM}(443nm)$  apresentou correlação com  $a_{ph}(443)$ , vento e a precipitação;  $a_{ph}(443)$  apresentou correlação com o vento e a precipitação. A vazão não apresentou correlação significativa com nenhuma variável considerada.

Tabela 5.4 – Correlação de Spearman (0.05%). Correlações significativas em vermelho. TSM=temperatura superfície do mar; TSS=total sólido em suspensão;  $a_{sd}$ =absorção sedimento/detrito;  $a_{CDOM}$ =absorção CDOM;  $a_{phy}$ =absorção fitoplancton; v.z.= componente zonal vento; v.m.=componente meridional vento; vento=módulo do vento; Pa=precipitação setores Alto e Médio; Pb=precipitação setores Baixo-Médio e Baixo da bacia do RSF.

	TSM	TSS	$a_{sd}$	$a_{CDOM}$	$a_{phy}$	vazao	v.z.	v.m.	vento	Pa	Pb
TSM	1.00										
TSS	-0.13	1.00									
$a_{sd}$	-0.09	<b>0.89</b>	1.00								
$a_{CDOM}$	0.10	0.20	0.13	1.00							
$a_{phy}$	0.11	<b>0.44</b>	<b>0.38</b>	<b>0.84</b>	1.00						
vazao	0.16	0.22	0.17	0.18	0.18	1.00					
v.z.	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>	<b>0.29</b>	<b>0.35</b>	<b>0.34</b>	-0.14	1.00				
v.m.	<b>-0.36</b>	<b>0.41</b>	<b>0.38</b>	<b>0.37</b>	<b>0.50</b>	-0.18	<b>0.33</b>	1.00			
vento	<b>-0.67</b>	<b>0.45</b>	<b>0.40</b>	-0.02	0.04	-0.02	<b>-0.61</b>	<b>0.39</b>	1.00		
Pa	<b>0.44</b>	-0.09	-0.13	<b>-0.28</b>	<b>-0.43</b>	0.22	-0.23	<b>-0.90</b>	<b>-0.43</b>	1.00	
Pb	<b>0.49</b>	-0.14	-0.18	<b>0.48</b>	<b>0.35</b>	0.13	<b>0.43</b>	-0.04	<b>-0.34</b>	0.20	1.00

### 5.3.4 Classificação das Massas d'Água

As propriedades ópticas inerentes estimadas por meio do algoritmo QAA e das imagens MODIS são aqui utilizadas para classificar as massas d'águas costeiras adjacentes à foz do RSF, região influenciada tanto pelo aporte fluvial/continental como pelas forçantes oceanográficas/meteorológicas que ditam as condições de agitação do mar e de deslocamento das correntes, ocasionando a formação de frentes costeiras. Especificamente, os coeficientes de absorção do sedimento/detrito ( $a_{sd}$ ), do CDOM ( $a_{CDOM}$ ) e do fitoplâncton ( $a_{ph}$ ),

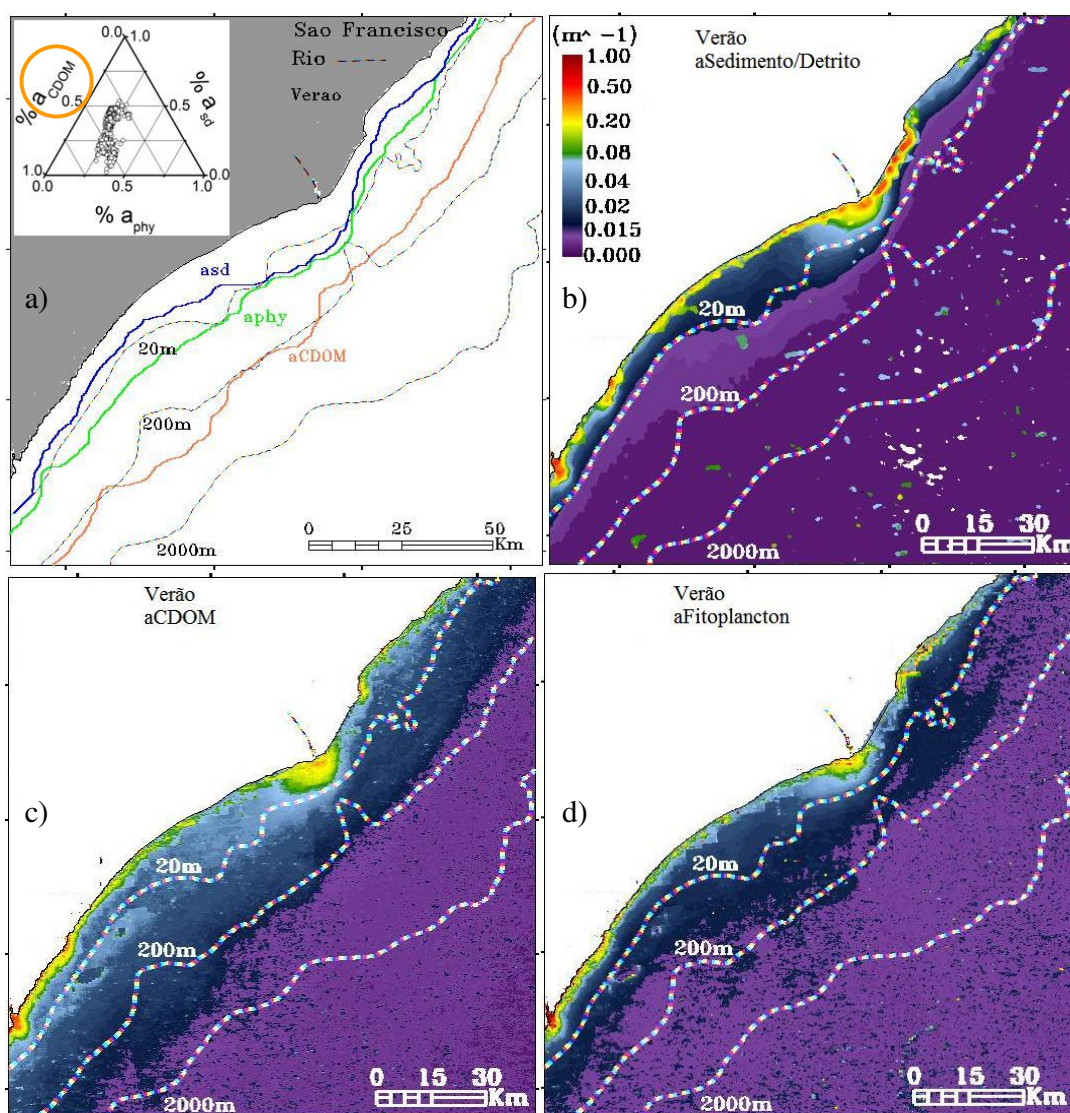


Figura 5.26 – Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação verão (Dez/Jan/Fev): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplâncton,  $a_{ph}(443)$ .



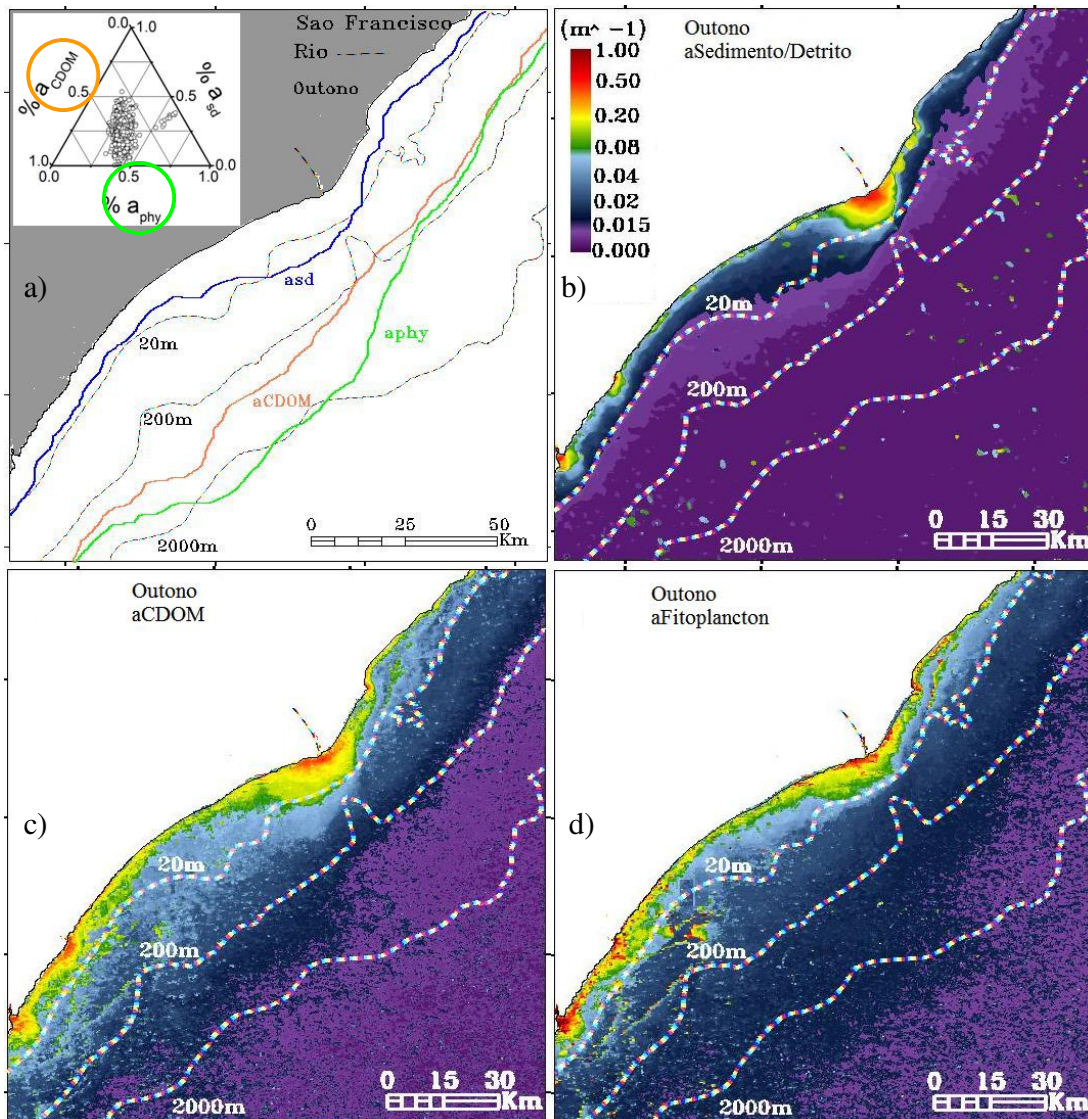


Figura 5.27 – Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação outono (Mar/Abr/Mai): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplacton,  $a_{ph}(443)$ .

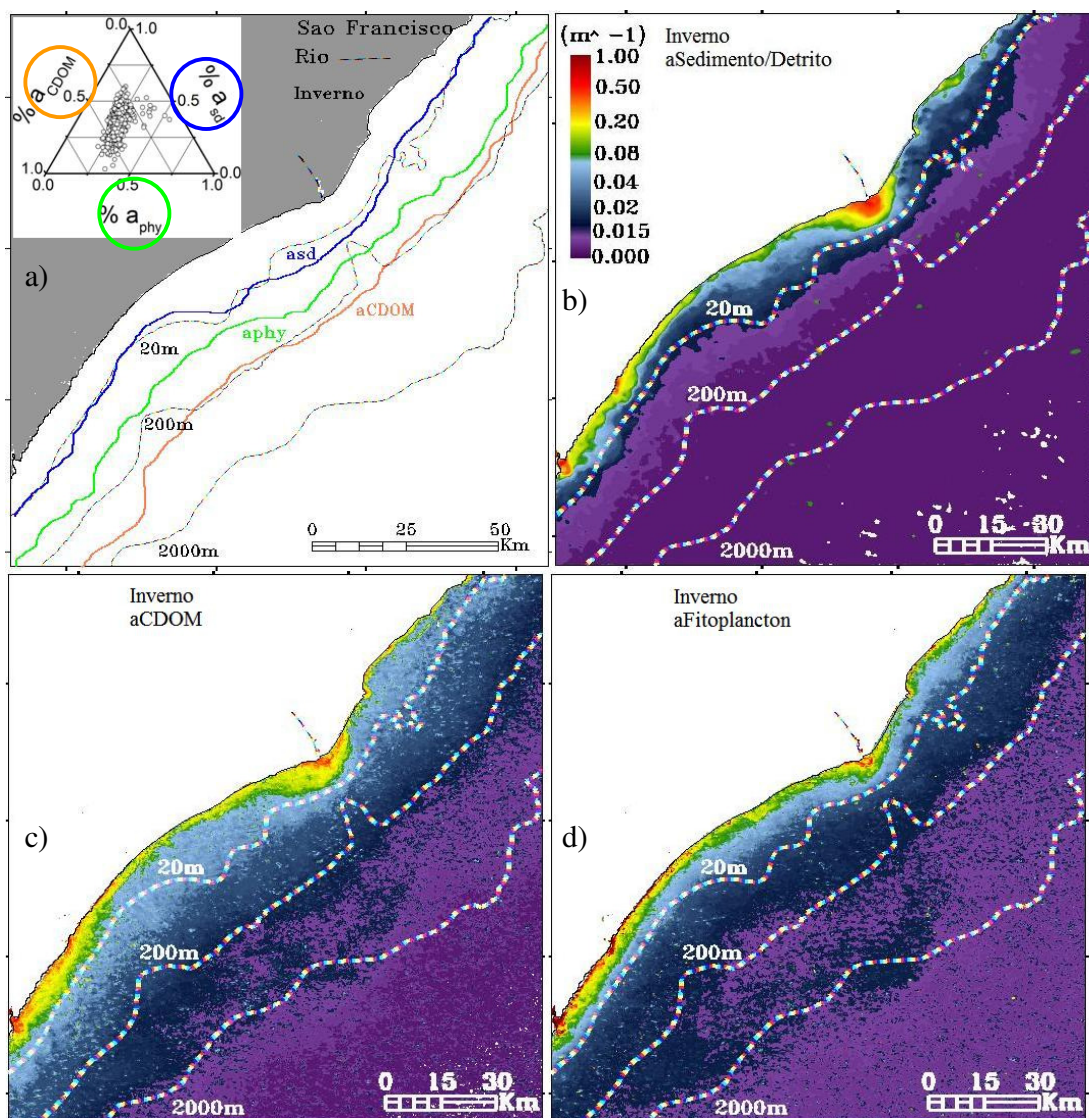


Figura 5.28 – Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação inverno (Jun/Jul/Ago): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{phy}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{phy}(443)$ .



