

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA
AMBIENTAL**



ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

ALEXANDRE PELISSON MANENTE CAMPOS

VITÓRIA
2011

ALEXANDRE PELISSON MANENTE CAMPOS

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES)
ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso

Co-orientador: Prof. Dr. Renato David Ghisolfi

Banca examinadora: Prof. Dr. Daniel Rigo e Prof. Dr.
Alex Cardoso Bastos

VITÓRIA
2011


Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P384a PELISSON MANENTE CAMPOS, ALEXANDRE, 1987-
ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE
SENSORIAMENTO REMOTO / ALEXANDRE PELISSON
MANENTE CAMPOS. - 2011.
(recurso não paginado). : il.

Orientador: GILBERTO FONSECA BARROSO.
Coorientador: RENATO DAVID GHISOLFI.
Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Humanas e Naturais.


1. PLUMA FLUVIAL. 2. SENSORIAMENTO REMOTO.
3. VAZÃO FLUVIAL. 4. PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO
SUPERFICIAL DE PLUMAS. I. FONSECA BARROSO,
GILBERTO. II. DAVID GHISOLFI, RENATO. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 55

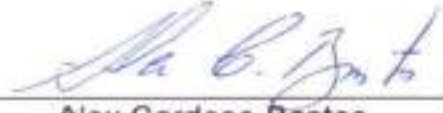

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

DÉCIMA NONA ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL DE ALEXANDRE PELISSON MANENTE CAMPOS.

Aos vinte e um dias do mês de junho do ano dois mil e onze, às catorze horas e trinta minutos, realizou-se na Base Oceanográfica de Aracruz no Auditório Ricardo Luiz Gomide, da Universidade Federal do Espírito Santo, a defesa pública da Dissertação intitulada "**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO.**" de **Alexandre Pelisson Manente Campos**, aluno do Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para obtenção do grau de **Mestre em Oceanografia Ambiental**. A Banca Examinadora, devidamente aprovada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, foi constituída por: Gilberto Fonseca Barroso, Alex Cardoso Bastos e Daniel Rigo. A sessão foi aberta pelo Professor Gilberto Fonseca Barroso, orientador do aluno. Após a explanação feita pelo aluno, o orientador, passou a palavra aos componentes da Banca Examinadora. Terminada a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se em sessão reservada para atribuição do resultado final, podendo este ser "Aprovado" ou "Reprovado" de acordo com o artigo 31 do regimento do curso. O resultado final é transcrito a seguir: Gilberto Fonseca Barroso APROVADO, Alex Cardoso Bastos APROVADO e Daniel Rigo APROVADO. De acordo com as normas vigentes, o candidato foi considerado **aprovado**, condicionado a apresentação de cópia impressa e digital de sua dissertação à coordenação do curso. Nada mais havendo a tratar a sessão foi encerrada às 17:00 horas, e eu, Eliana Maria Morati Castiglioni, Secretária *ad hoc*, lavrei a presente ata, que assino junto com os membros da Banca Examinadora. Universidade Federal do Espírito Santo, vinte e um de junho de dois mil e onze.



Gilberto Fonseca Barroso



Alex Cardoso Bastos



Daniel Rigo



Eliana Maria Morati Castiglioni

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

por

Alexandre Pelisson Manente Campos

Submetido como requisito para obtenção de grau de

Mestre

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Junho de 2011

© Alexandre Pelisson Manente Campos

Por meio deste, o autor confere ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental permissão para reproduzir e distribuir cópias parciais ou totais deste documento para fins não comerciais.

Assinatura do autor.....
Curso de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental
Universidade Federal do Espírito Santo
21 de junho de 2011

Certificado por.....
Dr. Gilberto Fonseca Barroso
CCHN/PPGOAM/UFES

Certificado por.....
Dr. Renato David Ghisolfi
Co-orientador
CCHN / PPGOAM / UFES

Certificado por.....
Dr. Alex Cardoso Bastos
Examinador Interno
CCHN / PPGOAM / UFES

Aceito por.....
Dr. Daniel Rigo
Examinador Externo
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela vida, pela proteção, e por sempre estar olhando por mim em todos os momentos;

À base de tudo, minha família, especialmente meus pais, por serem exemplo de vida e por sempre me apoiarem;

À Gilberto, orientador, pelos ensinamentos transmitidos, paciência e palavras animadoras que me incentivaram a seguir acreditando na conclusão desse trabalho;

Ao professor Renato Ghisolfi pela enorme ajuda com o processamento dos dados oceanográficos e valiosa contribuição para o desenvolvimento desse estudo;

À Portocel, na pessoa de Wanderlei de Oliveira pela pronta ajuda ao ceder os dados de vento para a realização desse trabalho;

À CODESA, por possibilitar a compatibilização do horário de trabalho com o desenvolvimento desse estudo, especialmente na pessoa de Mário Emílio Nascimento da Silva;

Aos companheiros de trabalho, pelos momentos de descontração, pela amizade e apoio nos momentos em que achei que não fosse conseguir chegar ao fim dessa etapa: Carolina Vanetti, Maria Elisa, Roberto e Mariângela.

À Christian Pedruzzi pela enorme ajuda na troca de informações sobre a pluma do rio Doce.

À FAPES pela concessão de bolsa de estudos nos primeiros meses de mestrado.

À todos os amigos que estavam presentes nas horas boas ou ruins.

À todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais essa etapa em minha vida.

OBRIGADO!!!!

RESUMO

A descarga fluvial de água doce pode formar plumas que penetram no oceano costeiro e gerar fluxos de água, sedimento, nutrientes e espécies biológicas que induzem a um número de importantes processos biogeoquímicos costeiros, como aumento ou limitação da produção biológica, ciclos geoquímicos, transporte de poluentes e equilíbrio sedimentar. Assim, torna-se necessário o conhecimento da dinâmica dessas plumas para a gestão integrada entre bacias hidrográficas e ambientes costeiros.

A pluma do rio Doce é uma das feições oceanográficas mais proeminentes na plataforma continental do Estado do Espírito Santo, mas sua dinâmica ainda é pouco conhecida. Visando contribuir com informações sobre a variabilidade espaço-temporal dessa pluma, o presente estudo utilizou 33 imagens de satélite dos sensores Landsat 5 e 7 e CBERS 2 e 2B para identificar os principais padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho os quais foram correlacionados com dados de vazão fluvial (nas 33 imagens) e vento (em 14 imagens).

As áreas de pluma variaram entre 0,23 e 29,1 km² com boa correlação com a vazão e foram obtidos cinco padrões de distribuição superficial das plumas: 1) Sem padrão de dispersão comum; 2) Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura; 3) Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura; 4) Dispersão radial a partir da desembocadura e 5) Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura. De maneira geral, os ventos do quadrante norte auxiliam no espalhamento da pluma para sul e os ventos do quadrante sul limitam esse espalhamento, sendo que alguns indícios indicam que a pluma do rio Doce tenha um espalhamento superficial no ambiente marinho.

Palavras-chave: Pluma fluvial, sensoriamento remoto, padrões de distribuição superficial das plumas, vazão fluvial, vento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de pluma estuarino-fluvial dividida em três regiões, de acordo com os processos de mistura que nelas ocorrem: a – estuário, b – desembocadura e c – região afastada da desembocadura. (modificado de Hetland, 2004).

Figura 2: Esquema de uma pluma do tipo “*bottom-advected plume*” ou pluma com advecção de fundo. (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997).

Figura 3: Esquema de uma pluma do tipo “*surface-advected plume*” ou pluma com espalhamento superficial (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997)

Figura 4: Cenário base simulado por Fong & Geyer (2002) após 3, 5 e 7 dias. O fluxo na protuberância circular ao longo do lado voltado para o mar transporta água que alimenta a corrente costeira e também água que recircula para a protuberância. Os tons de cinza indicam a salinidade. Vetores de velocidade indicam o campo de fluxo. Simulação considerando pluma localizada no Hemisfério norte.

Figura 5: Curvas de reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão. As diferentes concentrações de sólidos em suspensão estão expressas em NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica - NTU). Adaptado de Goodin *et al.*, (1993 *apud* NOVO, 2008).

Figura 6: Localização da bacia hidrográfica do rio Doce no Brasil e Espírito Santo

Figura 7: Geomorfologia na região do baixo rio Doce segundo SUGUIO *et al.*, (1982).

Figura 8: Mapa batimétrico da plataforma continental do Espírito Santo. (Marangoni, 2009)

Figura 9: Mapa batimétrico na região da foz da desembocadura do rio Doce. Dados interpolados (método de Kriging) a partir da carta náutica DHN nº 1400 e batimetria de campo realizada no dia 19/02/2010. Segundo Pedruzzi (em desenvolvimento).

Figura 10: Precipitação mensal média (mm) em Linhares e dias com chuva obtidos a partir de estação meteorológica do INMET localizada nas coordenadas 19,35 S, 40,068 W para o período 1976-2009.

Figura 11: Precipitação anual em Linhares (mm) para o período entre 1976 e 2009 obtida a partir de estação meteorológica do INMET

Figura 12: Vazões médias mensais (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500) e média de vazão anual. Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

Figura 13: Vazões médias mínimas e máximas (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500). Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

Figura 14: Circulação oceânica no Atlântico Sul, com destaque para a corrente do Brasil, formada a partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial segundo Moura (2008).

Figura 15: Diagrama rosa de correntes para dados coletados a 2 m de profundidade nas proximidades de Regência, ES, entre 12 out. e 14 nov. 2002, utilizando-se um correntógrafo acústico fundeado em profundidade de 2m (convenção vetorial). ASA (2003).

Figura 16: Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de variação do nível do mar registrada no período de 12 de outubro a 14 de novembro 2002, $dt=1h$. ASA (2003).

Figura 17: Perfis de salinidade realizados em estação oceanográfica defronte à foz do rio Doce em profundidade aproximada de 10 metros, utilizando um STD Sensordata SD-200. Fonte: ASA (2003).

Figura 18: Localização dos pontos de medição de vazão (ANA), vento (Portocel) e dados complementares extraídos de ASA (2003)

Figura 19: Exemplo de polígonos de treinamento traçados para as classes de água. Composição das bandas RGB 3, 2, 1 Landsat TM.

Figura 20: Curva de permanência para a estação fluviométrica de Colatina no período entre 1939 e 2009.

Figura 21: Vazões médias mensais na estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES para o período entre julho de 1987 e dezembro de 2009. Os pontos com datas indicam as imagens de satélite obtidas e suas respectivas vazões

Figura 22: Histograma direcional dos vetores de vento para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) entre os anos de 2004 e 2006. (a) dezembro-março; (b) maio-agosto. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica.

Figura 23: Histograma da direção do vento (esquerda) e velocidade média por direção do vento (direita) para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) entre os anos de 2004 e 2006. A direção apresentada segue a convenção meteorológica.