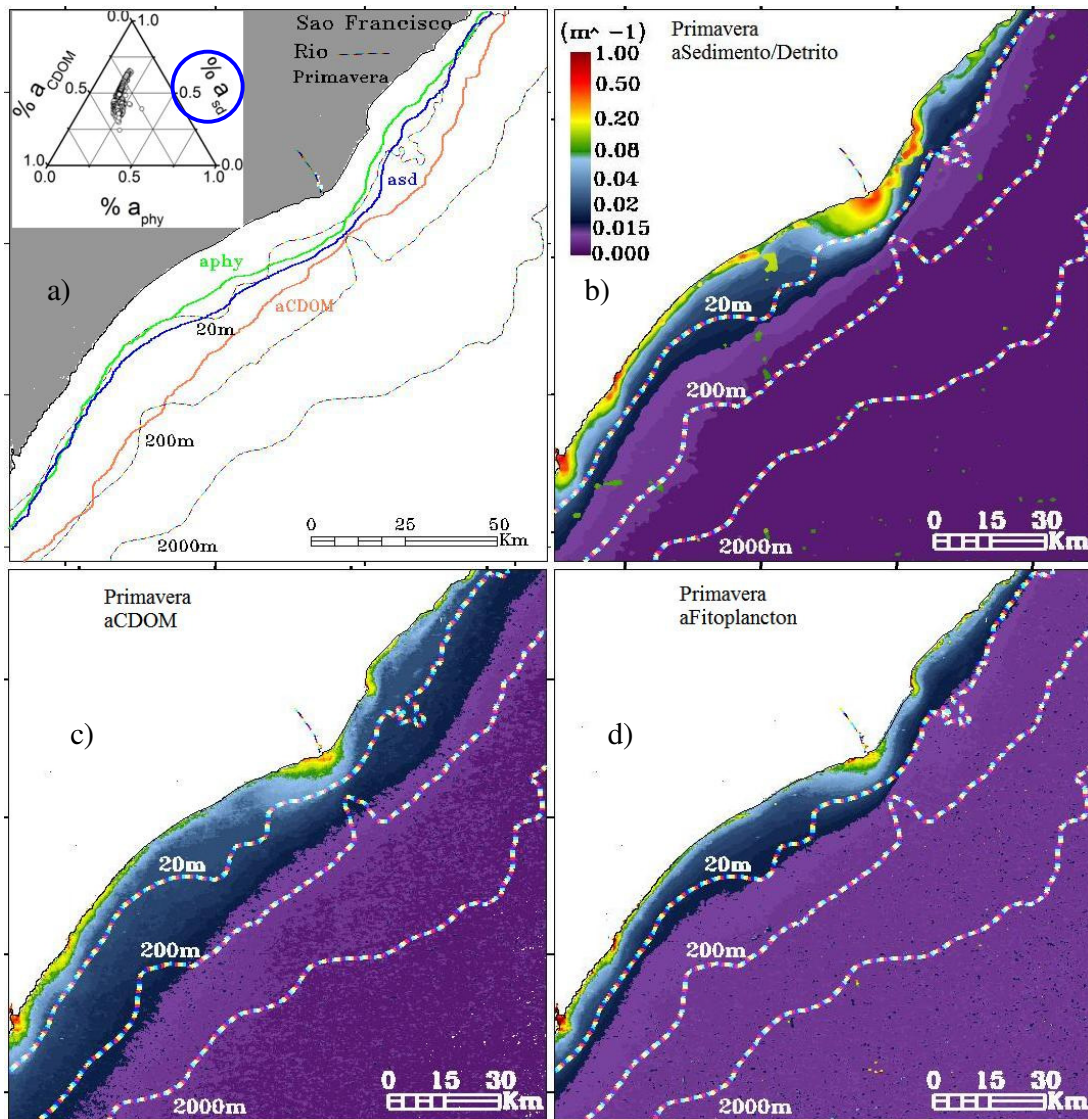


Figura 5.29 – Isolinhas e valores médios das propriedades ópticas inerentes para a estação primavera (Set/Out/Nov): a) Isolinhas ( $=0.02$ ) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e diagrama ternário mostrando com o círculo a propriedade óptica predominante; b) absorção sedimento detrito,  $a_{sd}(443)$ ; c) absorção CDOM;  $a_{CDOM}(443)$ ; d) absorção fitoplancton,  $a_{ph}(443)$ .

caracterizam os diferentes tipos de água e são sensíveis aos processos químicos e biológicos atuantes no meio aquático. A classificação por meio desses parâmetros tem o potencial de expandir o entendimento dos processos ecológicos que atuam no ambiente marinho, da mesma maneira que o sistema de classificação baseado na temperatura e salinidade tem conduzido os progressos em relação à compreensão dos fenômenos físicos oceanográficos (ARNONE et al., 1998).

As Figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam as médias sazonais (verão, outono, inverno, primavera, respectivamente, para o período de Agosto/2002 a Dezembro/2007) dos coeficientes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$ , assim como as isolinhas para as quais o coeficiente de absorção é igual a 0,02. Durante o verão (Figura 5.26), observa-se o predomínio do constituinte óptico CDOM (diagrama ternário, Figura 5.26-a) e menores concentrações de TSS e fitoplâncton. Essa época do ano é caracterizada pelo início da estação chuvosa tanto nos setores Alto e Médio como nos setores Baixo-Médio e Baixo e ventos de Leste e de nordeste menos intensos. As isolinhas de  $a_{sd}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  estão próximas da costa, enquanto que a isolinha de  $a_{CDOM}(443)$  excursiona para a região sobre o talude (Figura 5.26-a).

Durante o outono, as chuvas sobre a bacia hidrográfica do RSF continuam significativas, principalmente nos setores Baixo-Médio e Baixo, os ventos que antes eram de leste e nordeste, passam a incidir também de sudeste. As massas d'água são agora caracterizadas pelo predomínio de CDOM e fitoplâncton, como pode ser observado pelo diagrama ternário da Figura 5.27-a. As isolinhas de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  alcançam a porção mais externa da plataforma continental, atingindo a isóbata de 2000m no caso do  $a_{ph}(443)$ , Figura 5.27-a. O coeficiente  $a_{sd}(443)$  apresenta valores significativos junto à desembocadura do RSF (Figura 5.27-b), indicando maior concentração de TSS, porém restrito apenas a região do pró-delta externo do RSF. As Figuras 5.27-c,d mostram uma dispersão bastante significativa tanto de  $a_{CDOM}(443)$  como de  $a_{ph}(443)$  sobre a plataforma.

Com chuvas menos intensas e restritas aos setores Baixo-Médio e Baixo, a estação de inverno apresenta massas d'água onde as três componentes:  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$  e  $a_{CDOM}(443)$  possuem contribuições aproximadamente similares (Figura 5.28-a,b,c,d). A isolinha do  $a_{sd}(443)$  está ligeiramente mais afastada da costa em relação às isolinhas do verão e outono (Figura 5.30); o coeficiente  $a_{sd}(443)$  apresenta alto valores junto à costa (Figura 5.28-b), indicando maiores concentrações de TSS nessa região devido aos ventos mais intensos de SE que sopram

durante o inverno e revigoram a resuspensão costeira. As isolinhas de  $a_{ph}(443)$  e  $a_{CDOM}(443)$  estão mais recuadas em relação a estação de outono (Figura 5.28-a e Figura 5.27-a, respectivamente), indicando o início de um processo de regressão da interferência das águas costeiras sobre a plataforma.

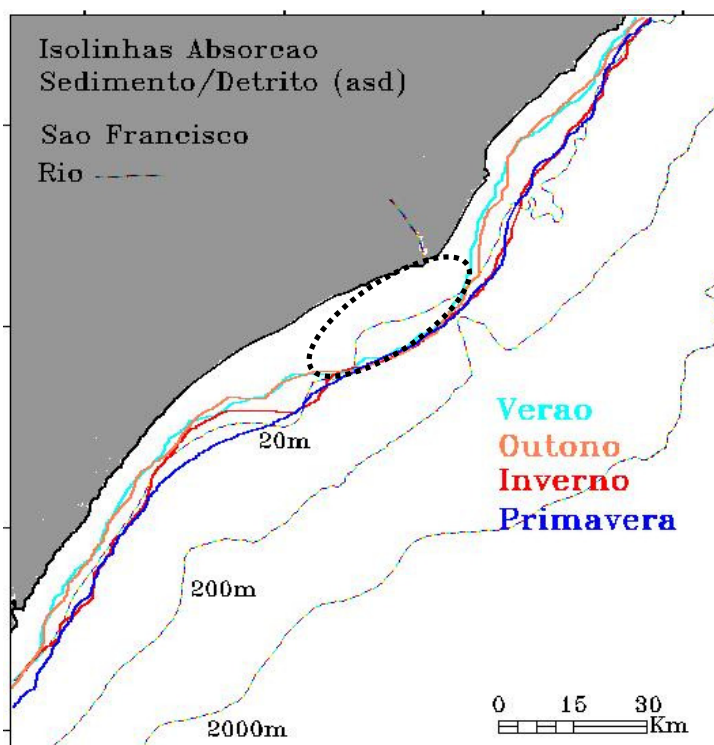


Figura 5.30 – Isolinhas de absorção sedimento/detrimento,  $a_{sd}(443)$ , para as estações: verão, outono, inverno, primavera. Elipse pontilhada delimita área dominada pela interferência da dinâmica fluvial e caracteriza o alcance médio da pluma do RSF: 30 km ao longo do eixo principal de transporte e 10 km ao longo do eixo secundário.

Diferente da estação de verão, quando as isolinhas do  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  iniciam um processo de expansão para a região *offshore*, atingindo as maiores distâncias na estação de outono (Figura 5.27), na primavera essas isolinhas recuam significativamente para junto da costa (Figura 5.29) — particularmente a isolinha do  $a_{ph}(443)$  —, sugerindo um comportamento sazonal de exportação e retenção do material suspenso, principalmente dissolvido e particulado orgânico. Ainda na primavera, a isolinha do  $a_{sd}(443)$  mantém um comportamento similar ao observado no inverno, ou seja, mais afastada da costa (Figura 5.30); novamente, os ventos mais intensos estimulando a resuspensão costeira.

## 6. DISCUSSÃO

A pluma do RSF sofreu ao longo das últimas décadas grandes impactos devido às alterações antrópicas em seu curso, em especial, à cascata de barragens para geração de energia elétrica e abastecimento urbano. Diversos estudos realizados na região estuarina do RSF têm evidenciado a depleção da descarga, do material particulado em suspensão e nutrientes, alterações dos componentes bióticos e abióticos devido ao maior tempo de residência das águas nos reservatórios, processos erosivos fluviais proporcionado pela baixa vazão, — que acarreta a redução da pressão hidráulica no leito do rio colapsando os barrancos marginais —, assim como erosão costeira resultante da baixa reposição de sedimento para a região estuarina do rio (GEF, 2002; SOUZA et al., 2002; MEDEIROS, 2003, 2007; SOUZA ; KNOPPERS, 2003; OLIVEIRA et al., 2005; KNOPPERS et al., 2006; SANTOS, 2007).

O tempo de resiliência do RSF parece distante e imprevisível, e, provavelmente, o sistema repousará em condições bem distintas das concebidas no período anterior às barragens. A observação pretérita e atual da pluma abarca esse momento transitório de adaptação do sistema às novas condições impostas. O registro dessas alterações de forma sistemática e sinóptica tem sido hoje em dia viável com o uso do sensoriamento remoto aplicado a ambientes aquáticos e suas técnicas para quantificação e qualificação dos parâmetros biogeoquímicos. Nesse trabalho, essa alternativa foi implementada de maneira inédita para a região da foz do RSF, resultando na série temporal e espacial construída a partir das imagens de satélites.

### 6.1 PLUMAS DE TURBIDEZ DE QUATRO SISTEMAS DA COSTA LESTE DO BRASIL

De maneira geral, para os três sistemas: SCC, RD e RPS, a concentração de TSS transportado pelo rio, possui uma relação direta com a vazão, pois o aumento da vazão intensifica a velocidade do escoamento fluvial e a capacidade de transporte do rio. Ou seja, há um acoplamento entre a descarga fluvial e o TSS para esses três sistemas. Por outro lado, podemos dizer que o RSF, com sua vazão regularizada devido às barragens (MEDEIROS, 2003; KNOPPERS et al., 2006), contribui muito pouco para a manutenção da pluma de turbidez, esta, basicamente, mantida por processos oceanográficos costeiros que ressuspendem sedimentos e alimentam a pluma. Nesse caso o acoplamento entre vazão e TSS não ocorre. A carga de TSS

transportada pelas plumas dos quatro sistemas fluviais esteve geralmente abaixo de 40mg/L, considerando o período temporal avaliado; entretanto, concentrações mais significativas de TSS são transportadas por esses rios, exceto o RSF, que somente no período de eventos extremos apresenta altas concentrações de TSS (CARNEIRO, 1998; COELHO, 2006; COSTA, 1994; LEÃO, 1999; MEDEIROS, 2003).

Em relação à vazão e ao aporte de TSS para a região estuarina, os impactos antrópicos causados nas bacias do RD e RPS possuem caráter antagônico. Por uma lado, os reservatórios construídos em suas bacias de drenagem contribuíram para a redução do fluxo fluvial e do TSS, por outro, a supressão das matas presentes na bacia de drenagem (pois parte das chuvas que ocorrem hoje não são, como era no passado, interceptadas pelas florestas/matas e, por sua vez, armazenadas no solo) e impermeabilização dos solos urbanos contribuíram para aumentar fluxo fluvial e o aporte de TSS. Ou seja, num primeiro momento as construções de reservatórios reduziram o fluxo fluvial, porém, subsequentemente, a intensa alteração do uso do solo restabeleceu parcialmente o fluxo fluvial e o aporte de TSS (COSTA, 1994; COELHO, 2006).

Na costa leste, dominada pelos ventos Alísios, prevalecem ventos predominantemente de E e NE durante o Verão (Dez/Jan/Fev), e ventos de SE e S, geralmente mais intensos, durante o inverno (Jun/Jul/Ago). Para as demais estações existe uma oscilação entre essas duas condições, com ventos variando entre as direções NE, E, SE. Essa alternância do regime de ventos, e, conseqüentemente, de ondas, gera nas regiões costeiras dos quatro sistemas analisados uma inversão no padrão predominante de dispersão das plumas que geralmente é de norte para sul. Ou seja, no inverno as plumas desses sistemas invertem suas trajetórias, fluindo de sul para norte e próximas à região costeira (CARNEIRO, 1998; LEÃO, 1999; U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE, 1967).

De um ponto de vista geomorfológico, a extensão da plataforma continental é estreita e não ultrapassa os 100 km nas regiões adjacentes às desembocaduras dos rios São Francisco, Doce e Paraíba do Sul, o que, num primeiro momento, favorece, porém não determina, a capacidade de exportação de matéria para a região do talude e oceânica. O volume do aporte fluvial, o regime de vento e a geomorfologia costeira são fatores determinantes para o transporte *offshore*.

A inclinação da linha de costa associada ao regime de ventos pode interferir positivamente para a dispersão da pluma sobre a plataforma. Esse caso é observado para os sistemas do RSF e RD quando o regime de ventos é proveniente de NE. O acoplamento entre o

regime de vento de NE e a direção de alinhamento da linha de costa (nordeste para sul do oeste) favorece o transporte de *Ekman* e impulsiona a pluma sobre a plataforma continental, podendo alcançar, ou até mesmo ultrapassar, a isóbada de 200m. Ou seja, os rios São Francisco e Doce tem características de sistemas exportadores de matéria para a região *offshore*. Já o Sistema Costeiro de Caravelas e o rio Paraíba do Sul têm um comportamento mais retentor de TSS, com suas plumas mais confinadas junto à região costeira. Os arcos de recifes de corais, de certa forma, abrigam a região costeira de Caravelas das interferências oceânicas.

## 6.2 VARIAÇÕES DA CARGA DE TSS TRANSPORTADA PELO RSF NAS ÚLTIMAS DÉCADAS E OS EVENTOS EXTREMOS

Em condições naturais, as concentrações e fluxos de material em suspensão nos rios, possuem relação com a vazão. O aumento da vazão intensifica a velocidade do escoamento fluvial, a capacidade de transporte do rio e a lavagem das margens, incrementando o material particulado e dissolvido transportados. As alterações nas vazões naturais e a diminuição da carga de material em suspensão (e elementos biogênicos) à região costeira, foram associadas às construções de barragens em cascata no Rio São Francisco (MEDEIROS et al., 2007; KNOPPERS et al., 2006; MEDEIROS, 2003). COUTINHO (1970) verificou concentrações de TSS transportada pelo rio da ordem de 10-270mg/L, média de 64mg/L, com 62% de granulometria argilo-mineral — SANTOS (2007), por meio da avaliação granulométrica dos sedimento superficiais na região do pro-delta (região externa do estuário, aproximadamente 5 km da foz do RSF), identificou que 89% é silte e areia fina (2-63 $\mu$ m) e que os sedimentos possuem baixo teor de matéria orgânica. MABESSONE e TINOCO (1967, apud BARRETTO ; SUMMERHAYES, 1975, p.828) relatam concentrações médias de TSS de 60mg/L na foz do RSF, em Dezembro/1965. MILLIMAN (1975) aponta que na década de 70 o RSF transportava em média 75mg/L de TSS, decaindo para valores da ordem de 22mg/L (SANTOS, 1993), e, finalmente, atingindo valores médios em torno de 5mg/L, conforme MEDEIROS (2003) e KNOPPERS et al., (2006).

Ainda em Dezembro/1965, ao longo do eixo da pluma (Figura 6.1-b), as concentrações apresentaram um decréscimo mais do que exponencial em relação à distância da foz do rio (na foz: 60mg/L), com valores próximos de 10mg/L a uma distância de 5km, e de 0.7mg/L a 20km,

atingindo valores da ordem de 0.3mg/L a uma distância de 30km da foz, decréscimo aparentemente relacionado com o aumento da salinidade (Figura 6.1-a) (BARRETO ; SUMMERHAYES, 1975). Durante o período de alta vazão (verão), BARRETO ; SUMMERHAYES (1975) constataram que águas com salinidade inferiores a 35‰ estendiam-se por aproximadamente 280 km ao sul da foz do RSF, cobrindo a plataforma continental adjacente a uma distância de 20 km da costa;

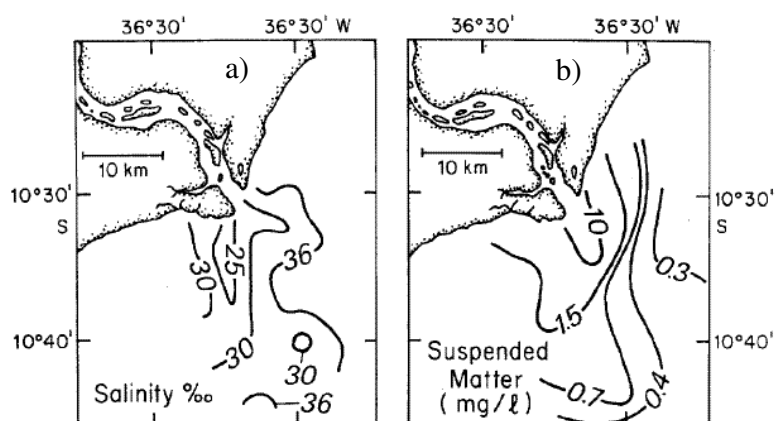


Figura 6.1 – Foz do Rio São Francisco. Concentrações superficiais de salinidade (a) e total de sólido em suspensão em mg/L (b) em Dezembro de 1965. Fonte: BARRETO ; SUMMERHAYES (1975).

alcançando no máximo 10 km ao norte da foz do RSF. CAVALCANTI (1967, apud BARRETO ; SUMMERHAYES, 1975, p.824) verificaram, durante o inverno, águas com salinidades inferiores a 35‰ a uma distância de até 40 km ao norte da foz do RSF, provavelmente devido à contra-corrente costeira que se estabelece nessa época do ano.

MEDEIROS et al. (2007) apontam, com dados das campanhas de campo realizadas nos anos de 2000 a 2002, que o TSS exibe um comportamento não-conservador, com ganho expressivo em relação à salinidade na porção da zona de mistura estuarina mesohalina (salinidade > 5‰ e < 20‰) localizada entre a foz do RSF até 8 km afora, também considerada zona de máxima turbidez (MEDEIROS et al., 2007). Nesta faixa estreita do pró-delta, detectou-se um incremento de TSS de 10mg/L a 40 mg/L aos teores da fonte fluvial devido aos processos de ressuspensão costeira (a Figura 5.11-f mostra claramente esse fenômeno). Após a região de máxima turbidez, as concentrações diminuem de forma exponencial em relação ao eixo principal

de deslocamento da pluma. No setor intermediário da pluma de turbidez, entre aproximadamente 8 e 20 km da foz, predominam os processos de dispersão e sedimentação gradativa de TSS ao fundo, e na frente da pluma a diluição pelas Águas Tropicais de Superfície e da Corrente Sul Equatorial com salinidades superiores a 35‰.

Vemos que a pluma do RSF no período anterior a construção das barragens (principalmente as barragens de Sobradinho, Itaparica e Xingo) apresentava um potencial de dispersão de matéria bastante expressivo durante os períodos de alta vazão, enquanto que nos períodos de baixa vazão, a pluma do RSF tinha seu alcance reduzido e comportamento semelhante ao descrito por MEDEIROS et al. (2007): estes, apresentam a pluma do RSF como restrita à região costeira, alcance de aproximadamente 30 km ao longo de seu eixo principal e baixas concentrações de material em suspensão nas regiões *offshore*, menos de 0.5 mg/L — segundo JACOBS ; EWING (1969) as concentrações de material em suspensão nas regiões oceânicas abertas geralmente são próximas de 0.1 mg/L.

O decréscimo quase exponencial na carga de TSS, ao longo da pluma do RSF, apontado por BARRETO ; SUMMERHAYES (1975) e MEDEIROS (2003), é consequência das diversas etapas de transformação, dispersão e sedimentação que o transporte do material em suspensão ao longo do gradiente estuarino até a plataforma continental sofre. Segundo DAGG et al. (2004), a maiores transformações ocorrem na faixa de salinidade entre 0 e 5, principalmente devido à mudanças da carga elétrica das partículas, resultando em floculação e agregação, que aumentam a densidade das partículas e favorecendo a deposição. De acordo com o diagrama clássico de Hjulström (Figura 3.2), os sedimentos arenosos são os primeiros a se depositarem, ao passo que os sedimentos finos (argilo minerais) permanecem em suspensão por muito mais tempo, devido principalmente a sua forma plana e sua menor densidade.

O diagrama apresentado na Figura 6.2 mostra a trajetória das partículas em função do tamanho das partículas e para um estuário típico de macro-maré (TURNER ; MILLWARD, 2002); embora simplificado, o diagrama leva em consideração a circulação estuarina residual e a velocidade de deposição da partícula (conforme apresentado no diagrama de Hjulström, Figura 3.2). A partir do diagrama da Figura 6.2, e levando em consideração que a foz do RSF é dominada por meso-maré e que nessa região há o predomínio de granulometria predominantemente siltosa (2-63  $\mu\text{m}$ ; SANTOS, 2007), podemos inferir que a pluma típica do RSF estende-se não muito além dos 30 km, exceto para os períodos de eventos extremos onde o



alcance da pluma supera os 100 km de extensão, impulsionada pela pressão hidráulica associada à alta vazão.

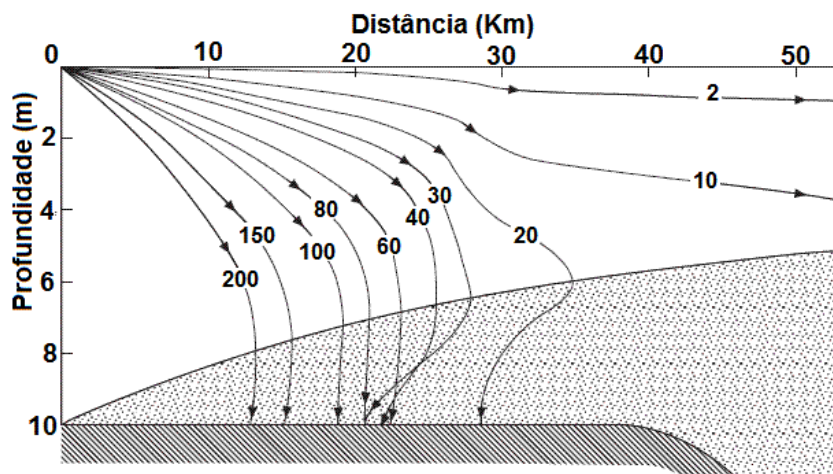


Figura 6.2 – Cálculo das trajetórias das partículas em suspensão em função da variabilidade granulométrica para um estuário típico de macro-maré. Fonte: adaptado de TURNER e MILLWARD (2002).

Atualmente, os eventos extremos pós regularização da vazão, de certa forma, simulam a sazonalidade que o RSF apresentava antes das construções das barragens e contribuem para o restabelecimento parcial das condições anteriormente vigentes (estendendo o alcance da pluma muito além dos 30 km), fornecendo para a região costeira um aporte extra de TSS e elementos biogênicos. Entretanto, o aporte de matéria para o estuário do RSF devido aos eventos extremos pode assumir características distintas, dependendo das configurações pré-estabelecidas no instante anterior à ocorrência do evento (por exemplo: estresse hídrico da região, nível dos reservatórios) e da localização geográfica do regime de precipitação que originou a enchente.