Figura 24: *Plot* vermelho: série temporal das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de correntes medidas por ASA (2003) a 2m de profundidade nas coordenadas 19° 41,7'S e 39° 49,8'W. *Plot* azul: mesma série temporal subtraída da forçante maré (componentes M_2 e S_2). Período dos dados: 12/10 a 14/11/2002, $dt= 20$ min.

Figura 25: Plotagem da amplitude de maré (azul) e velocidade ocasionada pela maré obtida a partir de filtragem das componentes M_2 e S_2 (verde). Pode-se observar que as maiores velocidades de corrente ocorrem em maré de sizígia.

Figura 26: Diagramas *stick plot* para ventos (a) e correntes (b) medidos em Regência entre os dias 12 de outubro e 11 de novembro de 2002 - rotacionados para a inclinação da linha de costa ao sul da desembocadura do rio Doce (60° a partir do norte) - e (c) componentes paralelas à costa do vento e corrente. Em destaque estão os períodos de inversão do vento – pode-se notar que as correntes sempre correspondem nesses períodos. Os dados plotados seguem a convenção oceanográfica.

Figura 27: Plotagem conjunta das componentes (v) do vento e (v) da corrente obtidos por ASA (2003) paralelos à linha de costa (60° a partir do norte). Valores positivos indicam ventos e correntes provenientes de sul. Os dados de corrente foram defasados em 2 horas em relação aos dados de vento.

Figura 28: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 28/07/1987. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce, razão pela qual a pluma apresentou pequeno tamanho.

Figura 29: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 18/07/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce. Ao sul da desembocadura se observa feição com circulação ciclônica.

Figura 30: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 07/04/1993. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se a formação de uma protuberância orientada em SE e um fluxo ao norte da desembocadura.

Figura 31: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 19/01/2004. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem

classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que a pluma se espalha radialmente em torno da desembocadura.

Figura 32: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 01/10/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que toda a pluma está deslocada para a costa ao norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

Figura 33: Área de pluma obtida para cada imagem classificada com sua respectiva vazão associada. As linhas tracejadas azul e verde indicam os limites para vazões baixas e altas, respectivamente.

Figura 34: Áreas médias de pluma para as imagens em vazões baixas, médias e altas e desvios-padrão associados.

Figura 35: Regressão linear entre a vazão do rio Doce e as áreas de pluma. Os dados foram transformados em logaritmo natural.

Figura 36: Padrões de distribuição superficial das plumas, suas áreas médias e desvio-padrão e vazões médias e desvio-padrão dos grupos de imagens classificadas em cada um dos padrões. 1: Sem padrão de dispersão comum; 2: Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura; 3: Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura; 4: Dispersão radial a partir da desembocadura; 5: Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura. $n(1)= 13$; $n(2)= 4$; $n(3)= 8$; $n(4)= 4$; $N(5)= 4$.

Figura 37: Imagens com ventos do quadrante norte, onde se pode observar um considerável deslocamento para sul das águas periféricas da pluma.

Figura 38: Imagens com ventos do quadrante sul. Pode-se observar que a “frente” de turbidez causada pelo deságüe do rio não avança muito em direção ao sul em comparação com as imagens obtidas com ventos do quadrante norte.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características da UHE de Mascarenhas e UHE de Aimorés. Coelho (2007).....

Tabela 2: Amplitudes e fases das principais componentes harmônicas de maré obtidas em Regência - ES. ASA (2003).

Tabela 3: Tabela 3: Níveis das marés de sizígia e quadratura para a estação maregráfica de Barra do Riacho (19° 50,5'S e 40° 03,5W) - em metros. Femar (2000).

Tabela 4: Órbitas/pontos das imagens Landsat e CBERS utilizadas

Tabela 5: Características dos sensores e bandas que foram utilizadas. *: apenas no Landsat 7. As bandas efetivamente utilizadas estão sublinhadas. (Divisão de Geração e Processamento de Imagens – INPE - www.dgi.inpe.br)

Tabela 6: Características da estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES

Tabela 7: Características da estação meteorológica localizada no Porto de Barra do Riacho

Tabela 8: Critérios utilizados para definição das regiões de treinamento

Tabela 9: Limites considerados entre vazões baixas, médias e altas

Tabela 10: Imagens selecionadas, assim como respectiva vazão e sua classificação. As duas últimas colunas se referem às correlações realizadas na seção 5.3. L5: Landsat 5 TM; L7: Landsat 7 ETM+; C 2: CBERS 2; C 2B: CBERS 2B.

Tabela 11: Padrões de pluma observados e imagens representativas

Tabela 12: Direções e velocidades médias de ventos nas últimas 24 horas antes da obtenção de cada imagem de satélite, agrupados por períodos de 3 horas e classificação dos padrões de ventos observados

Tabela 13: Síntese das correlações obtidas entre os padrões de distribuição superficial das plumas e os dados de vazão e vento

Tabela 14: Vantagens e desvantagens na utilização dos satélites Landsat e CBERS para a análise da pluma do rio Doce

LISTA DE ABREVIACÕES

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler

ANA – Agência Nacional de Águas

CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite

CCD - Câmara Imageadora de alta resolução

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CTCOST - Câmara Técnica de Integração da Gestão de Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e Zona Costeira

DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento

ESA – Agência Espacial Européia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ETM - Enhanced Thematic Mapper

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

SAR - Radar de Abertura Sintética

SeaWifs - Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

TM - Thematic Mapper

UTM – Universal Transverse Mercator

WGS - World Geodetic System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO NA ZONA COSTEIRA.....	14
1.2 PLUMAS FLUVIAIS.....	15
1.2.1 Definição	15
1.2.2 Hidrodinâmica e fatores atuantes	16
1.2.3 Métodos de estudo	20
1.2.4 Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo de plumas	22
2 OBJETIVOS	26
2.1 OBJETIVO GERAL.....	26
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
3 ÁREA DE ESTUDO	27
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	27
3.2 GEOMORFOLOGIA.....	28
3.3 CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA.....	31
3.4 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS.....	36
3.4.1 Ventos	36
3.4.2 Ondas	36
3.4.3 Correntes	37
3.4.4 Maré	39
3.4.5 Estrutura termo-halina do estuário	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 BASE DE DADOS.....	43
4.1.1 Imagens de satélite	43

4.1.1.1 Pré-processamento	46
4.1.2 Dados de Vazão	46
4.1.3 Vento	47
4.1.4 Dados complementares	48
4.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento	48
4.1.4.1.1 Maré	48
4.1.4.1.2 Vento	49
4.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	50
4.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas	52
4.3 CORRELAÇÃO DOS DADOS	53
4.3.1 Pluma x Vazão fluvial	53
4.3.2 Padrões de distribuição superficial das plumas x vento	54
5 RESULTADOS	55
5.1 BASE DE DADOS	55
5.1.1 Imagens de satélite	55
5.1.2 Vazão	57
5.1.3 Vento	59
5.1.4 Dados complementares	60
5.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento	60
5.1.4.1.1 Maré	60
5.1.4.1.2 Vento	61
5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	63
5.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas	64
5.2.1.1 Sem padrão de dispersão comum	65
5.2.1.2 Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura	66
5.2.1.3 Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura	67

5.2.1.4	Dispersão radial a partir da desembocadura.....	68
5.2.1.5	Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura.....	69
5.3	CORRELAÇÃO DOS DADOS.....	69
5.3.1	Pluma x Vazão fluvial.....	69
5.3.2	Pluma x vento.....	74
5.3.2.1	Ventos de baixa intensidade.....	76
5.3.2.2	Ventos do quadrante Norte.....	76
5.3.2.3	Ventos do quadrante Sul.....	78
5.3.3	Síntese das correlações obtidas.....	79
6	DISCUSSÃO.....	81
6.1	CORRELAÇÃO DOS DADOS.....	81
6.1.1	Influência das forçantes vazão fluvial e vento sobre a variabilidade espaço-temporal da pluma.....	81
6.1.2	Padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho.....	83
6.1.3	Outras forçantes não abordadas diretamente neste estudo...87	
6.2	METODOLOGIA UTILIZADA.....	88
6.2.1	Imagens de satélite.....	88
6.2.2	Processamento das imagens de satélite.....	90
6.3	SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	91
7	CONCLUSÕES.....	93
8	REFERÊNCIAS.....	95
9	ANEXOS.....	102

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA
AMBIENTAL**



ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

ALEXANDRE PELISSON MANENTE CAMPOS

VITÓRIA
2011

ALEXANDRE PELISSON MANENTE CAMPOS

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES)
ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso

Co-orientador: Prof. Dr. Renato David Ghisolfi

Banca examinadora: Prof. Dr. Daniel Rigo e Prof. Dr.
Alex Cardoso Bastos

VITÓRIA
2011

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P384a PELISSON MANENTE CAMPOS, ALEXANDRE, 1987-
ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E
TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE
SENSORIAMENTO REMOTO / ALEXANDRE PELISSON
MANENTE CAMPOS. - 2011.
(recurso não paginado). : il.

Orientador: GILBERTO FONSECA BARROSO.
Coorientador: RENATO DAVID GHISOLFI.
Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Humanas e Naturais.

1. PLUMA FLUVIAL. 2. SENSORIAMENTO REMOTO.
3. VAZÃO FLUVIAL. 4. PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO
SUPERFICIAL DE PLUMAS. I. FONSECA BARROSO,
GILBERTO. II. DAVID GHISOLFI, RENATO. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 55

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PLUMA DO RIO DOCE (ES) ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

por

Alexandre Pelisson Manente Campos

Submetido como requisito para obtenção de grau de

Mestre

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Junho de 2011

© Alexandre Pelisson Manente Campos

Por meio deste, o autor confere ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental permissão para reproduzir e distribuir cópias parciais ou totais deste documento para fins não comerciais.

Assinatura do autor.....
Curso de Pós Graduação em Oceanografia Ambiental
Universidade Federal do Espírito Santo
21 de junho de 2011

Certificado por.....
Dr. Gilberto Fonseca Barroso
CCHN/PPGOAM/UFES

Certificado por.....
Dr. Renato David Ghisolfi
Co-orientador
CCHN / PPGOAM / UFES

Certificado por.....
Dr. Alex Cardoso Bastos
Examinador Interno
CCHN / PPGOAM / UFES

Aceito por.....
Dr. Daniel Rigo
Examinador Externo
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela vida, pela proteção, e por sempre estar olhando por mim em todos os momentos;

À base de tudo, minha família, especialmente meus pais, por serem exemplo de vida e por sempre me apoiarem;

À Gilberto, orientador, pelos ensinamentos transmitidos, paciência e palavras animadoras que me incentivaram a seguir acreditando na conclusão desse trabalho;

Ao professor Renato Ghisolfi pela enorme ajuda com o processamento dos dados oceanográficos e valiosa contribuição para o desenvolvimento desse estudo;

À Portocel, na pessoa de Wanderlei de Oliveira pela pronta ajuda ao ceder os dados de vento para a realização desse trabalho;

À CODESA, por possibilitar a compatibilização do horário de trabalho com o desenvolvimento desse estudo, especialmente na pessoa de Mário Emílio Nascimento da Silva;

Aos companheiros de trabalho, pelos momentos de descontração, pela amizade e apoio nos momentos em que achei que não fosse conseguir chegar ao fim dessa etapa: Carolina Vanetti, Maria Elisa, Roberto e Mariângela.

À Christian Pedruzzi pela enorme ajuda na troca de informações sobre a pluma do rio Doce.

À FAPES pela concessão de bolsa de estudos nos primeiros meses de mestrado.

À todos os amigos que estavam presentes nas horas boas ou ruins.

À todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais essa etapa em minha vida.

OBRIGADO!!!!

RESUMO

A descarga fluvial de água doce pode formar plumas que penetram no oceano costeiro e gerar fluxos de água, sedimento, nutrientes e espécies biológicas que induzem a um número de importantes processos biogeoquímicos costeiros, como aumento ou limitação da produção biológica, ciclos geoquímicos, transporte de poluentes e equilíbrio sedimentar. Assim, torna-se necessário o conhecimento da dinâmica dessas plumas para a gestão integrada entre bacias hidrográficas e ambientes costeiros.

A pluma do rio Doce é uma das feições oceanográficas mais proeminentes na plataforma continental do Estado do Espírito Santo, mas sua dinâmica ainda é pouco conhecida. Visando contribuir com informações sobre a variabilidade espaço-temporal dessa pluma, o presente estudo utilizou 33 imagens de satélite dos sensores Landsat 5 e 7 e CBERS 2 e 2B para identificar os principais padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho os quais foram correlacionados com dados de vazão fluvial (nas 33 imagens) e vento (em 14 imagens).

As áreas de pluma variaram entre 0,23 e 29,1 km² com boa correlação com a vazão e foram obtidos cinco padrões de distribuição superficial das plumas: 1) Sem padrão de dispersão comum; 2) Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura; 3) Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura; 4) Dispersão radial a partir da desembocadura e 5) Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura. De maneira geral, os ventos do quadrante norte auxiliam no espalhamento da pluma para sul e os ventos do quadrante sul limitam esse espalhamento, sendo que alguns indícios indicam que a pluma do rio Doce tenha um espalhamento superficial no ambiente marinho.

Palavras-chave: Pluma fluvial, sensoriamento remoto, padrões de distribuição superficial das plumas, vazão fluvial, vento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de pluma estuarino-fluvial dividida em três regiões, de acordo com os processos de mistura que nelas ocorrem: a – estuário, b – desembocadura e c – região afastada da desembocadura. (modificado de Hetland, 2004).

Figura 2: Esquema de uma pluma do tipo “*bottom-advected plume*” ou pluma com advecção de fundo. (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997).

Figura 3: Esquema de uma pluma do tipo “*surface-advected plume*” ou pluma com espalhamento superficial (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997)

Figura 4: Cenário base simulado por Fong & Geyer (2002) após 3, 5 e 7 dias. O fluxo na protuberância circular ao longo do lado voltado para o mar transporta água que alimenta a corrente costeira e também água que recircula para a protuberância. Os tons de cinza indicam a salinidade. Vetores de velocidade indicam o campo de fluxo. Simulação considerando pluma localizada no Hemisfério norte.

Figura 5: Curvas de reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão. As diferentes concentrações de sólidos em suspensão estão expressas em NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica - NTU). Adaptado de Goodin *et al.*, (1993 *apud* NOVO, 2008).

Figura 6: Localização da bacia hidrográfica do rio Doce no Brasil e Espírito Santo

Figura 7: Geomorfologia na região do baixo rio Doce segundo SUGUIO *et al.*, (1982).

Figura 8: Mapa batimétrico da plataforma continental do Espírito Santo. (Marangoni, 2009)

Figura 9: Mapa batimétrico na região da foz da desembocadura do rio Doce. Dados interpolados (método de Kriging) a partir da carta náutica DHN nº 1400 e batimetria de campo realizada no dia 19/02/2010. Segundo Pedruzzi (em desenvolvimento).

Figura 10: Precipitação mensal média (mm) em Linhares e dias com chuva obtidos a partir de estação meteorológica do INMET localizada nas coordenadas 19,35 S, 40,068 W para o período 1976-2009.

Figura 11: Precipitação anual em Linhares (mm) para o período entre 1976 e 2009 obtida a partir de estação meteorológica do INMET

Figura 12: Vazões médias mensais (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500) e média de vazão anual. Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

Figura 13: Vazões médias mínimas e máximas (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500). Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

Figura 14: Circulação oceânica no Atlântico Sul, com destaque para a corrente do Brasil, formada a partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial segundo Moura (2008).

Figura 15: Diagrama rosa de correntes para dados coletados a 2 m de profundidade nas proximidades de Regência, ES, entre 12 out. e 14 nov. 2002, utilizando-se um correntógrafo acústico fundeado em profundidade de 2m (convenção vetorial). ASA (2003).

Figura 16: Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de variação do nível do mar registrada no período de 12 de outubro a 14 de novembro 2002, $dt=1h$. ASA (2003).

Figura 17: Perfis de salinidade realizados em estação oceanográfica defronte à foz do rio Doce em profundidade aproximada de 10 metros, utilizando um STD Sensordata SD-200. Fonte: ASA (2003).

Figura 18: Localização dos pontos de medição de vazão (ANA), vento (Portocel) e dados complementares extraídos de ASA (2003)

Figura 19: Exemplo de polígonos de treinamento traçados para as classes de água. Composição das bandas RGB 3, 2, 1 Landsat TM.

Figura 20: Curva de permanência para a estação fluviométrica de Colatina no período entre 1939 e 2009.

Figura 21: Vazões médias mensais na estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES para o período entre julho de 1987 e dezembro de 2009. Os pontos com datas indicam as imagens de satélite obtidas e suas respectivas vazões

Figura 22: Histograma direcional dos vetores de vento para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) entre os anos de 2004 e 2006. (a) dezembro-março; (b) maio-agosto. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica.

Figura 23: Histograma da direção do vento (esquerda) e velocidade média por direção do vento (direita) para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) entre os anos de 2004 e 2006. A direção apresentada segue a convenção meteorológica.

Figura 24: *Plot* vermelho: série temporal das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de correntes medidas por ASA (2003) a 2m de profundidade nas coordenadas 19° 41,7'S e 39° 49,8'W. *Plot* azul: mesma série temporal subtraída da forçante maré (componentes M_2 e S_2). Período dos dados: 12/10 a 14/11/2002, $dt= 20$ min.

Figura 25: Plotagem da amplitude de maré (azul) e velocidade ocasionada pela maré obtida a partir de filtragem das componentes M_2 e S_2 (verde). Pode-se observar que as maiores velocidades de corrente ocorrem em maré de sizígia.

Figura 26: Diagramas *stick plot* para ventos (a) e correntes (b) medidos em Regência entre os dias 12 de outubro e 11 de novembro de 2002 - rotacionados para a inclinação da linha de costa ao sul da desembocadura do rio Doce (60° a partir do norte) - e (c) componentes paralelas à costa do vento e corrente. Em destaque estão os períodos de inversão do vento – pode-se notar que as correntes sempre correspondem nesses períodos. Os dados plotados seguem a convenção oceanográfica.

Figura 27: Plotagem conjunta das componentes (v) do vento e (v) da corrente obtidos por ASA (2003) paralelos à linha de costa (60° a partir do norte). Valores positivos indicam ventos e correntes provenientes de sul. Os dados de corrente foram defasados em 2 horas em relação aos dados de vento.

Figura 28: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 28/07/1987. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce, razão pela qual a pluma apresentou pequeno tamanho.

Figura 29: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 18/07/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce. Ao sul da desembocadura se observa feição com circulação ciclônica.

Figura 30: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 07/04/1993. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se a formação de uma protuberância orientada em SE e um fluxo ao norte da desembocadura.

Figura 31: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 19/01/2004. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem

classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que a pluma se espalha radialmente em torno da desembocadura.

Figura 32: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 01/10/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que toda a pluma está deslocada para a costa ao norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

Figura 33: Área de pluma obtida para cada imagem classificada com sua respectiva vazão associada. As linhas tracejadas azul e verde indicam os limites para vazões baixas e altas, respectivamente.

Figura 34: Áreas médias de pluma para as imagens em vazões baixas, médias e altas e desvios-padrão associados.

Figura 35: Regressão linear entre a vazão do rio Doce e as áreas de pluma. Os dados foram transformados em logaritmo natural.

Figura 36: Padrões de distribuição superficial das plumas, suas áreas médias e desvio-padrão e vazões médias e desvio-padrão dos grupos de imagens classificadas em cada um dos padrões. 1: Sem padrão de dispersão comum; 2: Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura; 3: Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura; 4: Dispersão radial a partir da desembocadura; 5: Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura. $n(1)= 13$; $n(2)= 4$; $n(3)= 8$; $n(4)= 4$; $N(5)= 4$.

Figura 37: Imagens com ventos do quadrante norte, onde se pode observar um considerável deslocamento para sul das águas periféricas da pluma.

Figura 38: Imagens com ventos do quadrante sul. Pode-se observar que a “frente” de turbidez causada pelo deságüe do rio não avança muito em direção ao sul em comparação com as imagens obtidas com ventos do quadrante norte.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características da UHE de Mascarenhas e UHE de Aimorés. Coelho (2007).....

Tabela 2: Amplitudes e fases das principais componentes harmônicas de maré obtidas em Regência - ES. ASA (2003).

Tabela 3: Tabela 3: Níveis das marés de sizígia e quadratura para a estação maregráfica de Barra do Riacho (19° 50,5'S e 40° 03,5W) - em metros. Femar (2000).

Tabela 4: Órbitas/pontos das imagens Landsat e CBERS utilizadas

Tabela 5: Características dos sensores e bandas que foram utilizadas. *: apenas no Landsat 7. As bandas efetivamente utilizadas estão sublinhadas. (Divisão de Geração e Processamento de Imagens – INPE - www.dgi.inpe.br)

Tabela 6: Características da estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES

Tabela 7: Características da estação meteorológica localizada no Porto de Barra do Riacho

Tabela 8: Critérios utilizados para definição das regiões de treinamento

Tabela 9: Limites considerados entre vazões baixas, médias e altas

Tabela 10: Imagens selecionadas, assim como respectiva vazão e sua classificação. As duas últimas colunas se referem às correlações realizadas na seção 5.3. L5: Landsat 5 TM; L7: Landsat 7 ETM+; C 2: CBERS 2; C 2B: CBERS 2B.