O regime diferenciado de precipitação, concentrado ao longo de toda a bacia para o período de 2004 e em estágios para o período de 2007 (primeiro no setor Alto e Médio e depois nos setores Baixo-Médio e Baixo da bacia de drenagem), Figura 5.13, fizeram com que a enchente de 2004 fosse mais expressiva em termos de aporte de TSS do que em 2007, permitindo um pico de vazão superior para o ano de 2004, porém menos persistente do que o pico de vazão de 2007 (Figuras 5.7-c,d). Outro evento que certamente contribuiu para maiores concentrações de TSS em Jan-Fev/2004 foi a grande estiagem (crise energética de 2001, conhecida como “Apagão”) que precedeu esse período e que reduziu drasticamente o nível dos reservatórios. As chuvas intensas ocorridas no início de 2004 fizeram com que o nível de água dos reservatórios

excedesse, lavando os setores da bacia do RSF castigados pela seca, transportando o material acumulado no solo durante o período de seca para o leito do rio e, em última instância, para a região estuarina do RSF.

Ou seja, eventos de cheias na foz do RSF podem ser gerados em diversos setores da sua ampla bacia de drenagem que incorpora três regiões climáticas distintas. Cheias com vazões semelhantes podem gerar plumas com turbidez diferenciada, dependendo do impacto do local do evento climático na bacia. Uma cheia gerada no semi-árido acarreta maior turbidez devido a lavagem dos solos com vegetação escassa; cheias geradas no setor úmido (setor Alto da bacia) acarreta menor turbidez das plumas em função da retenção de TSS pelas barragens. Os eventos extremos ocorridos em 2004 e 2007 são exemplos claros dessa variabilidade (Figuras 5.11 e 5.12).

Aqui abordamos as variações da carga de TSS transportada pelo RSF ao longo das últimas décadas, assim como os eventos extremos e suas peculiaridades pertinentes ao transporte de TSS. A importância desse tema reside não só no sedimento em si, mas no material associado ao sedimento, tais como contaminantes, elementos traços, nutrientes e carbono orgânico (GEYER et al., 2004; DAAG et al., 2004), que, de maneira geral, têm maior impacto localmente e globalmente. Entender o transporte do TSS pelas plumas fluviais e sobre a margem continental contribui para uma melhor estimativa da taxa de remineralização e deposição do carbono orgânico. Similarmente, a distribuição dos contaminantes nos ambientes estuarinos e marinhos está intimamente relacionada aos processos de transporte do sedimento; planos de gerenciamento e mitigação em ambientes expostos a contaminantes necessitam de um entendimento abrangente dos mecanismos de transporte do TSS.

### 6.3 DINÂMICA DA PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO E A BIFURCAÇÃO DA CORRENTE SUL EQUATORIAL

As alterações do campo de corrente oceânico superficial da borda oeste do Atlântico Sul, devido à migração da bifurcação da CSE, exercem aparentemente uma influência significativa, favorecida pela pouca extensão da plataforma continental, nas águas costeiras próximas à foz do RSF (Figuras 5.22-a,b,c,d). A migração da bifurcação tem uma relação estreita com o sinal sazonal do regime dos ventos alísios. Os alísios, por sua vez, modulam o

campo de vento nas adjacências da foz do RSF, imprimindo características espaciais e temporais bastante variáveis e muitas vezes discrepantes do sinal sazonal responsável pela migração da CSE (DOMINGUEZ et al., 1992; RODRIGUES et al., 2006).

As correntes estuarinas e costeiras geralmente são geradas pelo vento, maré, gradiente de pressão (forçantes baroclínicas) e geomorfologia costeira (WRIGHT ; NITTROUER, 1995). A baixa descarga fluvial e a mistura das águas costeiras pelo regime intenso de ondas na região do RSF, minimizam a importância da componente baroclínica para o campo de corrente local; a maré exerce mais importância nos processos de ressuspensão e erosão costeira e no bombeamento de matéria para as porções interna e externa do estuário, não contribuindo para o padrão de dispersão médio mensal da pluma; a geomorfologia costeira da foz do RSF, como visto na discussão dos 4 sistemas fluviais, associada aos ventos de NE, promovem o transporte de *Ekman* e desassocia a pluma da costa, impulsionando o transporte *offshore*. Os ventos que sopram ao longo do ano na região são determinantes para a configuração espacial e temporal da pluma do RSF e das águas costeiras adjacentes (BITTENCOURT et al., 2005, 2002; DOMINGUEZ, 1996; GEF, 2002b; KNOPPERS et al., 2006; MEDEIROS et al., 2007).

Se por um lado temos o sinal sazonal dos ventos alísios regendo a migração da CSE e interferindo na corrente da borda oeste do Atlântico Sul, por outro, temos os ventos locais incidentes na região estuarina do RSF e determinando as correntes costeiras aí verificadas. As conseqüências dessa dinâmica são particularmente importantes, pois, alterando as direções, as massas de águas costeiras e oceânicas são expostas à diferentes fluxos superficiais de mistura, mudando suas propriedades de forma variadas. Por exemplo, a persistência dos ventos de SE que atinge a região costeira da foz do RSF durante o inverno, propicia condições similares de escoamento superficial entre a corrente costeira e a corrente da borda oeste do Atlântico Sul, estimulando, sobre a plataforma adjacente ao rio, um fluxo menos dispersivo do que o observado durante a estação de outono (Figura 5.22-b,c). Nessa, as oscilações mais freqüentes da direção do vento local, e conseqüentemente da corrente costeira, promove maior aporte de matéria costeira para a região oceânica (por exemplo: os ventos de NE e o transporte de *Ekman* desvinculando a pluma do RSF da região costeira).

Durante os meses de setembro a novembro (primavera) há um aumento na capacidade de transporte de água das correntes Sul Equatorial e Corrente do Brasil. Nessa época, a bifurcação da CSE encontra-se na sua posição mais ao norte, 10°S, incidindo diretamente sobre a

foz do RSF — embora mais comuns nos meses de setembro a novembro, o fenômeno observado pode ser antecipado ou retardado, dependendo de todo um mecanismo de escala continental, como por exemplo, a migração da ZCIT (RODRIGUES et al., 2006). Também, na primavera, o regime de vento local que atinge o estuário passa a incidir preferencialmente de leste, e a corrente da borda oeste do Atlântico Sul tende a fluir de norte para sul na região imediatamente à frente do estuário do RSF (Figura 5.22-a,d). Estes fatores, tal como a maior capacidade de transporte de águas da CSE, direção de deslocamento da corrente da borda oeste do Atlântico sul no sentido norte-sul, e ventos mais frequentes de leste, compõem uma dinâmica superficial favorável para um avanço das massas d'água oceânica sobre a plataforma adjacente ao RSF, e, conseqüentemente, recuo das águas costeiras sobre a plataforma.

Se por um lado o regime de vento mais intenso do segundo semestre ocasiona maior ressuspensão costeira, por outro, a tendência mais dispersiva apresentada pela dinâmica superficial sobre a plataforma continental adjacente ao RSF durante os meses de Fevereiro e Março favorecem o transporte de matéria *offshore*. Ou seja, a época do ano que mais promove a dispersão de matéria sobre a plataforma foi justamente a que mais sentiu os impactos devido aos reservatórios, já que a vazão e o transporte de matéria que eram mais expressivos durante os meses de Fevereiro e Março foram drasticamente reduzidos.

#### 6.4 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RSF E ÁGUAS COSTEIRAS ADJACENTES

Diferente de outros sistemas fluviais da costa leste brasileira, onde a descarga tem papel relevante no aporte de matéria para a região estuarina — como, por exemplo, os rios Paraíba do Sul e Doce (CARNEIRO, 1998; COELHO, 2006) —, a vazão do RSF, tamponada pela cascata de barragens, não apresentou correlação significativa com os principais constituintes opticamente ativos da água, evidenciando o total desacoplamento entre a vazão e o transporte de matéria (Tabela 5.4), fato este observado em estudos anteriores (MEDEIROS, 2003; KOPPERS et al., 2006).

A pluviosidade na bacia de drenagem do RSF, quando não associada a eventos extremos, também não implica em maiores concentrações de TSS para a pluma do rio, processo evidenciado pela correlação não significativa entre o TSS e a precipitação (Tabela 5.4),

reafirmando o potencial retentor dos reservatórios no transporte do material particulado em suspensão para a região jusante. Por outro lado, correlações significativas entre os coeficientes  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  e a precipitação (Tabela 5.4) revelam a capacidade de fertilização que o rio ainda exerce, principalmente durante os meses de fevereiro/março, caracterizados por chuvas mais intensas na bacia do RSF — MEDEIROS, 2003, constatou, nesse período, a influência do RSF no enriquecimento de nutrientes do ambiente oceânico adjacente e o aumento da produtividade primária.

Segundo BESSA ; PAREDES (1990), o regime pluviométrico, principalmente na região semi-árida, faz uma certa quantidade de água ser escoada superficialmente e/ou lixiviada através do solo. Essas águas, enriquecidas em substâncias orgânicas e inorgânicas, são levadas ao canal principal do rio através de seus tributários. Como o RSF é seccionado por várias barragens, os materiais por ele transportados ficam sujeitos a uma maior residência nestas, onde são conseqüentemente submetidos a vários processos físico-químicos típicos das condições lênticas. Entretanto, nos reservatórios, espera-se que este material, principalmente o material dissolvido, precipite parcialmente nas áreas de menor profundidade, porém, nas áreas mais profundas eles continuarão em solução e seguindo o curso à jusante. Ao misturar com as águas marinhas ocorre a diluição e os processos físico-químicos característicos das regiões costeiras, suprimindo em parte a carência de elementos biogênicos limitadores da cadeia trópica primária, alterando as propriedades das águas adjacentes à foz do RSF e estabelecendo as feições identificadas por meio das variações de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  ao longo do ciclo anual. FERNANDES et al. (2008) também inferiram aumento das concentrações de CDOM durante o período de maior pluviosidade no setor jusante da bacia do rio Paraíba do Sul; a precipitação na bacia de drenagem do rio Mississippi é apontada como um dos agentes responsáveis pelos maiores valores de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  na região costeira adjacente à foz do rio (GREEN ; GOULD, 2008; GREEN et al., 2008).

Os setores Alto e Médio da bacia de drenagem, devido à distância da região costeira e a e as barragens ali localizadas, exercem menor influência no aporte de matéria para o estuário do RSF. Entretanto, durante a estação chuvosa, o grande volume de água oriundo dessas regiões contribuem para o restabelecimento dos níveis dos reservatórios à jusante, minimizando o tempo de residência das águas nesses reservatórios, e, conseqüentemente, do material em suspensão, principalmente quando a precipitação nos setores Médio-Baixo e Baixo é intensa e

concomitante, ou imediatamente subsequente, à precipitação nos setores Alto e Médio, caso esses observados nas cheias de 2004 e 2007.

As correlações significativas (Tabela 5.4) observadas entre o vento e o TSS confirmam a importância do vento como agente determinante na distribuição do TSS, condicionando os processos de erosão, ressuspensão e dispersão de matéria na região costeira adjacente à foz do RSF. O campo de onda intenso, gerado pelos ventos frequentes da região, promove a mistura das águas fluviais e oceânicas, alterando o comportamento dos constituintes inorgânicos e orgânicos dissolvidos, estimulam os processos físicos-químicos de floculação e agregação que agilizam a deposição do material em suspensão (DAGG et al., 2004, KNOPPERS et al., 2006). O bombeamento da maré também contribui para a ressuspensão e erosão costeira (MEDEIROS et al., 2007), porém, atua numa frequência temporal distinta do regime de ventos (GEYER ; KINEKE, 2004) e não determina o padrão dispersivo observado nas séries temporais de médias mensais aqui analisadas. Segundo SANTOS (2007), as alterações hidrodinâmicas devido às barragens, como regularização da descarga fluvial e baixa reposição de sedimento junto à costa, fortalecem os processos erosivos.

A inversão da trajetória da pluma do RSF durante o inverno, de sul para norte, e o comportamento exportador observado durante o outono, estão diretamente associados ao regime de vento local de SE e NE, respectivamente. Particularmente, a geomorfologia costeira da foz do RSF, associada aos ventos de NE, favorece o transporte de *Ekman* e o deslocamento da pluma na direção *offshore*. Estudos conduzidos nas plumas dos rios Columbia (ANDREW ; WEATHERBEE, 2006) e Niagara (MASSE ; MURTHY, 1990) também evidenciam o papel desempenhado pelo transporte de *Ekman* no aporte de matéria para regiões *offshore* sob condições de ventos favoráveis. Situação similar, porém com efeito contrário, foi observado sobre a plataforma continental do estado da Louisiana/USA: o transporte de *Ekman* condiciona o transporte para a região *onshore* (SALISBURY et al., 2004).

Correlações positivas e significativas observadas entre o vento e os coeficientes  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  sugerem fertilização costeira pelo material ressuspenso. Porém, é difícil dizer se o material ressuspenso contribui para a fertilização costeira, já que durante o segundo semestre do ano (ventos mais intensos) as propriedades ópticas  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  apresentam valores decrescentes; além disso, o regime pluviométrico que atinge o setor baixo da bacia do RSF, durante os meses de junho a agosto (maior ressuspensão costeira), interfere nas variações

das propriedades ópticas da água. De qualquer forma, o regime de vento determina a distribuição espacial da pluma do RSF e o transporte de matéria na região, estimulando a solubilização de nutrientes e material biogênico ao longo do gradiente salino.