Tabela 11: Padrões de pluma observados e imagens representativas

Tabela 12: Direções e velocidades médias de ventos nas últimas 24 horas antes da obtenção de cada imagem de satélite, agrupados por períodos de 3 horas e classificação dos padrões de ventos observados

Tabela 13: Síntese das correlações obtidas entre os padrões de distribuição superficial das plumas e os dados de vazão e vento

Tabela 14: Vantagens e desvantagens na utilização dos satélites Landsat e CBERS para a análise da pluma do rio Doce

LISTA DE ABREVIACÕES

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler

ANA – Agência Nacional de Águas

CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite

CCD - Câmara Imageadora de alta resolução

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CTCOST - Câmara Técnica de Integração da Gestão de Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e Zona Costeira

DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento

ESA – Agência Espacial Européia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ETM - Enhanced Thematic Mapper

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

SAR - Radar de Abertura Sintética

SeaWifs - Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

TM - Thematic Mapper

UTM – Universal Transverse Mercator

WGS - World Geodetic System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO NA ZONA COSTEIRA.....	14
1.2 PLUMAS FLUVIAIS.....	15
1.2.1 Definição	15
1.2.2 Hidrodinâmica e fatores atuantes	16
1.2.3 Métodos de estudo	20
1.2.4 Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo de plumas	22
2 OBJETIVOS	26
2.1 OBJETIVO GERAL.....	26
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
3 ÁREA DE ESTUDO	27
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	27
3.2 GEOMORFOLOGIA.....	28
3.3 CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA.....	31
3.4 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS.....	36
3.4.1 Ventos	36
3.4.2 Ondas	36
3.4.3 Correntes	37
3.4.4 Maré	39
3.4.5 Estrutura termo-halina do estuário	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 BASE DE DADOS.....	43
4.1.1 Imagens de satélite	43

4.1.1.1 Pré-processamento	46
4.1.2 Dados de Vazão	46
4.1.3 Vento	47
4.1.4 Dados complementares	48
4.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento	48
4.1.4.1.1 Maré	48
4.1.4.1.2 Vento	49
4.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	50
4.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas	52
4.3 CORRELAÇÃO DOS DADOS	53
4.3.1 Pluma x Vazão fluvial	53
4.3.2 Padrões de distribuição superficial das plumas x vento	54
5 RESULTADOS	55
5.1 BASE DE DADOS	55
5.1.1 Imagens de satélite	55
5.1.2 Vazão	57
5.1.3 Vento	59
5.1.4 Dados complementares	60
5.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento	60
5.1.4.1.1 Maré	60
5.1.4.1.2 Vento	61
5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	63
5.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas	64
5.2.1.1 Sem padrão de dispersão comum	65
5.2.1.2 Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura	66
5.2.1.3 Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura	67

5.2.1.4	Dispersão radial a partir da desembocadura.....	68
5.2.1.5	Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura.....	69
5.3	CORRELAÇÃO DOS DADOS.....	69
5.3.1	Pluma x Vazão fluvial.....	69
5.3.2	Pluma x vento.....	74
5.3.2.1	Ventos de baixa intensidade.....	76
5.3.2.2	Ventos do quadrante Norte.....	76
5.3.2.3	Ventos do quadrante Sul.....	78
5.3.3	Síntese das correlações obtidas.....	79
6	DISCUSSÃO.....	81
6.1	CORRELAÇÃO DOS DADOS.....	81
6.1.1	Influência das forçantes vazão fluvial e vento sobre a variabilidade espaço-temporal da pluma.....	81
6.1.2	Padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho.....	83
6.1.3	Outras forçantes não abordadas diretamente neste estudo...87	87
6.2	METODOLOGIA UTILIZADA.....	88
6.2.1	Imagens de satélite.....	88
6.2.2	Processamento das imagens de satélite.....	90
6.3	SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	91
7	CONCLUSÕES.....	93
8	REFERÊNCIAS.....	95
9	ANEXOS.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO NA ZONA COSTEIRA

As bacias hidrográficas exorréicas estão conectadas à zona costeira por fluxos hidrológicos como água, sedimento, matéria orgânica e inorgânica e espécies biológicas que, em parte, condicionam a dinâmica do ambiente marinho adjacente (MORRIS *et al.*, 1995; CROSSLAND *et al.*, 2005; NICOLODI *et al.*, 2009; MOREY *et al.*, 2009). A conexão entre o ambiente fluvial e marinho origina os estuários, que podem apresentar diversas configurações dependendo da bacia hidrográfica e da costa adjacente. A descarga fluvial de água doce pode também formar plumas que penetram no oceano costeiro (WALKER *et al.*, 2005; MCLUSKY & ELLIOTT, 2007; LUCAS, 2010).

As interações químicas, físicas e biogeoquímicas que ocorrem em uma pluma estuarina/fluvial (aqui definida como uma região oceânica que é influenciada pela descarga de água doce de um rio) são fatores que induzem a um número de importantes processos biogeoquímicos, como aumento ou limitação da produção biológica costeira, ciclos geoquímicos, transporte de poluentes, sendo também um importante componente do ciclo global do carbono (MORRIS *et al.*, 1995; BILLEN & GARNIER, 1997; DOXARAN *et al.*, 2009).

O conhecimento da dinâmica desses processos é extremamente importante para o gerenciamento integrado entre bacia, zona costeira e oceano, pois torna-se possível determinar a destinação final dos constituintes da pluma, tanto sólidos quanto líquidos, no ambiente estuarino e costeiro, uma vez que os mesmos podem influenciar a produtividade pesqueira, a balneabilidade de praias, o equilíbrio sedimentar, dentre outros (LIHAN *et al.*, 2008, HUQ, 2009). Em caso de acidentes com derramamento de petróleo ou poluentes tóxicos torna-se imprescindível também conhecer o comportamento da pluma, principalmente quanto a sua variabilidade espaço-temporal para que medidas emergenciais sejam tomadas adequadamente (WALKER *et al.*, 2005).

A necessidade de gestão integrada entre bacias hidrográficas e zonas costeiras tem sido cada vez mais reconhecida em diversos fóruns e programas internacionais de conservação e desenvolvimento sustentável. Esta abordagem leva em consideração que o gerenciamento da faixa continental-marinha precisa incorporar as águas fluviais e subterrâneas à montante e as águas costeiras adjacentes, uma vez que as ações de gerenciamento destes sistemas influenciam a zona costeira (ALBER, 2002; COCCOSIS, 2004). No Brasil a integração entre a gestão dessas duas políticas vem sendo estimulada pela Câmara Técnica de Integração da Gestão de Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e Zona Costeira (CTCOST) do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). O maior desafio para gestão integrada é delimitar o sistema estuarino, pois o mesmo apresenta limites difusos quanto aos gradientes de salinidade e parâmetros correlacionados. (NICOLODI *et al.*, 2009).

1.2 PLUMAS FLUVIAIS

1.2.1 Definição

Segundo Lihan *et al.*, (2008) plumas fluviais são caracterizadas como uma região de crescente gradiente de salinidade em direção ao oceano, e podem ocasionar elevada turbidez na água quando possuem grandes quantidades de sedimentos em suspensão e nutrientes, o que geralmente ocasiona coloração mais turva em relação às águas costeiras adjacentes. Minerais ricos em silício, alumínio e óxidos de ferro são encontrados em suspensão em muitos corpos d'água naturais. As partículas variam de argila ($< 4 \mu m$), silte (4 a $62 \mu m$), areia fina a grossa (62 a $200 \mu m$). Os sedimentos são provenientes principalmente do intemperismo e erosão das rochas continentais de bacias de drenagem e erosão costeira causada pelo retrabalhamento dos sedimentos marinhos pelas ondas (SUGUIO, 1973).

Dependendo da magnitude, uma pluma pode influenciar características físicas, químicas e biológicas do oceano por até centenas de quilômetros, no caso de rios de grande porte (LIHAN *et al.*, 2008; PIOLA *et al.*, 2008). Como exemplo pode-se citar o rio Amazonas que descarrega em média 134 mil m^3/s de água no oceano

Atlântico (73% do total nacional), formando uma pluma de extensão que varia entre 147 e 500 km, podendo se estender até o Mar do Caribe (NICOLODI *et al.*, 2009).

1.2.2 Hidrodinâmica e fatores atuantes

De acordo com Hetland (2005), uma pluma estuarino-fluvial pode ser dividida em três regiões interativas: (a) o estuário, (b) a região próxima a desembocadura e (c) região mais afastada da desembocadura, sendo as mesmas caracterizadas por processos distintos. Fisicamente, as regiões (a) e (b) são caracterizadas por intensa mistura advectiva de água doce com água salina, sofrendo influência da variação do fluxo fluvial e das marés, sendo o cisalhamento inercial a força dominante. Já na região (c) a mistura causada pelo *stress* do vento é o processo dominante, conforme descrito em Fong & Geyer (2002). O transporte de Ekman na camada superior pode se tornar suficiente para induzir instabilidade e misturar as duas camadas de água, fazendo a espessura da pluma aumentar. A Figura 1 apresenta um esquema que ilustra as três regiões.

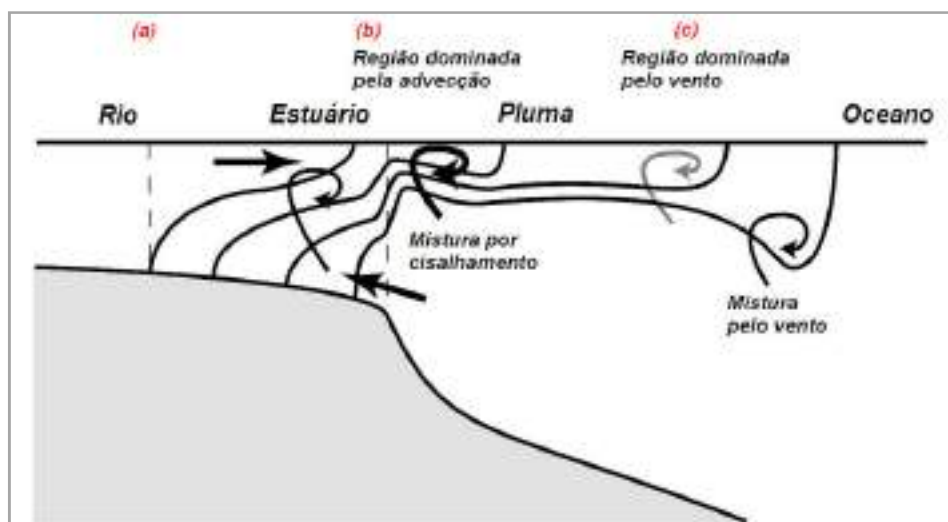


Figura 1: Estrutura de pluma estuarino-fluvial dividida em três regiões, de acordo com os processos de mistura que nelas ocorrem: a – estuário, b – desembocadura e c – região afastada da desembocadura. (modificado de Hetland, 2005).

De acordo com Yankovsky & Chapman (1997), a estrutura tridimensional de uma pluma pode apresentar diversas formas dependendo do fluxo do rio, batimetria

costeira e ação do vento. Entretanto, pode-se categorizá-las de acordo com seu contato com o fundo. Em alguns casos a pluma pode ocupar toda a coluna d'água em profundidades muito maiores que a profundidade do fluxo de água doce originado do rio. Nesse caso o fluxo permanece em contato com o fundo por grandes extensões, com a frente de densidade se entendendo da superfície ao fundo. Esse tipo de pluma é denominado de “*bottom-advected plume*” ou pluma com advecção de fundo, pois o comportamento da pluma é basicamente controlado por advecção na camada limite de fundo (Figura 2). A mesma é tipicamente estabelecida quando o fluxo do rio possui grande capacidade de transporte e/ou pequena diferença de densidade com relação a água oceânica.

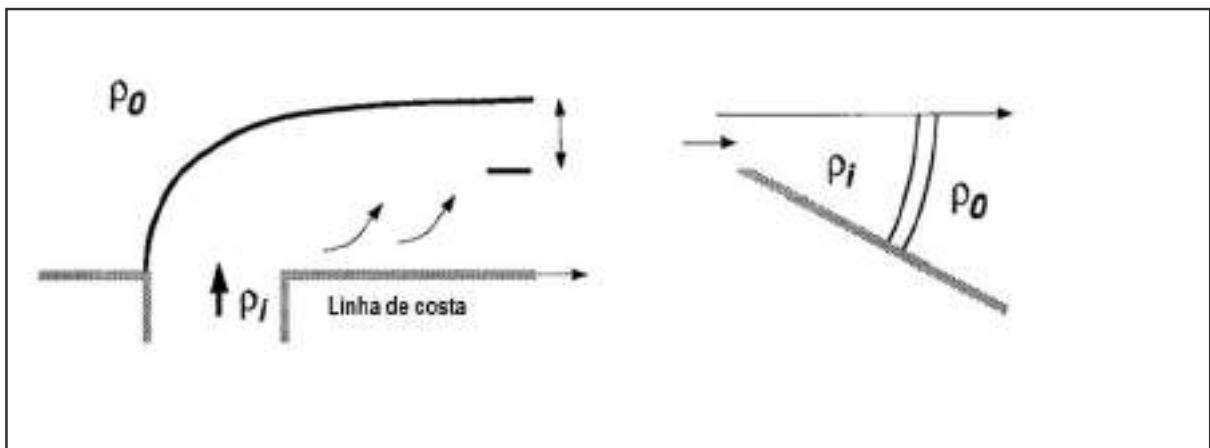


Figura 2: Esquema de uma pluma do tipo “*bottom-advected plume*” ou pluma com advecção de fundo. (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997).

Em outros casos, o fluxo de água doce que adentra o oceano forma uma fina camada sobre a água costeira mais densa (Figura 3). Essa pluma pode se entender por longas distâncias e ter pouco contato com o fundo, talvez exceto nas regiões muito próximas a costa. Esse tipo de pluma é denominado “*surface-advected plume*” ou “pluma com espalhamento superficial”. (CHAO & BOICOURT, 1986; CHAO, 1988; KOURAFALOU *et al.*, 1996; YANKOVSKY & CHAPMAN, 1997; GARVINE, 1999). A descarga do rio Niagara no lago Ontário (EUA) é um exemplo de uma pluma com espalhamento superficial na qual a extensão média da camada “flutuante” é de apenas 10 m e a pluma se estende *offshore* entre 10 e 15 km da foz do rio. Entretanto, plumas podem se encaixar entre os extremos de pluma com

advecção de fundo e pluma com espalhamento superficial (YANKOVSKY & CHAPMAN, 1997).

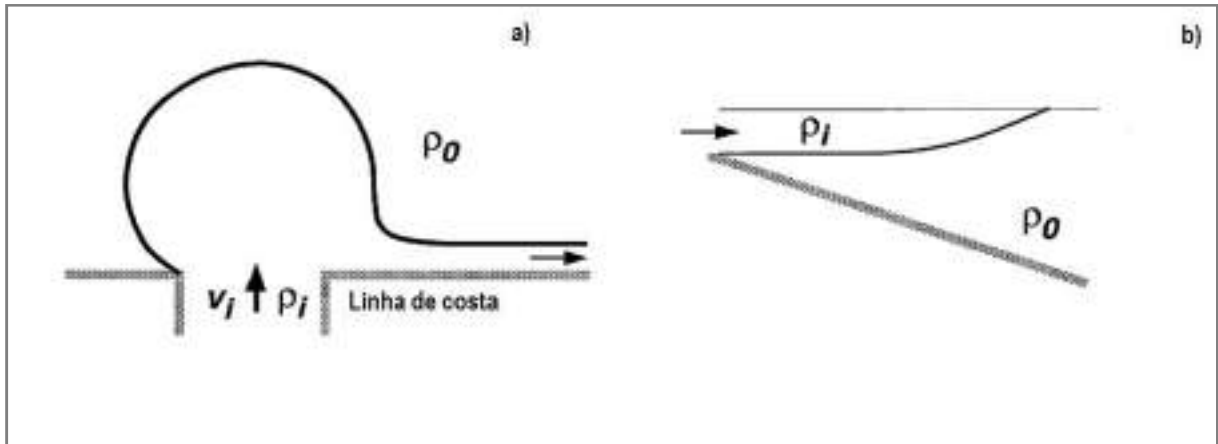


Figura 3: Esquema de uma pluma do tipo “*surface-advected plume*” ou pluma com espalhamento superficial (Hemisfério norte). a) vista por cima, b) vista lateral, ρ_i – fluxo fluvial, ρ_0 – água oceânica. (modificado de Yankovsky & Chapman, 1997)

Plumas de grande abrangência espacial reagem significativamente à rotação da Terra, sofrendo o efeito da força de Coriolis. Uma pluma de água doce de espalhamento superficial tende a se espalhar radialmente a partir de sua fonte, sendo defletida para a direita (Hemisfério Norte) e esquerda (Hemisfério Sul) pela força de Coriolis (YANKOVSKY & CHAPMAN, 1997). Esse tipo de pluma tipicamente se estende *offshore* com uma protuberância circular ligada à desembocadura e possui fluxo anticiclônico interno. Em muitos casos, uma corrente costeira estreita de água se desenvolve paralela à costa originada a partir da pluma e se propaga com a costa a sua direita, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4 (CHAO & BOICOURT, 1986; KOURAFALOU *et al.*, 1996).

Resultados de simulações computacionais realizados por Fong & Geyer (2002) de uma pluma hipotética vão ao encontro dos estudos supracitados (Figura 4). Em seus resultados os autores observaram uma corrente costeira com largura de alguns poucos quilômetros e velocidade média de 40 cm/s, enquanto a região da protuberância se estendeu a até 30 km *offshore* e possuía vorticidade anticiclônica com velocidades de borda de 50 cm/s e velocidades menores próximas ao centro. Essa feição chegou a armazenar 70% do fluxo que fluía para o oceano e foi

classificada com instável pelos autores, pois mesmo as simulações não levando em conta os efeitos de maré e vento essa feição apresentou crescimento de tamanho contínuo no tempo.

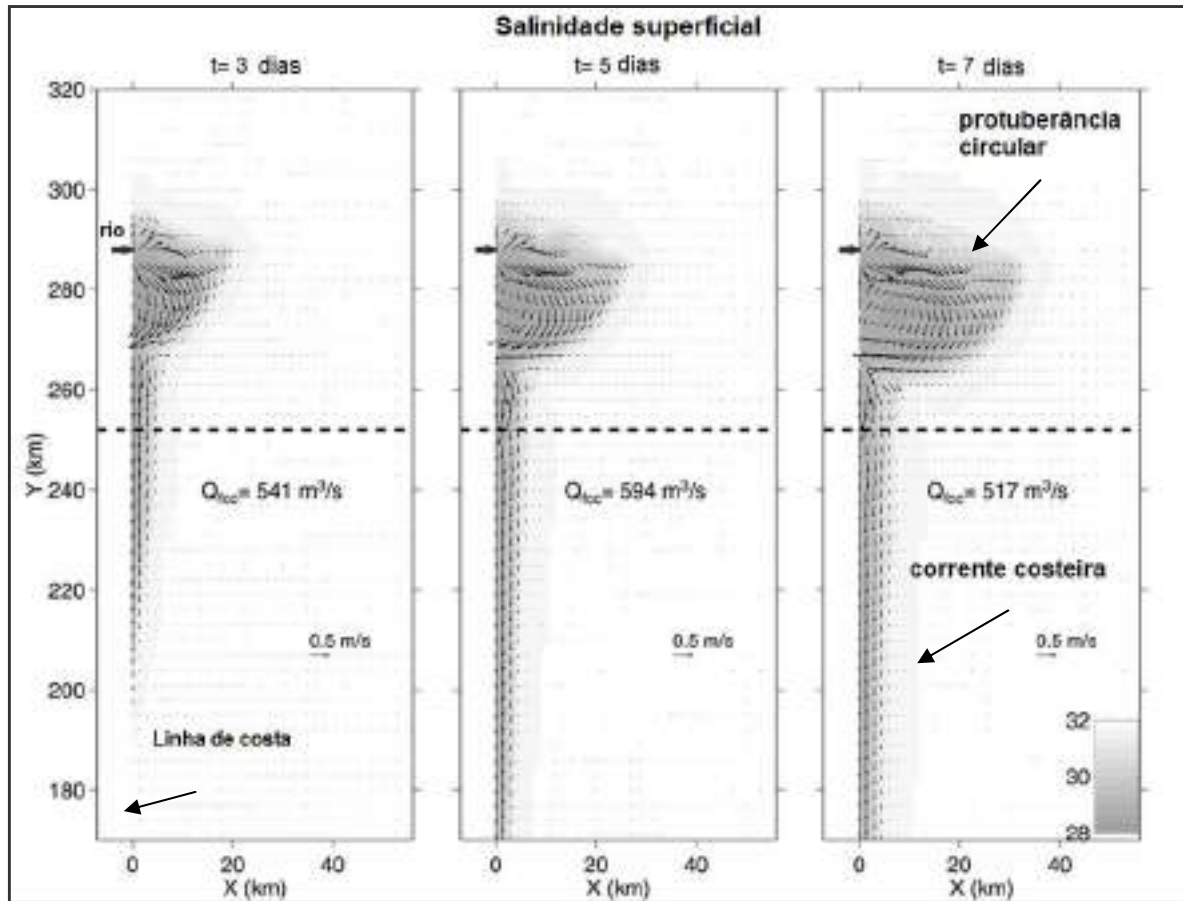


Figura 4: Cenário base simulado por Fong & Geyer (2002) após 3, 5 e 7 dias. O fluxo na protuberância circular ao longo do lado voltado para o mar transporta água que alimenta a corrente costeira e também água que recircula para a protuberância. Os tons de cinza indicam a salinidade. Vetores de velocidade indicam o campo de fluxo. Simulação considerando pluma localizada no Hemisfério norte.