Trabalhos anteriores apontam a produção autóctone como responsável pelo acréscimo de fitoplâncton, detritos e matéria orgânica dissolvido nas adjacências do estuário do RSF, principalmente durante o período de maior pluviosidade na bacia de drenagem, ou imediatamente subsequente (BARRETO ; SUMMERHAYES, 1975; JENNERJAHN ; ITTEKKOT, 1999; BESSA ; PAREDES, 1990). A correlação positiva significativa entre o  $a_{ph}(443)$  e as variáveis  $a_{CDOM}(443)$ ,  $a_{sd}(443)$  e TSS (Tabela 5.4) parece reforçar a hipótese da contribuição autóctone para a variabilidade dos constituintes opticamente ativos da região.

Como observado, a pluviosidade na bacia de drenagem do RSF favorece os constituintes  $a_{ph}(443)$  e  $a_{CDOM}(443)$ , por outro lado, os reservatórios restringem o aporte do material particulado inorgânico (reservatórios: limita as concentrações de TSS); admitindo que a ressuspensão costeira (ressuspensão: aumenta as concentrações de TSS, porém, rápida deposição) é pouco relevante para a fertilização da região, a correlação observada entre o  $a_{ph}(443)$  e o TSS sugere que há um acréscimo de material detrítico gerado pela produtividade primária local.

O coeficiente de absorção do sedimento/detrimento,  $a_{sd}(443)$ , representa a soma de duas componentes individuais: absorção do sedimento inorgânico,  $a_s(443)$ , e absorção do material detrítico de origem orgânica,  $a_d(443)$ . Em áreas rasas e próximas à fontes fluviais, prevalece a componente  $a_s$ , nas regiões mais profundas e afastadas da costa, a componente  $a_d$  domina. Portanto, nas regiões onde há interferências de ambas as componentes, espera-se a co-variância das propriedades  $a_{sd}(443)$ ,  $a_{ph}(443)$ , e TSS. Porém, isso não elimina a possibilidade de feições aparentemente opostas entre essas propriedades, desde que uma delas prevaleça mascarando parcialmente a contribuição da outra.

É interessante observar as variações dos coeficientes  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  e o coeficiente  $a_{sd}(443)$  ao longo das estações do ano (Figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30). Enquanto as propriedades  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  apresentam tendência de expansão sobre a plataforma durante o verão/outono (Figura 5.27), na propriedade  $a_{sd}(443)$ , essa tendência de expansão (embora de menor amplitude) revela-se no inverno/primavera (Figura 5.30). Diversos fatores influenciam esse comportamento: os reservatórios, a qualidade do material em suspensão, o regime de ventos e a hidrodinâmica costeira.

Apesar de não ser restrito a uma estação específica do ano, os impactos dos reservatórios são mais notáveis durante as estações chuvosas (verão/outono). O processo seletivo do material em suspensão devido às barragens atua na qualidade do material que chega ao estuário do RSF, limitando principalmente o material inorgânico de granulometria mais grossa. Essa alteração, de maneira geral redutora, na qualidade do material em suspensão, ainda permite a fertilização da região costeira com nutrientes e material dissolvido (CDOM), substâncias que apresentam maior tempo de residência na coluna d'água e são facilmente exportadas para a região oceânica (principalmente quando os ventos de NE favorecem o transporte de *Ekman*), expandindo o alcance dos constituintes ópticos CDOM e fitoplâncton sobre a plataforma. A ressuspensão costeira também não está restrita a uma estação do ano específica, porém, é menos significativa durante o verão/outono. Nessas estações, essas condições fazem com que as isolinhas das propriedades ópticas  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  estejam mais afastadas da costa, Figura 5.27, e têm efeito contrário na propriedade óptica  $a_{sd}(443)$ , Figura 5.30.

No período de inverno/primavera temos como diferencial as chuvas de menor intensidade localizadas predominantemente no setor baixo da bacia do RSF (menor impacto devido às barragens, porém, redução da fertilização costeira pelo aporte fluvial) e regime de vento mais intenso (maior ressuspensão costeira). Ou seja, prevalece a propriedade óptica  $a_{sd}(443)$  dominada pelo material particulado inorgânico.

De maneira geral, a propriedade óptica  $a_{sd}(443)$  é predominantemente dominada pelo material particulado inorgânico nas regiões aquém da isóbata de 20m. Esse material apresenta rápida deposição, e está mais sujeito aos processos costeiros de ressuspensão e deriva litorânea promovidos pelo regime de ondas (ventos) sazonal da região. Entretanto, na região imediatamente à frente da foz do RSF, as isolinhas do  $a_{sd}(443)$  apresentam o mesmo alcance sobre a plataforma independente da estação do ano (Figura 5.30). Este comportamento sugere, na região delimitada pela elipse pontilha da Figura 5.30, uma hidrodinâmica dominada pelo aporte fluvial constante e regularizado do RSF, apesar da intensa ressuspensão costeira aí verificada (MEDEIROS, 2003).

Podemos dizer que a elipse representa o tamanho médio da pluma do RSF, com alcance de 30 km ao longo do eixo principal de deslocamento, e 10 km ao longo do eixo secundário. Essas dimensões estão em perfeito acordo com os valores propostos por MEDEIROS (2003) e BARRETO e SUMMERHAYES (1975; período de baixa vazão). Lembrando que a extensão da



pluma está sujeito ao parâmetro óptico escolhido, por exemplo, o  $a_{CDOM}(443)$  apresenta maior potencial de transporte em função do maior tempo de residência na coluna da água. No entanto, a deposição rápida do material particulado inorgânico em suspensão expõe os limites de influência dos mecanismos de transporte diferenciados, mecanismos estabelecidos pelo fluxo fluvial constante do RSF e o regime de onda (vento) sazonal da região.

Mudança ocasionada por eventos que ocorrem em escala continental (condicionando a migração da bifurcação da CSE) e local (alta variabilidade da direção do vento durante o outono, maior persistência dos ventos de SE durante o inverno, e ventos de E durante a primavera) também condicionam a dinâmica sobre a plataforma, contribuindo para alterar a configuração da hidrodinâmica costeira que migra de um regime mais exportador (outono) para um regime menos exportador (primavera).

De maneira geral, ao longo do ano, as variações observadas nos principais constituintes opticamente ativos caracterizam as feições predominantes das massas d'água sobre a plataforma adjacente à foz do RSF. Há uma sucessão dos constituintes, relacionada ao regime de ventos e de precipitação na bacia de drenagem do rio. De maneira que, no verão a componente CDOM prevalece, no outono, predomina o CDOM e o fitoplâncton, no inverno, sedimento, fitoplâncton e CDOM possuem contribuições similares, e na primavera, predomina o sedimento/detrito.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento da plataforma continental e plumas estuarinas é complicado devido a fatores peculiares das regiões costeiras. Diferente das regiões oceânicas, nas regiões costeiras a variabilidade dos processos físicos é entrelaçada pelo forte acoplamento de fenômenos dinâmicos diversos, tais como correntes de maré, circulação costeira eólica, ressurgências, aspectos geomorfológicos, descarga fluvial, etc. Geralmente os processos possuem alta frequência temporal, dificilmente resolvida pelo método convencional de amostragem baseado em cruzeiros oceanográficos. Nesse contexto, o sensoriamento remoto, com sua alta resolução espacial e temporal, é potencialmente ideal para situações onde é necessário uma alta frequência de amostragem, como é o caso das plumas fluvias.

Inerente ao sensoriamento remoto, as fontes de erros são variadas e difíceis de correção, alguma vezes impossíveis. As contribuições podem surgir de fontes diversas, como por exemplo:

da degradação do sensor a bordo do satélite, reduzindo a resolução radiométrica; da correção atmosférica, que remove uma boa parte do sinal indesejável, mas não todo o ruído; das áreas rasas, onde a reflectância do fundo contribui para o sinal radiométrico; da amostragem discreta dos dados coletados *in situ* utilizados para calibrar/aferir os algoritmos bio-ópticos, enquanto a medida de sensoriamento remoto integra a coluna d'água; da agitação do mar, contribuindo para o aumento de bolhas e espumas que interferem no sinal remoto; da cobertura de nuvens, que limita o número de imagens disponível, reduzindo a resolução temporal. Embora nesse trabalho a interferência do fundo tenha sido negligenciada, o alcance dessa interferência restringe-se a zonas bastante próximas da costa, e não compromete as principais análises desenvolvidas.

Estudos recentes na área de sensoriamento remoto aplicado à cor do oceano, mostram uma tendência no uso de algoritmos semi-analíticos e quase analítico que, por meio da inversão da equação de transferência radioativa, extraem as Propriedades Ópticas Inerentes, IOP's. Essas propriedades são geralmente utilizadas para a estimativa de parâmetros biogeoquímicos chaves, por exemplo a concentrações de clorofila-a, matéria orgânica e inorgânica dissolvida, CDOM, carbono orgânico particulado, entre outros. Os sensores atuais, tais como o SeaWiFS e o MODIS, oferecem um conjunto mínimo de bandas espectrais que possibilitam essa inversão.

A porcentagem de erro associada ao processo de extração das IOP's utilizando o algoritmo quase analítico QAA é próxima de 10% para o coeficiente de absorção total,  $a_t$ , e 18% para ambos os coeficientes  $a_{ph}$  (absorção fitoplâncton) e  $a_{CMD}$  (absorção matéria dissolvida colorida e detrito) (LEE et al., 2002). Por lidar puramente com grandezas físicas, a aplicabilidade do algoritmo QAA independe do tipo de água, pois as características específicas dos parâmetros geoquímicos, parâmetros que determinam as variabilidades das IOP's, não são relevantes no processo de extração dessas propriedades.

Com os progressos científicos derivados dos dados de sensoriamento remoto e a aceitação generalizada dos impactos antrópicos na qualidade das águas costeiras, a permanência e continuidade dos satélites oceanográficos destinados ao monitoramento biogeoquímicos dos sistemas aquáticos tem prioridade. Além dos atuais, novos sensores para o monitoramento da cor do oceano já estão programados para lançamento nos próximos dois anos, como por exemplo, o *Ocean Color Monitor* (OCM-2, Índia) e o *Visible-Infrared Imaging Suite* (VIIRS, Estados Unidos) (McCLAIN, 2009). Esses prometem incorporar recentes avanços científicos na área da óptica oceanográfica, minimizando erros e ampliando a capacidade de discernimento dos

constituintes opticamente ativos presentes na água. Por exemplo, bandas adicionais na região do ultra-violeta permitirão discernir melhor as contribuições devida ao material detrítico, fitoplâncton e CDOM; e a correção atmosférica das imagens de satélites serão favorecidas com acréscimos de bandas centradas na região do infra-vermelho próximo, reduzindo o erro.

Finalmente, com a melhora da qualidade dos dados de sensoriamento remoto da cor do oceano, a assimilação dessa informação em modelos físicos-biogeoquímicos promoverá descrições mais detalhadas e corretas dos fluxos e interações representativas dos processos ambientais.

## 7. CONCLUSÃO

1) De maneira geral, os algoritmos implementados para as estimativas das propriedades ópticas inerentes e do total de sólido em suspensão mostraram-se bastante satisfatórios; as variações dos parâmetros estimados por meio das imagens de satélites apresentaram concordância com os valores das respectivas variáveis coletadas *in situ*.

2) Na análise das plumas dos quatro sistemas fluviais (RSF, SCC RD e RPS), apenas o RSF não apresenta o acoplamento entre a vazão e o transporte de sedimento. As barragens são apontadas como o principal agente mitigador do aporte de material para a região costeira. O padrão de deslocamento das plumas dos quatro sistemas segue o fluxo da deriva litorânea, acompanhando a inclinação da linha de costa, com direção norte/sul durante o verão, e sul/norte durante o inverno, devido ao regime dos ventos alísios que condicionam as correntes litorâneas da região estudada. Nas demais estações do ano existe uma transição desse padrão de deslocamento, com predomínio da direção norte/sul. A morfologia costeira, o regime de ventos e a descarga fluvial condicionam fortemente o padrão de dispersão das plumas na costa leste brasileira. Particularmente o alinhamento do campo de vento de NE com a direção da linha de costa favorece a propagação da pluma sobre a plataforma continental. Caso este observado para as plumas dos rios São Francisco e Doce, caracterizando-os como sistemas exportadores de matéria para a plataforma continental leste brasileira. Já o SSC e o RPS apresentam características de sistemas retentores, com suas plumas confinadas à costa.

3) Os eventos extremos pós-construção barragens simulam a sazonalidade que o RSF possuía antes da construção das barragens, e possuem caráter diverso em função do regime de

precipitação (a jusante ou montante da cascata de barragens) e das condições pré-estabelecidas na região (estresse hídrico, nível de água dos reservatórios) no momento anterior ao evento.