Adicionalmente, Fong & Geyer (2002) observaram também um pequeno “vazamento” de água para a direita, em oposição a propagação das ondas de Kelvin, similar ao encontrado em outros estudos, segundo os autores. De acordo com Chapman & Lentz (1994) esse fluxo está relacionado ao ajustamento geostrófico inicial da descarga fluvial e parece se intensificar nos fluxos com maiores anomalias de densidade. Cabe ressaltar que as simulações não levaram em conta os efeitos da maré e do vento.

De acordo com Huq (2009), a geometria da linha de costa, em particular seu ângulo de inclinação e o ângulo da desembocadura fluvial com relação a linha de costa influenciam no padrão da pluma, principalmente com relação a formação ou não de uma protuberância defronte a foz. Yankovsky & Chapman (1997) utilizaram a relação entre a profundidade da camada de água superior (h) e a profundidade total do ambiente (D) h/D - medidas na desembocadura, além de diversos outros parâmetros (raio interno da onda de Rossby, profundidade de equilíbrio número de Burguer, dentre outros) para classificar as plumas com espalhamento superficial, com advecção de fundo ou intermediárias.

Para o caso de uma pluma com espalhamento superficial, a protuberância é suscetível a influência dinâmica de diversas forças externas. Por exemplo, o vento soprando perpendicularmente e em direção à costa pode confinar a protuberância em regiões mais rasas, enquanto ventos soprando para fora da costa podem favorecer o espalhamento da protuberância para *offshore*. Fortes correntes de marés podem aumentar a mistura da descarga fluvial e auxiliar no seu transporte para a plataforma continental, o que colabora para a formação da protuberância. Já correntes de maré mais fracas tem um efeito estabilizador, e implicam em menor mistura e conseqüente transporte *offshore* (YANKOVSKY & CHAPMAN, 1997; ISOBE, 2005). Já as correntes costeiras previamente existentes no ambiente podem inibir a formação da protuberância (FONG & GEYER 2002), ou induzir sua bifurcação e propagação pela plataforma continental (BERDEAL *et al.*, 2002). Por fim, Garvine (1975) e Halverson & Pawlowicz (2008) obtiveram correlações positivas entre a área superficial das plumas analisadas e a vazão fluvial.

1.2.3 Métodos de estudo

Para a análise da extensão e dinâmica de uma pluma podem-se utilizar métodos tradicionais ou métodos de estudo remoto. Em oceanografia os métodos tradicionais, também denominados “*in situ*” consistem na coleta de dados oceanográficos utilizando instrumentos a bordo de embarcações de pesquisa, e

podem fornecer avaliações precisas de múltiplos parâmetros de propriedades da água no oceano e em diversas profundidades. No entanto, para o estudo de uma pluma torna-se difícil estimar seus padrões de dispersão no ambiente costeiro utilizando-se somente tais medidas, pois as mesmas são normalmente restritas devido à logística de amostragem, custo, e também limitadas a um número de estações (e/ou amostras) que são usualmente inadequadas para a resolução e caracterização da dinâmica de uma pluma no espaço e no tempo. (NEZLIN & DIGIACOMO, 2005).

Já os métodos remotos ou “*ex situ*” consistem no estudo dessas feições remotamente sem a necessidade amostragens *in situ*, ou apenas realizando algumas amostragens para validação dos dados. Pode-se citar o sensoriamento remoto com a utilização de satélites orbitais e as modelagens matemáticas, que simulam o comportamento do corpo d’água a partir de uma série de equações de dinâmica dos fluidos (NEZLIN *et al.*, 2007; ISOGUCHI *et al.*, 2009). Os satélites podem oferecer inúmeros tipos de informações sobre os oceanos, como temperatura, cor, clorofila, turbidez, dentre outras, tendo a vantagem de seus produtos serem gratuitos em algumas fontes e fornecerem uma visão sinóptica e freqüente de uma determinada área que seria muito difícil de ser obtida por uma embarcação de pesquisa (SOUZA, 2005).

Entretanto, a disponibilidade de utilização de imagens de satélite muitas vezes depende das condições do tempo, pois a qualidade dos dados de cor do oceano depende da transparência atmosférica, que é seriamente afetada na presença de eventuais nuvens. Já os Radares de Abertura Sintética (SAR) podem coletar dados independentemente das condições atmosféricas e fornecer dados para avaliar uma pluma fluvial a partir da rugosidade da superfície marinha (NEZLIN *et al.*, 2007).

Nos estudos de campo as plumas são identificadas pelo gradiente de decréscimo de salinidade no sentido oceano-desembocadura fluvial. No entanto, os poucos satélites que atualmente realizam medidas da salinidade do oceano o fazem em resolução incompatível com a análise de plumas fluviais de pequeno e médio porte. Como exemplo, o satélite SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) lançado pela Agência Espacial Européia (ESA) realiza medições da salinidade do oceano com

resolução espacial de 35 km (ESA, 2011). Dessa forma, os estudos de plumas a partir de imagens de satélite são focados em outras características das águas costeiras que são influenciadas por plumas, principalmente a cor, que pode ser usada para distinguir essas águas das águas da pluma, particularmente devido à maior concentração de material em suspensão dessas últimas (THOMAS & WEATHERBEE, 2006; LIHAN *et al.*, 2008). Além do mais, a correlação entre as propriedades ópticas das águas superficiais e a salinidade já foi demonstrada em muitas regiões do oceano (NEZLIN & DIGIACOMO, 2005).

1.2.4 Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo de plumas

De acordo com JENSEN (2009), observam-se as seguintes características espectrais em um corpo d'água puro e profundo:

- comprimento de onda do azul (400 a 500 nm): quantidade mínima de absorção e espalhamento da luz incidente na coluna d'água (melhor transmissão). Nesses comprimentos de onda, do violeta ao azul claro, a radiação eletromagnética penetra mais do que qualquer outro comprimento de onda na água;
- Já nos comprimentos de onda do verde e amarelo (520 a 580 nm), laranja e vermelho (580 a 740 nm) e infravermelho próximo e médio (740 a 3000 nm), boa parte do fluxo radiante incidente é absorvido nas camadas superficiais, e pouco espalhamento acontece.

Portanto, o espalhamento molecular da luz violeta e azul (<520 nm) e a significativa absorção da luz nos comprimentos de onda do verde, amarelo, laranja e vermelho (520 – 700 nm) são responsáveis pela cor azul que vemos em uma água pura, sendo evidente em águas oceânicas puras e corpos d'água interiores profundos e não-túrbidos (JENSEN, 2009).

Os constituintes que afetam o comportamento espectral da água são chamados de componentes opticamente ativos e podem ser formados por: a) organismos vivos (fitoplâncton e bacterioplâncton); b) partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas) e; c) substâncias orgânicas dissolvidas. A turbidez causada pelos

sedimentos em suspensão é o principal fator atuante na resposta espectral de um corpo d'água, causando aumento e um deslocamento do pico de reflectância para comprimentos de onda maiores do espectro visível. O padrão de reflectância em águas que contém sedimentos em suspensão é função da quantidade e das características do material na água (MOLLERI *et al.*, 2007; NOVO, 2008). A Figura 5 apresenta a variação na resposta espectral de um corpo d'água pura em função do aumento da concentração de sedimentos em suspensão.

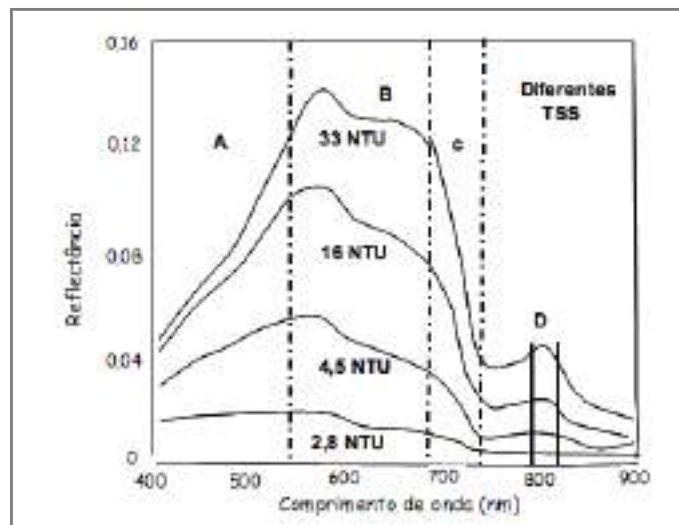


Figura 5: Curvas de reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão. As diferentes concentrações de sólidos em suspensão estão expressas em NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica - NTU). Adaptado de Goodin *et al.*, (1993 *apud* NOVO, 2008).

No geral, o aumento da concentração de sedimentos resulta em um aumento na reflectância na faixa entre 400 e 900 nm (NOVO, 2008). Entretanto, a relação entre o total de sólidos em suspensão e reflectância não é linear, sendo controlada por vários fatores, incluindo propriedades do sedimento como granulometria, composição mineralógica, formato e concentração (MOLLERI *et al.*, 2007; JENSEN, 2009).

Lodhi *et al.*, (1997) realizaram um experimento que determinou as características da reflectância espectral de dois tipos de solo (argiloso e siltoso) em várias concentrações de sedimentos em suspensão na água. O experimento consistiu de um espectrorradiômetro localizado acima de um tanque em que eram adicionadas diversas concentrações de água e sedimentos, sendo posteriormente realizada

leitura da reflectância. Os autores concluíram que a reflectância aumentava na região de 580 – 690 nm e na região do infravermelho próximo quando mais minerais estiveram suspensos nos corpos d'água. Ou seja, o pico de reflectância deslocava-se para maiores comprimentos de onda na faixa do visível (verde e vermelho) e infravermelho quando mais sedimentos em suspensão eram adicionados.

Dessa forma, pode-se mapear e analisar diversas características de plumas fluviais a partir de imagens de satélite adquiridas nessas faixas espectrais. Um corpo d'água com sedimentos em suspensão normalmente irá aparecer mais claro na imagem do que um corpo d'água próximo sem qualquer sedimento em suspensão, devido à maior reflexão e espalhamento da radiação eletromagnética pelos sedimentos (JENSEN, 2009).

Como exemplos de estudos pode-se citar os realizados por Nezlin & DiGiacomo (2005), Walker *et al.*, (2005), Thomas & Weatherbee (2005), Kaya *et al.*, (2006) e Lihan *et al.*, (2008), que utilizaram a cor da superfície do mar obtida a partir de imagens de diversos satélites (SeaWifs, AVHRR, MODIS e Landsat) para o mapeamento espaço-temporal de plumas fluviais. Os autores supracitados conseguiram mensurar diversas características das plumas, como área, tamanho e variabilidade espaço-temporal e correlacionaram esses atributos com forçantes hidrológicas, meteorológicas e oceanográficas (i. e., vazão do rio, vento, correntes, dentre outras). Outros estudos, inclusive utilizam as imagens de satélite para inferir a concentração de sedimentos em suspensão na superfície da água (PECKHAN, 2008; TEODORO *et al.*, 2008; DORAXAN *et al.*, 2002).

Thomas & Weatherbee (2005) estudaram a variabilidade temporal da pluma do rio Columbia (Oregon/Washington, EUA) a partir de imagens do sensor *SeaWifs* (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor). Com a utilização de classificações supervisionadas os autores dividiram a água do ambiente marinho adjacente à desembocadura do rio em 4 classes: águas do núcleo da pluma, águas do perímetro da pluma, outras águas da plataforma interna e água *offshore*. Foram encontrados dois padrões principais: de verão e inverno, que por possuírem condições meteorológicas diferentes apresentaram padrões distintos de distribuição da pluma.

Há na literatura inúmeros estudos que utilizam os satélites da série Landsat para o mapeamento de plumas fluviais e/ou determinação da quantidade de sedimentos em suspensão (CABRAL *et al.*, 1990; CABRAL, 2003; REIS *et al.*, 2003; Kaya *et al.*, 2006; Lorenzetti *et al.*, 2007; ZOFFOLI *et al.*, 2011). De acordo com NASA (2008) a banda 2 (520-600 nm) apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Cabral *et al.*, (1990) constataram que as bandas 1 (450-520 nm) e 2 são as mais sensíveis à variações na concentração de sedimentos mais grossos (areia fina e areia grossa) e as bandas 3 (630-690 nm) e 4 (760-900 nm) para sedimentos mais finos (silte e argila).

A pluma do rio Doce é uma das feições oceanográficas mais proeminentes na plataforma continental do Estado do Espírito Santo. Sua influência no ambiente marinho pode alcançar dezenas de quilômetros em épocas de alta descarga. Entretanto, faltam estudos sobre a dinâmica dessa pluma e como fatores ambientais externos a influenciam. O presente trabalho utiliza imagens de satélites das séries Landsat TM e ETM e CBERS 2 e 2B para delimitar a pluma do rio Doce. Os padrões de plumas obtidos foram correlacionados com dados de vazão, vento, dentre outros, visando inferir a influência dessas forçantes na variabilidade espaço-temporal da pluma.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Descrever a variabilidade espaço-temporal da pluma do rio Doce (ES) no ambiente marinho adjacente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os principais padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho;
- Analisar o efeito da variabilidade da vazão sobre o tamanho do núcleo da pluma do rio Doce;
- Verificar o efeito do vento sobre a pluma do rio Doce;
- Correlacionar os principais padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho com a vazão e o vento.

3. ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo faz uma breve análise das principais características da bacia com um enfoque na região do baixo rio Doce (ES) e ambiente marinho adjacente.

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

A bacia hidrográfica do rio Doce está situada na região Sudeste do Brasil e compreende uma área de drenagem de cerca de 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais (MG) e o restante ao Estado do Espírito Santo (ES), sendo a maior em área e disponibilidade hídrica deste último (AGÊNCIA TÉCNICA BACIA DO RIO DOCE, 1998; EPE, 2005). A extensão longitudinal da bacia é da ordem de 450 km na direção predominante ESE-WNW, sendo a largura da ordem de 420 km, na direção predominante NNE-SSW. A Figura 6 apresenta a localização da bacia do rio Doce no Brasil e no ES.

A gestão da bacia é realizada pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CBH-DOCE), instituído no ano de 2002 e que conta com representantes dos dois Estados. O rio Doce possui extensão de 853 km e recebe este nome quando do encontro do rio Piranga com o rio do Carmo, cujas nascentes estão situadas nas encostas das serras da Mantiqueira e Espinhaço, onde as altitudes atingem cerca de 1.200 m. Ao longo de seu curso, sobretudo a partir da cidade de São José do Goiabal, o rio Doce segue em altitudes inferiores a 300 m. A partir da cidade de Linhares, o rio segue em um único canal retilíneo desprovido de afluentes, e deságua no Oceano Atlântico sob a forma de delta, no povoado de Regência, ES. (EPE, 2005, EPE, 2009).

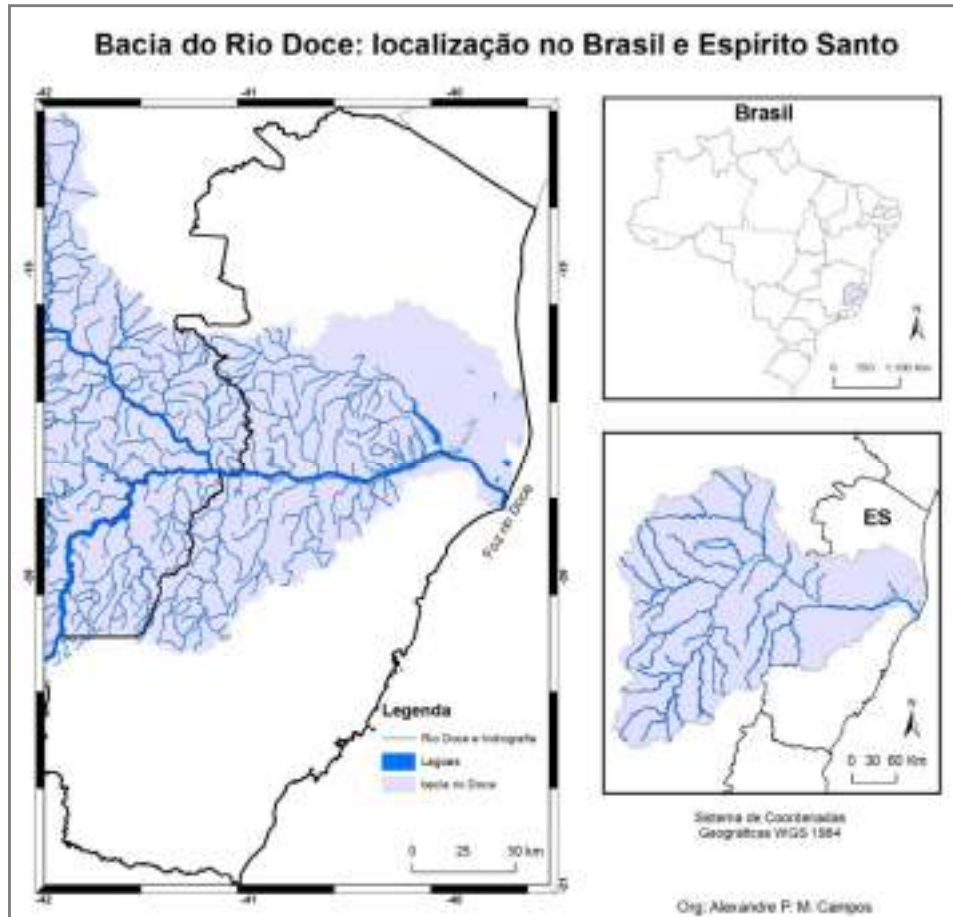


Figura 6: Localização da bacia hidrográfica do rio Doce no Brasil e Espírito Santo

3.2 GEOMORFOLOGIA

A região do baixo rio Doce possui três feições geológicas principais, apresentadas na Figura 7: (a) o Pré-Cambriano, (b) os tabuleiros terciários da formação Barreiras e (c) a planície costeira, formada por depósitos Quaternários que constituem um delta (SUGUIO *et al.*, 1982; MARTIN *et al.*, 1996a e MARTIN *et al.*, 1996b).

- (a) O Pré-Cambriano é composto por rochas cristalinas, apresenta relevo montanhoso e rede de drenagem dendrítica.
- (b) A formação Barreiras apresenta ligeira declividade em direção ao oceano (1,2 m/km), sendo cortada por redes hidrográficas subparalelas e freqüentemente caracterizada pela presença de amplos vales com fundos planos colmatados

por sedimentos Quaternários. Estes vales são ocupados por cursos de água muito pequenos em relação a sua dimensão.

- (c) A planície costeira alcança seu máximo desenvolvimento no Estado ao longo do curso do rio Doce, atingindo uma largura máxima aproximada de 38 km e um comprimento de cerca de 130 km. É constituída de sedimentos litorâneos arenosos e depósitos areno-argilosos fluviais, além de zonas baixas superficialmente turfosas.

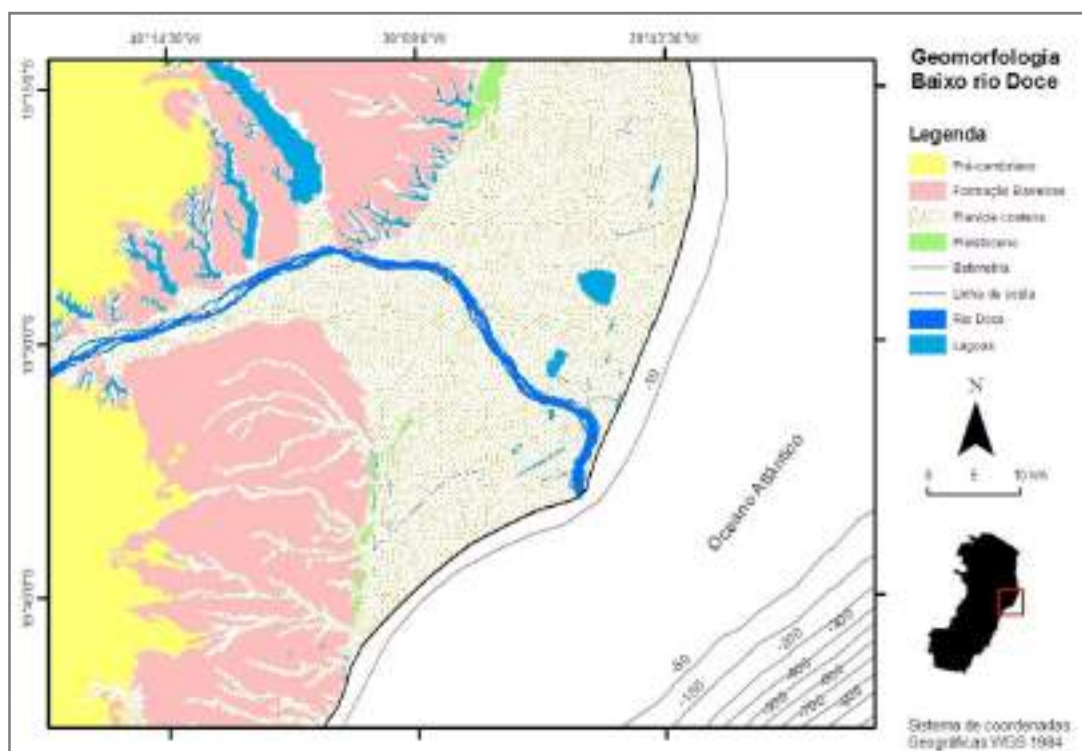


Figura 7: Geomorfologia na região do baixo rio Doce segundo SUGUIO *et al.*, (1982).