4) A pouca extensão da plataforma continental adjacente à foz do RSF, sujeita essa região às interferências oriundas da bifurcação da CSE, já que esta possui sua sazonalidade ditada pelo regime dos ventos alísios e modula o campo de corrente da região. O transporte de TSS ao longo do eixo principal da pluma do RSF é mais expressivo durante o segundo semestre do ano devido ao regime de vento mais intenso nesse período que favorece maior ressuspensão costeira, exceto quando há ocorrência de eventos extremos no primeiro semestre. Entretanto, as feições identificadas por meio das variações de  $a_{CDOM}(443)$  e  $a_{ph}(443)$  apontam para maiores concentrações de CDOM e de fitoplâncton durante o primeiro semestre de cada ano, permanecendo mais insistentemente, porém não exclusivamente, durante os meses de Fevereiro/Março e Junho/Julho, evento relacionado com o regime da precipitação na bacia de drenagem do RSF.

5) As massas d'água na plataforma adjacente à foz do RSF alternam suas características em termos das concentrações de TSS, CDOM e fitoplancton. Durante o verão, observa-se o predomínio do constituinte óptico CDOM; no outono, predomina CDOM e fitoplancton; no inverno, sedimento, fitoplancton e CDOM possuem contribuições similares; na primavera, predomina o sedimento/detrimento. A estação de outono possibilita maior exportação de matéria sobre a plataforma; a estação de primavera retém o material em suspensão mais junto à costa.

6) Os estudos e trabalhos executados na região do RSF em épocas anteriores trouxeram à tona novas abordagens e entendimentos sobre os processos que se sucederam ao longo dos anos na bacia e na foz do RSF, porém, de maneira geral, privilegiando abordagens pontuais. No presente trabalho, buscamos o sensoriamento remoto para identificar as transformações e processos que são capturados a partir de um ponto de vista espacial e temporal amplo, o que nos permitiu diagnosticar padrões sazonais de dispersão dos constituintes opticamente ativos que conferem cor ao oceano e têm importância ímpar nos ciclos biogeoquímicos costeiros.

## BIBLIOGRAFIA

ANDREW, C.T.; WEATHERBEE, R.A.; Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume. *Remote Sensing of Environment*, v.100, p.167-178, 2006.

AMOS, C.L. ; ALFOLDI, T.T.; The determination of suspended sediment concentration in a macrotidal system using LANDSAT data. *J. Sedim. Petrol.*, v.49, n.159. 1979.

ANA, Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>, 03/Nov/2008.

ANA – Projeto ANA/GEF/PNUMA/OEA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gefsf/>>, 04/Nov/2008.

ANA - ANA/GEF/PNUMA/OEA. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco, Subprojeto 4.5C-Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-20013) , Brasília, DF, Abril, 2004.

ANA - ANA/GEF/PNUMA/OEA. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 1.1A – Estudo hidrodinâmico-sedimentológico do baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente-AL/SE, Brasília, DF, Março, 2003.

ARNONE, R.A.; MARTINOLICH, P.; GOULD, R.W.; SYDOR, M.; STUMPF, R.; LADNER, S.; Coastal optical properties using SeaWiFS, Meeting proceedings, Ocean Optics XIV, Kona, HA, November. 1998.

BABIN, M., STRAMSKI, D.; FERRARI, G.M.; CLAUSTRE, H.; . BRICAUD, A.; OBOLENSKY, G.; HOEPFFNER, N.; Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe, *J. Geophys. Res.*, v.108, n.C7, p.3211, 2003.

BALZER, W; KNOPPERS, B.; Transport mechanisms of biogeochemical material, heavy metals and organic pollutants in east Brazilian Waters, large scale investigations. In: EKAU, W; KNOPPERS, B. Sedimentation processes and Productivity in the Continental Shelf Waters off East and Northeast Brazil - Joint Oceanographic Projects. Cruise Report and First Results. Bremen: Center for Tropical Marine Ecology. 151 p. Leg 1, 9-25. 1996.

BARRETTO, H.T.; SUMMERHAYES, C.P.; Oceanography and suspended matter of northeastern Brazil. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 45, n. 4, p.822-833, 1975.

BELANGER, S.; BABIN, M.; LAROUCHE, P.; An empirical ocean color algorithm for estimating the contribution of chromophoric dissolved organic matter to total light absorption in optically complex waters. *Journal of Geophysical Research*, v.113, n.C04027, 2008.

BESSA, M.F.; PAREDES, J.F.; Transporte do carbono e do nitrogênio orgânico e inorgânico dissolvido pelo rio são francisco , brasil, durante um ano hidrológico (1984-1985). *Geochim.Brasil.*, v.4, n.1, p.17-31, 1990.

BIGARELLA, J.J.; Eolian environments: their characteristics, recognition and importance. In: RIGBY, J.K. ; HAMBLIN, W.K. eds. *Recognition of Ancient Sedimentary Environments*. Oklahoma, Soe. Econ. *Paleont. Mineral*, p. 12-62. (Special Publ. 16). 1972.

BILLENG, G.; LANCELOT, C.; MEYBECK, M.; N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean. In: Bloomfield e Sanders (eds.); *Ocean Margin Processes in Global Change*. New Yourk: Plenum Press, p.19-44, 1991.

BISSETT, W.P., ARNONE, R., DEBRA, S., DIETERLE, D.A., DYE, D., KIRKPATRICK, G.J., SCHOFIELD, O.M., VARGO, G.A.; Predicting the optical properties of the West Florida Shelf: resolving the potential impacts of a terrestrial boundary condition on the distribution of colored dissolved and particulate matter, *Marine Chemistry*, v.95, n.3-4, p.199-233, 2005.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; MARTIN L.; SILVA, I.R.; Longshore transport on the northeastern brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: an overview. *Marine Geology*, v.219, p.219-234. 2005.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN L.; DOMINGUEZ, J.M.L.; SILVA, I.R.; SOUSA, D.L.; A significant longshore transport divergence zone at the northeastern brazilian coast: implications on coastal quaternary evolution. Disponível em: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.74, n.3, p.505-518, 2002.

BONILLA, J.; SENIOR, W.; BUGDEN, J.; ZAFIRIOU, O.; JONES, R.; Seasonal distribution of nutrients and primary productivity on the eastern continental shelf of Venezuela as influenced by the Orinoco River, *Journal of Geophysic Research*, v.98, p.2245-2258, 1993.

BOWMAN, M.J.; ESAIAS, W.E.; Oceanic fronts in coastal processes, summary and recommendations. Proceedings of a workshop held at the Marine Sciences Research Center, May 25-27, New Yourk, 1977.

BRANDT, S.A.; Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* v. 40, p. 375-401, 2000.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L.; Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains, *Limnol. Oceanogr.*, v.26, n.1, p.43– 53, 1981.

BRICAUD, A., MOREL, A. AND PRIEUR, L.; Optical efficiency factors of some phytoplankters. *Limnol. Oceanogr.* v.28, p.816-832, 1983.

BRICAUD, A. AND STRAMSKI, D.; Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.* v.35, p.562-582, 1990.

BRUNE, G.M.; Trap efficiency of reservoirs. *Trans. Am. Geophys. Union*, v. 34, n. 3, p. 407-418, 1953.

CARDER, K.L., CHEN, F.R., LEE, Z.P., HAWES, S.K., KAMYKOWSKI, D.; Semi-analytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research*, v.104, p.5403-5421, 1999.

CARNEIRO, M.E.R.; **Transporte da Matéria Orgânica no Estuário do Rio Paraíba do Sul**. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geoquímica. Universidade Federal Fluminense, 1998, 200p.

CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B.; Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4N and 34S. In: Robinson, A.R.; Brink, K.H. (Eds). *The Sea*. v.11, p.209-252. New York: John Wiley & Sons, 1998.

CHANG, G.C.; GOULD, R.W. JR.; Comparisons of optical properties of the coastal ocean derived from satellite ocean color and *in situ* measurements. *Optics Express*, v. 14, n. 22, 2006.

CHESF – Companhia Hidroelétrica do Rio São Francisco. Disponível em: <[http://www.chesf.gov.br/energia\\_parquedeenergia\\_reservatorios.shtml](http://www.chesf.gov.br/energia_parquedeenergia_reservatorios.shtml)>. Acesso em: 23/11/2008.

CHIEN, N.; Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surf. Processes Landforms* v. 10, p. 143-159, 1985.

CLAUSTRE, H., HOOKER, S.B., HEUKELEM, L.V., BERTHON, J.F., BARLOW, R., RAS, J.; An intercomparison of HPLC phytoplankton methods using *in situ* samples: Application to remote sensing and database activities. *Mar. Chem.* v.85, p.41-61, 2004.

COELHO, A.L.N.; Situação hídrico-geomorfológica da bacia do rio doce com base nos dados da série histórica de vazões da estação de Colatina-ES. *Caminhos de Geografia – revista on line*. v.6, n.19. p.56-79. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Out/2006.

COSTA, G.; Caracterização Histórica, Geomorfológica e Hidráulica do Estuário do Rio Paraíba do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Instituto de Engenharia, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994, 97p.

CODEVASF Companhia de desenvolvimento do Vale do Rio São Francisco. *II. Plano de Desenvolvimento de Ação do Governo para o Vale do São Francisco 1975-1979*. Brasília, 1975, 184p.

COUTINHO, P.N.; Sedimentation at the mouth of the São Francisco River (Brazil): *Trab. Oceanogr.*, Universidade Federal Pernambuco, Recife, n. 9/11, p.41-50, 1970.

- DAGG, M., BENNER, R., LOHRENZ, S., LAWRENCE, D.; Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. *Continental Shelf Research*, v.24, p. 833-858, 2004.
- DAVIES, J.H.L.; A morphogenetic approach to world shorelines. *Z. Geomorphology*, v. 8, p. 127-142, 1964.
- DEPETRIS, P.J.; PAOLINI, J.E. Biogeochemical aspects of South American rivers: the Paraná and the Orinoco. P 105-125 in *Biogeochemistry of Major World Rivers*. Degens ,E.T.; Kempe, S.; Richey, J.E. (Editors). New York: John Wiley and Sons, 1991.
- DOMINGUEZ, J.M.L. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas. In: *Geology of Siliciclastic Shelf Seas. Geological Society Special Publication* v.117, p. 217-231, 1996.
- DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; Utilização de padrões de sedimentação costeira como indicadores paleoclimáticos naturais (proxies). *Revista Brasileira de Geociências*, v.24, n.1, p.3-12, 1994.
- DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L.; Controls on quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. *Sediment Geology*, v.80, p.213-232, 1992.
- DOXARAN, D.; CASTAING, P.; LAVENDER, S.J.; Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data. *International Journal of Remote Sensing*. v.27, n.11, p.2303-2321, 2006.
- DYER, K.R.; *Estuaries: A Physical Introduction*. London: Wiley Interscience. 1973, 140p.
- EVANS, R.H.; GORDON, H.R.; Coastal zone color scanner "system calibration: a retrospective examination. *Journal of Geophysical Research*, v.99, p.7293-7307, 1994.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. (2007). MERIS product handbook, from <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/>. Access time: 29/Nov/2007.
- FERNANDES, T.B.; AZEVEDO, W.C.S.; PEDROSA, P.; Sazonalidade óptica nas águas do rio Paraíba do Sul (Campos dos Goytacazes, RJ): referenciais métricos para o monitoramento de águas naturais. *Oecol. Bras.*, v.12, n.1, p.78-84, 2008.
- FOUGNIE, B.; FROUIN, R.; LECOMTE, P.; DESCHAMPS, P-Y.; Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance. *Applied Optics*, v.38, n.18, p.3844:3856, 1999.
- GARVER, A.H.; SIEGEL, D. A.; Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation. Time series from the Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.* v.102, p.18607-18625, 1997.



GARVINE, R.W.; Estuary plumes and fronts in shelf waters: a layer model. *Journal of Physical Oceanography*, v.17, p.1877-1896, 1987.

GARVINE R.W.; A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges. *Cont Shelf Res*, v.15, p.1585-1600, 1995.

GEF - Estuary Nutrient Load Determination and Assessment of the Use of Artificial Floods on its Control – Activity 1.1b. In: Integrated Management of Land Based Activities in the São Francisco River Basin Project, 2002a.

GEF - Estudo hidrodinâmico-sedimentológico do Baixo São Francisco, do estuário e da zona costeira adjacente (AL/SE). Projeto GEF São Francisco, Componente I, Sub-projeto 1.1a, 2002b.

GEYER, W.R.; HILL, P.S.; KINEKE, G.C.; The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research*, v.24, p.927-949, 2004.

GORDON, H.R.; Normalized water-leaving radiance: revisiting the influence of surface roughness. *Applied Optics*, v.44, n.2, p.241-248, 2005.

GORDON, H.R.; CLARK, D.K.; BROWN, J.W.; BROWN, O.B.; EVANS, R.H.; BROENKOW, W.W.; Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics*, v.22, n.1, p.20– 36, 1983.

GORDON, H.R.; CLARK, D.K.; Clear water radiance for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. *Applied Optics*, v.20, n.24, p.4175-4180, 1981.

GORDON, H.R.; BROWN, O.; EVANS, R.H.; BROWN, J.W.; SMITH, R.C.; BAKER, K.S.; CLARK, D.K.; A semianalytical radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research*, v.93, n.10, p.909-10924, 1988.

GORDON, H.R.; MOREL, A.; *Remote assessment of ocean colour for interpretation of satellite visible imagery: a review*. New York: Springer-Verlag, 1983, 114p.

GOULD, R.W. JR.; ARNONE, R.; SMITH, R.; LADNER, S.D.; MARTINOLICH, P.M.; Coastal transport of organic and inorganic matter from ocean color remote sensing. In *Proceedings: Oceanography Society Annual Meeting*, New Orleans, Louisiana, 2003.

GOULD, R. W.; ARNONE R. A.; Optical water mass classification for ocean color imagery. In *Proceedings: Second International Conference, Current Problems in Optics of Natural Waters*, I. Levin and G. Gilbert, eds., St. Petersburg, Russia, 2003.

GOULD, R.W., ARNONE, R.A., MARTINOLICH, P.M.; Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters. *Applied Optics*, v.38, n.12, p.2377-2383, 1999.

GOULD, R.W.; GREEN, R.E., MARTINOLICH, P., ARNONE, R.A.; Physical/optical relationships in the northern Gulf of Mexico, Ocean Color Research Team Meeting, poster, Newport, RI, 2006.

GOULD, R.W.; ARNONE, R.A.; SYDOR, M.; Absorption, scattering, and remote-sensing reflectance relationships in coastal waters: testing a new inversion algorithm. *Journal of Coastal Research*, v.17, n.2, p.328-343, 2001.

GOULD, R.W.; STAVN, R. H.; TWARDOWSKI, M. S.; LAMELA, G. M.; "Partitioning optical properties into organic and inorganic components from ocean color imagery," in Ocean Optics XVI, S. Ackleson and C. Trees, eds. (Office of Naval Research CDROM, 2002). 2002.

GOWER, J.F.R.; BORSTAD, G.A.; On the potential of MODIS and MERIS for imaging chlorophyll fluorescence from space. *International Journal of Remote Sensing*, v25, n.7,8, p.1459-1464, 2004.

GREEN, R.E.; GOULD, R.W.Jr.; A predictive model for satellite-derived phytoplankton absorption over the Louisiana shelf hypoxic zone: Effects of nutrients and physical forcing. *Journal of Geophysical Research*, v.113, n.C06005, 2008.

GREEN, R.E.; GOULD, R.W.Jr.; DONG, S.Ko.; Statistical models for sediment/detritus and dissolved absorption coefficients in coastal waters of the northern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, v.28 (10-12), p.1273-1285, 2008.

HAY, W.W. Detrital sediment fluxes from continents to oceans. *Chemical Geology* v. 145, p. 287-323, 1998.

HOEKSTRA, P.; River Outflow, Depositional Processes and Coastal Morphodynamics in a Monsoon-Dominated Deltaic Environment, East Java, Indonesia. Geografisch Instituut, Rijksuniversiteit Utrecht, Netherlands, 1988.

HOGBEN,N.; LUMB, F.E.; Ocean Wave Statistics. National Physical Lab., *Ministry of Technology*, London. 1967, 263p.

HOGUE, F.E.; LYON, P.E.; SWIFT, R.N.; YUNGEL, J. K.; ABBOTT, M.R.; LETELIER, R.M.; ESAIAS, W.E.; Validation of Terra-MODIS phytoplankton chlorophyll fluorescence line height. I. Initial airborne lidar results. *Applied Optics*, v.42, n.15, p.2767-2771, 2003.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>, 16/12/2008.

HOLYER, R..J.; Towards universal multispectral suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, v.7, p.323-338, 1978.

IGBP. Coastal Ocean Fluxes and Resources. In: HOLLIGAN, P. (ed.), *IGBP Report 14*, 1990.

IOCCG, 2006. Report number 5. Remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms, and applications. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group.

IOCCG, 2000. Report number 3. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group.

JENNERJAHN, T.C.; ITTEKKOT, V.; Changes in organic matter from surface waters to continental slope sediments off the São Francisco River, eastern Brazil. *Marine Geology*, v. 161, p.129-140, 1999.

JENNERJAHN, T.C.; ITTEKKOT, V.; CARVALHO, C.E.V.; Preliminary data on particle flux off the São Francisco river, Eastern Brazil. In: Ittekkot, V.; Schäfer, P.; Honjo, S.; Depetris, P.J. (eds). Particle flux in the ocean. London: Wiley, 1996, 215p.

JERLOV, N.G.; *Marine Optics*. Amsterdam: Elsevier, 1976, 231p.

KAMPEL, M.; Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na costa sudeste brasileira. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica). Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 2003, 279p.

KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M; O sensoriamento remoto da cor da água. In: Oceanografia por Satélite. São José dos Campos/SP. Oficina de Textos. 2005, 336p.

KANE, R. P.; Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in the rainfall of Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geof.* [online]. 1998, v. 16, n. 1, p. 37-52. Acesso em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X1998000100004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1998000100004&lng=en&nrm=iso)>, 1998.

KHORRAN, S.; Water quality mapping from Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*. v.2, p.145-154, 1981.

KINEKE, G. C.; STERNBERGD, R.W.; CACCHIONEK, D.A.; KRANCK, K.; DRAKE, D.; Distribution and characteristics of suspended sediment on the Amazon shelf. *Oceanography*, p421-426, 1991.

KIRK, J. T. O.; *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

KNOPPERS, B.A.; EKAU, W.; FIGEUIREDO, A.G.; The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. *Geo-Marine Letters*, v.19, p.171-178, 1999.

KNOPPERS, B.A.; MEDEIROS, P.R.P.; SOUZA, W.F.L.; JENNERJAHN, T.; The São Francisco Estuary, Brazil. In: WANGERSKY, P. (ed.), vol. 5- Water Pollution: estuaries. Berlin: Springer Verlag, 2005.

KNOPPERS, B.A.; MEDEIROS, P.R.P.; SOUZA, W.F.L. de; JENNERJAHN, T.; The São Francisco Estuary, Brazil. In: *HANDBOOK of Environment Chemistry*. Berli-Heidelberg: Springer-Verlag, v.5, Part H, p.51-70, 2006.

KRITIKOS, H.; YORINKS, L.; SMITH, H.; Suspended solids analysis using ERTS-A data. *Remote Sensing Environment*, v.3, n.1, p. 69-78, 1974.

LADNER, S.D.; SANDIDGE, J.C.; LYON, P.E.; ARNONE, R.A.; GOULD, R.W.; LEE, Z.P.; MARTINOLICH, P.M.; Development of Finer Spatial Resolution Optical Properties from MODIS. In: SPIE Optics and Photonics Meeting, San Diego, California/USA. Available from: <<http://www7333.nrlssc.navy.mil/outgoing/SPIE/>>. 2007.

LEÃO, Z.M.A.N. (1999). Disponível em: <<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio090/sitio090.htm>>. Acesso: 28/12/2008.

LEÃO, Z.M.A.N., DOMINGUEZ, J.M.L.; Tropical coast of Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v.41, p.112-122, 2000.

LEE, Z.P.; CARDER, K.L.; MOBLEY, C.D.; STEWARD, R.G.; PATCH, J.S.; Hyperspectral remote sensing for shallow waters I-A semianalytical model. *Appl.Opt.*, v.37, p.6327-6338, 1998.

LEE, Z.P.; CARDER, K.L.; STEWARD, R.G.; PEACOCK, T.G.; DAVIS, C.O.; MUELLER, J.L.; Remote sensing reflectance and inherent optical properties of oceanic waters derived from above-water measurements. In Ocean Optics XIII, S.G. Askleson and R. Frouin, eds., Proc. SPIE 2963, 160-166, 1997.

LEE, Z. P.; CARDER, K.L.; MOBLEY, C.D.; STEWARD, R.G.; PATCH, J.S.; Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Appl. Opt.*, v.38, p.3831– 3843, 1999.

LEE, Z. P.; CARDER, K. L.; ARNONE, R.; Deriving inherent optical properties from water color: A multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters, *Appl. Opt.*, v.41, p.5755–5772, 2002.

LEE, Z.P.; CARDER, K. L.; Particle phase function and remote-sensing reflectance model: a revisit. Presented at the Ocean Color Research Team Meeting, San Diego, Calif., 21–24 May, 2001.

LEE, Z.P.; CARDER, K. L.; Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v.89, p.361-368. 2004.

- LEE, Z.P., WEIDEMANN, A., KINDLE, J., ARNONE, R., CARDER, K.L., DAVIS, C.; Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote Sensing. *Journal of Geophysical Research*, v.112, n.C3, 2007.
- LEE, Z. P.; DARECKI, M.; CARDER, K.L.; DAVIS, C.; STRAMSKI, D.; RHEA, W.J.; Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods, *J. Geophys. Res.*, v.110, n.C02017, 2005.
- LEE, Z.P.; CARDER, K.L.; STEWARD, R.G.; PEACOCK, T.G.; DAVIS, C.O.; PATCH, J.S.; An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color. *J. Geophys. Res.*, v.103, p.27967–27978, 1998.
- LOICZ. The LOICZ implementation plan. *IGBP Report 33*, v.33, 1994.
- LORENZZETTI, J.A.; Processamento digital de imagens Landsat como subsídio ao estudo dos sedimentos em suspensão na região da foz do rio São Francisco. In: Projeto GEF São Francisco - subprojeto 1.1B: “Determinação da Carga de Nutrientes do São Francisco na Região da Foz”. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gefsf/>>, 2002.
- LORENZZETTI, J.A.; OLIVEIRA, E.N.; KNOPPERS, B.A.; MEDEIROS, P.R.P.; Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3429-3436, 2007.
- LOISEL, H.; MERIAUX, X.; BERTHON, J.F.; POTEAU, A.; Investigation of the optical backscattering to scattering ratio of marine particles in relation to their biogeochemical composition in the eastern English Channel and southern North Sea. *Limnol. Oceanogr.*, v.52, n.2, p.739-752, 2007.
- MANTOURA, R.F.C; MARTIN, J.M.; WOLLAST, R.; Ocean margin processes in global change. Mantoura, R.F.C. Martin, J.-M.; Wollast, R. (eds). Chichester: John Wiley and Sons, 1991, 469p.
- MANTOVAN I, J.E.; NOVO, E.M.L.M.; Comportamento spectral da material orgânica dissolvida. In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil. p. 917-923, abril de 1996.
- MARITORENA, S.; SIEGEL, D. A.; PETERSON, A. R.; Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, v.41, p.2705–2714, 2002.
- MARTIN, L.; DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; Climatic control on coastal erosion during a sealevel fall episode. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.70, p.249–266, 1998.
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; TESSLER, M.; EICHLER, B.; Significado Geológico das Variações dos Graus de Arredondamento das Areias Holocênicas da Planície

Costeira do rio Paraíba do Sul (RJ). In: XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, Rio de Janeiro, p. 119-132, 1984.

MASSE, A.K.; MURTHY, C.R.; Observations of the Niagara River thermal plume. *Journal of Geophysical Research*, v.95, p.851-875, 1990.

McCLAIN, C.R.; FELDMAN, G.C.; HOOKER, S.B.; An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Research II*, v.51, p.5-42, 2004.

McCLAIN, C.R.; A decade of satellite ocean color observations. *Annu.Rev.Mar.Sci.*, v.1, p.19-42, 2009.

MEDEIROS, P.R.P.; Aporte Fluvial, Transformação e Dispersão do Material Biogênico no Estuário do Rio São Francisco, Após a Construção da Usina Hidroelétrica do Xingo (AL/SE). Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, 145p., 2003.

MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B.A.; SANTOS JUNIOR, R.C.; SOUZA, W.F.L.; aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio são francisco (se/al). *Geochimica Brasiliensis*, v.21, n.2, p.209-228, 2007.

MERIS SPECIAL ISSUE. *International Journal of Remote Sensing*, v.20, n.9, 1999.

MERTES, L.A.K; SMITH, M.O.; ADAMS, J.B.; Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from Landsat images. *Remote Sensing Environment*, v.43, p.281-301, 1993.

MILLIMAN, J.D.; Upper continental margins sedimentation off Brazil: Part VI. A synthesis. *Contrib. Sedimentol.*, v. 4, p.151-176, 1975.

MILLIMAN, J.D.; SYVITSKI, J.P.M.; Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geol.*, v.100, p.525-544, 1992.

MOBLEY, C., STRAMSKI, D.; Effects of microbial particles on oceanic optics: methodology for radiative transfer modeling and example simulations. *Limnology and Oceanography*, v.42, n.3, p.550-560, 1997.

MOBLEY, C.; Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, v. 38, n.36, 1999.

MOBLEY, C.D.; Light and Water: radiative transfer in natural waters. San Diego: Academic Press, 1984.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O.; Dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro (RJ), p.1334-1342, 2000.

MOREL, A.; PRIEUR, L.; Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* v.22, p.709-722, 1977.

MOREL, A.; In-water and remote measurement of ocean color. *Boundary-Layer Meteorol.*, v.18, p.177-201, 1980.

MOREL, A. AND AHN, Y.-H.; Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells. *J. Mar. Res.*, v.49, p.177-202, 1991.

MOREL, A. AND BRICAUD, A.; Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res. I*, v.28A, p.1375-1393, 1981.

MÜLLER-KARGER, F.E.; WALSH, J.J.; R.H. EVANS., AND M.B. MEYERS (1991), On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites, *J. Geophys. Res.*, v.96, p.12.645-12.665, 1991.

MÜNCHOW, A.; GARVINE, R.W.; Buoyancy and wind forcing of a coastal current. *Journal of Marine Research*, v.51, p.293-322, 1993.

MUNDAY, J.C.; AFOLDI, T.T; Landsat test diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement. *Remote Sensing Environment*, v.8, p.169-183, 1979.

NASA, <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>, data acesso: 26/12/2008.

NITTROUER, C.A., WRIGHT, L.D.; Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, v.32, p.85-113, 1994.

NITTROUER, C. A.; STERNBERGR, R.W.; CARPENTERA, R.; BENNETT, W. T.; The use of Pb-210 geochronology as a sedimentological tool: Application to the Washington continental shelf. *Marine Geology*, v.31, p.297-316, 1979.

NITTROUER, C. A.; STERNBERG, R.W.; The formation of sedimentary strata in an allochthonous shelf environment: The Washington continental shelf. *Marine Geolopr.*, v.42, p.201-232, 1981.

NOVO, E.M.M.; HANSOM, J.D.; CURRAN, P.J.; The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, v.10, n.8, p.1357-1372, 1989.

O'DONNELL, J.; The formation and fate of a river plume: a numerical model. *Journal of Physical Oceanography*, v.20, p.551-569, 1990.

OLIVEIRA, E. N. ; DOMINGUES, C. M. ; GHISOLFI, R. D.; Velocidades de Corrente a Partir de Imagens de Satélite. In: Ronald Buss de Souza. (Org.). Oceanografia por Satélites. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 61-76, 2005.

OLIVEIRA, E. N. ; KNOPPERS, B. A. ; LORENZZETTI, J. A. . Estimativa de Transporte de Sedimento por Sensoriamento Remoto. In: X Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2005, Porto de Galinhas, PE. 1, v. 1. p. 1-1, 2005.

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B. G.; SIEGEL, D.A.; CARDER, K.L.; GARVER, S.A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C.; "Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS," *J. Geophys. Res.*, v.103, p.24937-24953, 1998.

PARSONS, T. R.; TAKAHASHI, M.; HARGRAVE, B.; *Biological oceanographic processes* (3 ed.). New York: Pergamon Press., 1983.

PIOLA, A.R.; ROMERO, S.I.; ZAJACZKOVSKI, U.; Space-time variability of the plata plume inferred from ocean color. *Continental Shelf Research*, v.28, p.1556-1567, 2008.

POPE, R.M., FRY, E.S.; Absorption spectrum (380 -700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, v.36, p.8710-8723, 1997.

PREISENDORFER, R.W.; Hydrologic optics. Vol I. Introducton. Honololu: U.S> Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, Environment Research Laboratory, 1976, 218p.

PRITCHARD, D.W.; Estuarine circulation patterns. Proceedings of the Americam Society of Civil Engineers, n. 81, p. 1-11, 1955.

PRITCHARD, D.W.; What is an estuary: a physical viewpoint. In: LAUFF, G.H. (ed.). Estuaries. Washington, AAAS Pub., v.83, p.3-5, 1967.

QIN, Y S.; LI, F.; Study of influence of sediment loads discharge from Huanghe River on sedimentation in Bohai Sea and Huanghai Sea, p. 83-92. In Proceedings of the International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea, Beijing. China Ocean Press, Beijing, 1983.

RAYMOND, P.A.; COLE, J.J.; Increase in the export of alkalinity from North America's largest river, *Science*, v.301, p.88-91, 2003.

RESTREPO, D. J.; KJERFVE, B.; Water discharge and sediment loads from the western slopes of the Colombian Andes with focus on rio San Juan. *Journal of Geology*, v.108, p.17-33, 2001.

RITCHIE, J.C.; SCHIEBE, F.R.; MCHENRY, J.R.; Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.8, p.85-102, 1976.

RHOADS, D. C.; Organism-sediment relations on the muddy sea floors. *Oceanography and Marine Biology Annual Reviews*, v.12, p.263-300, 1974.



RODRIGUES, R.R.; ROTHSTEIN, L.M.; WIMBUSH, M.; Seasonal variability of the south equatorial current bifurcation in the atlantic ocean: a numerical study. *Journal of Physical Oceanography*, v.37, p.16-30, 2006.

RÖDER, A.; KUEMMERLE, T.; HILL, J.; Extension of retrospective datasets using multiple sensors. An approach to radiometric intercalibration of LANDSAT TM and MSS data. *Remote Sensing of Environment*, v.95, n.2, p.195-210, 2005.

ROESLER, C. S.; PERRY, M.J.; CARDER, K.L.; Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnol. Oceanogr.*, v.34, p.1510– 1523, 1989.

ROESLER, C.S.; PERRY, M.J.; In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance. *J. Geophys. Res.*, v.100, p.13279–13294, 1995.

HUMBORG, C.; ITTEKKOT, V.; COCIASU, A.; BODUNGEN, B. VON. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, v. 386, p. 385-388, 1997.

SALISBURY, J.E.; CAMPBELL, J.W.; LINDNER, E.; MEEKER, L.D.; MULLER-KARGER, F.E.; VOROSMARTY, C.J.; On the seasonal correlation of surface particle fields with wind stress and Mississippi discharge in the northern Gulf of Mexico, *Deep-Sea Res. II*, v. 51, p.1187-1203. 2004.

SALOMONS, W.; Speciation and metal behavior in rivers and estuaries. In: *Inspira Courses. Ecological Effects on Heavy Metals Speciation in Aquatic Ecosystem*. Inspira, 1982.

SALOMONSON, V.V; BARNES, W.L.; MAYMON, P.W.; MONTGOMERY, H.E.; OSTROW, H.; MODIS: Advanced Facility Instrument for Studies of the Earth as a System. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, v.27, n.2, p.145-153, 1989.

SANFORD, L. P.; New sedimentation, resuspension, and burial. *Limnology and Oceanography*, v.37, p.1164-1178. 1985.

SANTOS, C. M. M. Geoquímica do carbono e nitrogênio orgânico particulado transportados durante um ano hidrológico (1984-1985) pelo rio São Francisco, Brasil e transferidos ao seu estuário. Tese (Mestrado em Geoquímica). Instituto de Geografia. Universidade Federal da Bahia, 1993, 70p.

SANTOS, E.S.; Aplicação de marcadores geoquímicos para avaliação dos impactos nas barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (SE/AL). Tese (Doutorado em Geoquímica). Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, 2007, 139p.

SATHYENDRANATH, S.; Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically Complex Waters. In: *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group number 3*. Dartmouth, Nova Scotia, Canada, 2000.

SATHYENDRANATH, S., PLATT, T.; Analytic model of ocean color. *Applied Optics*, v.36, n.12, p.2620-2629, 1997.

SATHYENDRANATH, S., L. PRIEUR, AND A. MOREL.; A threecomponent model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Int. J. Remote Sens.*, v.10, p.1373-1394, 1989.

SATHYENDRANATH, S.; COTA, G.; STUART, V.; MAASS, M.; PLATT, T.; Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches. *Int. J. Remote Sens.*, v.22, p.249-273, 2001.

SATHYENDRANATH, S.; LAZZARA, L.; PRIEUR, L.; Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnology of Oceanography*, v.32, n.2, p.403-415, 1987.

SIEGEL, D. A.; MARITORENA, S.; NELSON, N. B.; HANSELL, D. A.; Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials, *J. Geophys. Res.*, v.107, n.C12, p.3228-3234, 2002.

SIGNORINI, S.R.; GARCIA, V.T.; PIOLA, A.R.; GARCIA, C.A.E.; MATA, M.M.; Seasonal and interannual variability of calcite in the vicinity of the Patagonian shelf break (38°S-52°S). *Geophys. Res. Lett.*, v.33, p.16610-16620, 2006.

SMITH, R.C.; BAKER, K.S.; The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, v.23, n.2, p.247-259, 1978.

SMITH, R. C.; BAKER, K.S.; Optical properties of the clearest natural waters. *Appl. Opt.*, v.20, p.177-184, 1981.

SMITH, S.M.; HITCHCOCK, G.L.; Nutrient enrichments and phytoplankton growth in the surface waters of th Louisiana bight. *Estuaries*, v.17, p.740-753, 1994.

SOUTO, R.P., KAMPEL, M., BRANDINI, F., VELHO, H.F.C., STEPHANY, S.; Análise comparativa de medições in situ e orbital de radiâncias do oceano na estimativa de concentração de clorofila-a. Proceedings of the XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Goiânia, Brazil, INPE, April/16-21. p. 3679-3686, 2005.

SOUZA, W.F.L.; A Interface Terra-Mar Leste do Brasil: Tipologia, Aporte Fluvial, Águas Costeiras e Plataforma Continental. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, 2002, 233p.

SOUZA, W.F.L.; KNOPPERS, B.; Fluxos de água e sedimentos a costa leste do Brasil: relações entre a tipologia e as pressões antrópicas. *Geochim. Brasil.*, v.17, n.1, p.057-074, 2003.

SOUZA, R.B.; Oceanografia por Satélite. Organizador: Ronald Buss de Souza. Oficina de Textos, 2005, 336p.

STUMPF, R.P.; ARNONE, R.A.; GOULD, R.W.; MARTINOLICH, P.M.; RANSIBRAHMANAKUL, V.; A partially-coupled ocean-atmosphere model for retrieval of water-leaving radiance from SeaWiFS in coastal waters, in *Algorithm Updates for the Fourth SeaWiFS Data Reprocessing*, vol. 22, edited by S.B. Hooker, et al., NASA Tech. Memo. 2002-206892, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 2003.

SUGUIO, K.; Rochas sedimentares: propriedades, gênese e importância econômica. Suguio, K. (2 ed). São Paulo: Edgar Blucher, 1982, 500p.

SYDOR, M.; ARNONE, R. A.; Effect of suspended particulate and dissolved organic matter on remote sensing of coastal and riverine waters. *Applied Optics*, v.36, p.6905-6912, 1997.

TASSAN, S.; Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for marine application. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.10, p.1455-1478, 1987a.

TASSAN, S.; A numerical model for the detection of sediment concentration in stratified river plumes using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, n.12, p.2699-2705, 1987.

THOMAS, A.C.; WEATHERBEE, R.A.; Satellite-measured temporal variability of the Columbia river plume. *Remote Sensing of Environment*, v.100, p.167-178, 2006.

THOME, K. J.; HELDER, D. L.; AARON, D.; DEWALD, J. D. Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ absolute radiometric calibration using the reflectance-based method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.42, n.12, p.2777-2785, 2004.

TINTELNOT, M.; Transport and deposition of fine-grained sediments on the Brazilian continental shelf as revealed by clay mineral distribution. Unpublished. PhD Thesis. Heidelberg, University of Heidelberg, 1995, 294p.

TUNDISI, J.G.; ROCHA, M.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; BRAGA, B.; Reservoir management in South América. *World Water Developments* v.14, n. 2, p. 141-145, 1998.

TURNER, E.; RABALAIS, N.; NAN, Z.Z.; Phytoplankton biomass, production and growth limitations on the Huanghe (Yellow River) continental shelf. *Continental Shelf Research*, v.10, p.545-571, 1990.

TURNER, A.; MILLWARD, G.E.; Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles. Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, v.55, p.857-883, 2002.

U.S. NAVAL HYDROGRAPHIC OFFICE, Sailing directions for South America: v.1 East Coast from the Orinoco to and including the Rio dela Plata, (6<sup>th</sup> ed.), 1967.

U.S. NAVY. Marine Climatic Atlas of the World, Vol. IV, South Atlantic Ocean. Washington, D.C., 1978, 325p.

VAN HEUKELEM, L., THOMAS, C.S., AND GLIBERT, P.M. (eds). Sources of variability in chlorophyll analysis by fluorometry and high performance liquid chromatography in a SIMBIOS inter-calibration exercise. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 2002.

VECCHIO, R.D.; BLOUGH, N.V.; Spatial and seasonal distribution of chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the middle atlantic bight. *Marine Chemistry*, v.89, p.169-187, 2004.

VERMOTE, E.F.; TANRE, D.; DEUZÉ, J.L.; HERMAN, M.; and MORCRETTE, J.J.; Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview., *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, v.35, n.3, p.675-686, 1997.

Walsh, J.J.; **On the nature of continental shelves**. San Diego: Academic, 1988.

WARRICK, J.A.; MERTES, L.A.K.; SIEGEL, D.A.; MACKENZIE, C.; Estimating Suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS. *International Journal of Remote Sensing*, v.25, n.10, p.1995-2002, 2004.

WOLFF, W.J.; Biotic aspects of the chemistry of estuaries. In: OLAUSSON, E.; CATO I. (ed.). *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*. 2ed. Chichester: John Wiley and Sons, 1980, 452p.

WRIGHT, L. D.; WISEMAN; W.J.; YANG, Z.S.; BORNHOLD, B.D.; KELLER, G.H.; PRIOR, D.B.; SUHAYDA, J.N.; Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River). *Continental Shelf Research*, v.10, p.1-40, 1990.

WRIGHT, L.D.; Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis. *Geol Soc Am Bull*, v.88, p.857-868, 1977.

WRIGHT, L. D.; River deltas, p. 1-75. In R. A. Davis (ed.), *Coastal Sedimentary Environments*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, Ed.: Wright, L. D., 1985.

WRIGHT, L.D.; NITTROUER, C.A.; Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries*, v.18, p.494-508, 1995.

WRIGHT, L. D.; THOM, B.G.; HIGGINS, R.; Wave influences on river-mouth depositional processes: Examples from Australia and Papua New Guinea. *Estuarine and Coastal Marine Science*, v.11, p.263-277. 1980.

XIA, L.; A unified model for quantitative remote sensing of suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, v.14, n.14, p.2665-2676, 1993.

ZHAO, L.; WEI, H.; The influence of physical factors on the variation of phytoplankton and nutrients in the Bohai Sea. *J. Oceanogr.*, v.61, p.335-342. 2005.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)