Segundo Silveira (1964) na planície deltaica do rio Doce podem ser observados sistemas lagunares, sistemas de cordões litorâneos, e praias arenosas associadas aos cordões litorâneos regressivos. A plataforma continental no Espírito Santo atinge sua largura máxima ao norte, na porção sul do Banco de Abrolhos. A partir daí a plataforma estreita-se consideravelmente, atingindo um mínimo de 40 km em frente à Santa Cruz, município de Aracruz (Figura 8). Na porção ao largo do rio Doce a plataforma apresenta comportamento progradacional, inclusive com a formação de um delta submarino do referido rio (MARANGONI, 2009).

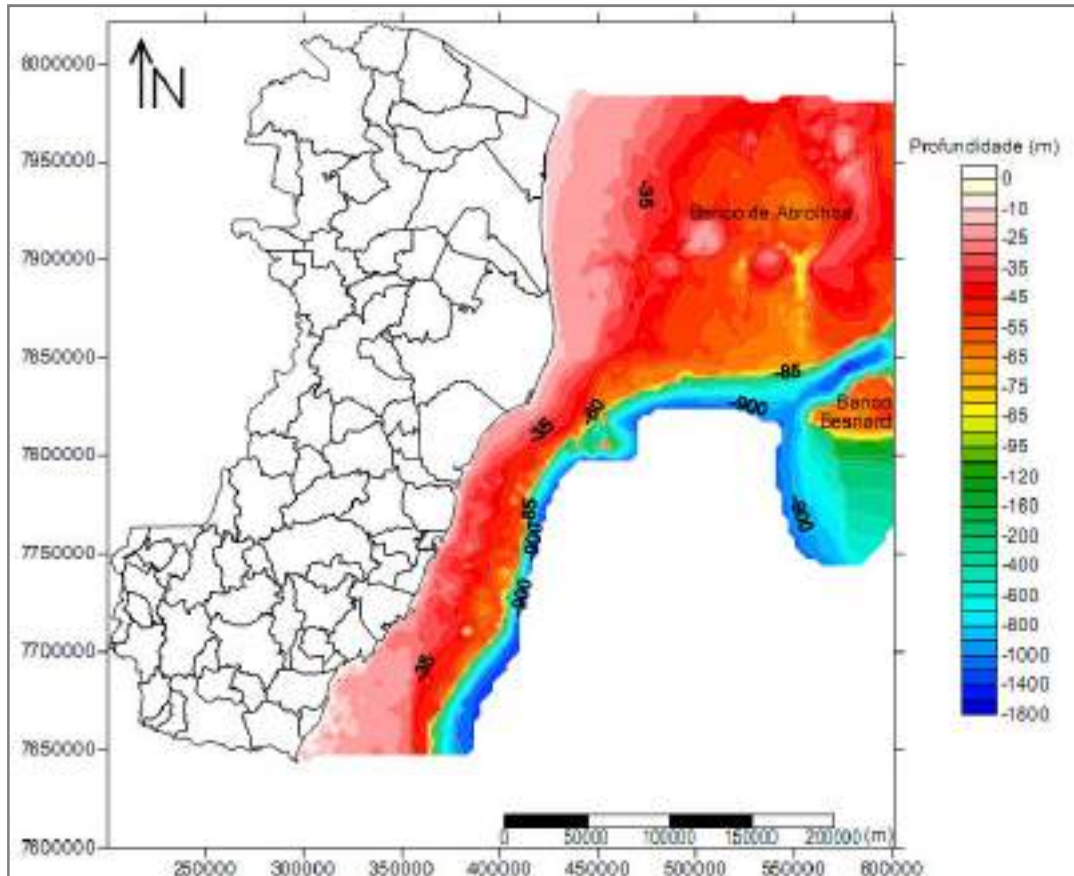


Figura 8: Mapa batimétrico da plataforma continental do Espírito Santo. (Marangoni, 2009).

A linha de costa na região do delta do rio Doce apresenta mudança de orientação: ao norte da foz está orientada em 26° (em relação ao norte) enquanto ao sul está orientada a aproximadamente 60° . O canal principal do rio, à montante da foz possui largura média de 1 km, e a desembocadura possui largura média de 400 metros, e morfologia muito influenciada pelo regime fluvial, inclusive com a formação de bancos arenosos. A Figura 9 apresenta batimetria detalhada da região da foz do rio Doce. Nesta representação, pode-se observar que as profundidades na região imediatamente defronte à desembocadura variam entre 4 e 6 metros.

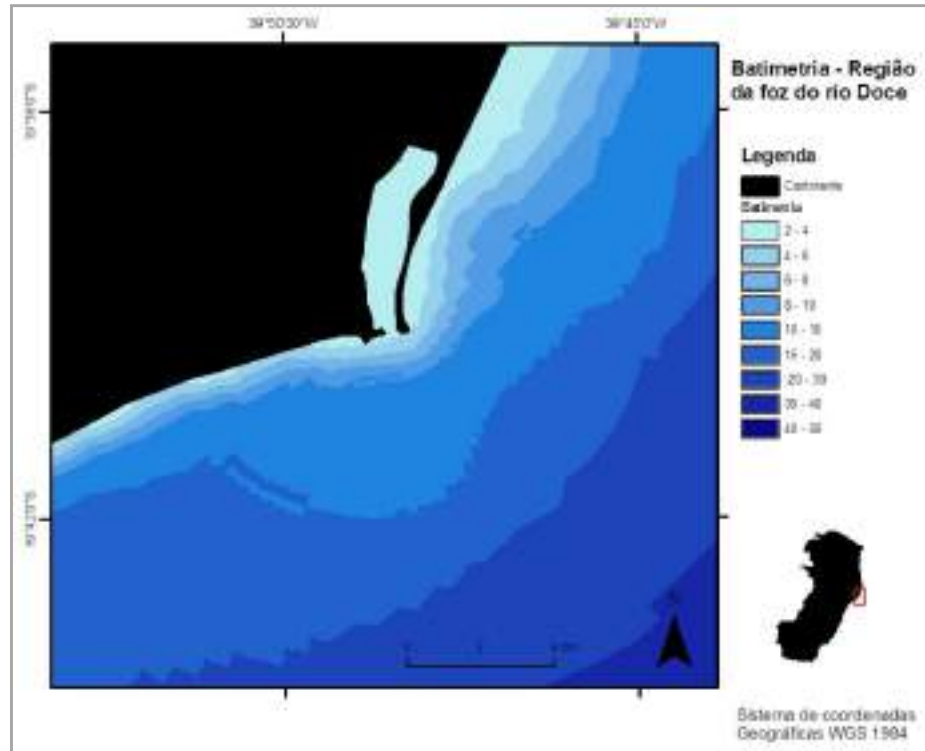


Figura 9: Mapa batimétrico na região da foz da desembocadura do rio Doce. Dados interpolados (método de Kriging) a partir da carta náutica DHN nº 1400 e batimetria de campo realizada no dia 19/02/2010. Segundo Pedruzzi (em desenvolvimento).

3.3 CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA

Devido a sua grande extensão territorial, diferenças de relevo e topografia e atuação de várias massas de ar diferentes, a bacia do rio Doce não apresenta uniformidade climática. De acordo com a classificação climática de Köppen, a bacia do rio Doce pode ser classificada em três tipos climáticos (COELHO, 2007):

- Cwb – tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos: presente nas serras da Matiqueira e do Espinhaço e nascentes do rio Doce (MG);
- Cwa – tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes: presente nas nascentes de alguns afluentes (cabeceras dos rios Santo Antonio e Suaçuí Grande);
- Aw – quente com chuvas de verão tropical/chuvoso, com estação seca no inverno: presente nos trechos médio e baixo do rio Doce (próximo ao litoral)

Na região do baixo rio Doce a proximidade com o oceano influencia fortemente o clima, e as temperaturas médias se situam entre 22 e 24°C. Ocorre estação seca durante o outono-inverno (abril-setembro) e chuvoso entre a primavera e verão (outubro-março), sendo que as maiores precipitações pluviométricas ocorrem de novembro a janeiro, conforme pode ser visualizado na Figura 10. As temperaturas máximas geralmente ocorrem em janeiro e as mínimas entre junho e julho (CUPOLILLO, 2008; EPE, 2009).

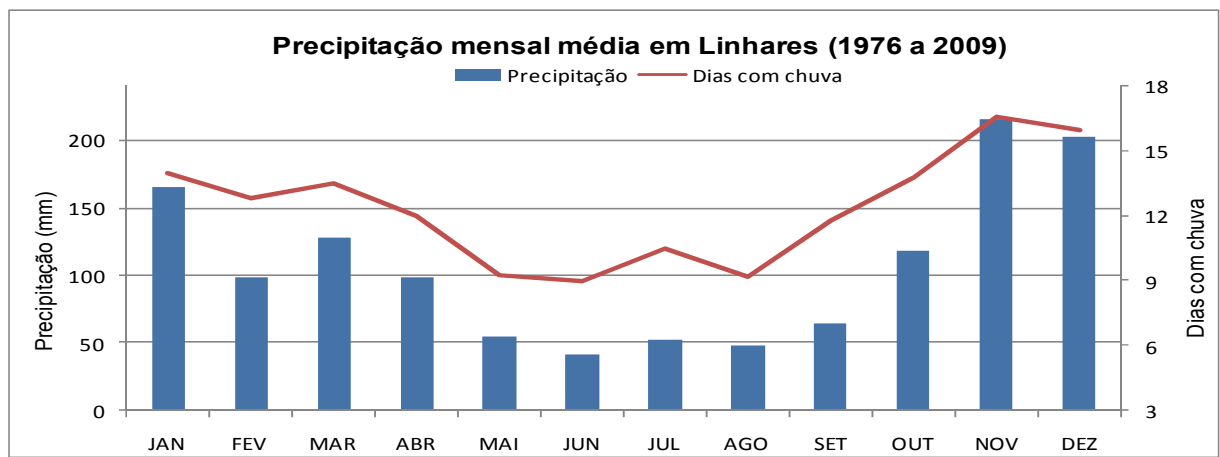


Figura 10: Precipitação mensal média (mm) em Linhares e dias com chuva obtidos a partir de estação meteorológica do INMET localizada nas coordenadas 19,35 S, 40,068 W para o período 1976-2009.

A precipitação anual média obtida a partir de estação climatológica do INMET para o período 1976 – 2009 foi de 1.289 mm. No entanto, ocorreram variações anuais significativas no referido período (entre 900 e 1.900 mm), conforme apresentado pela Figura 11.

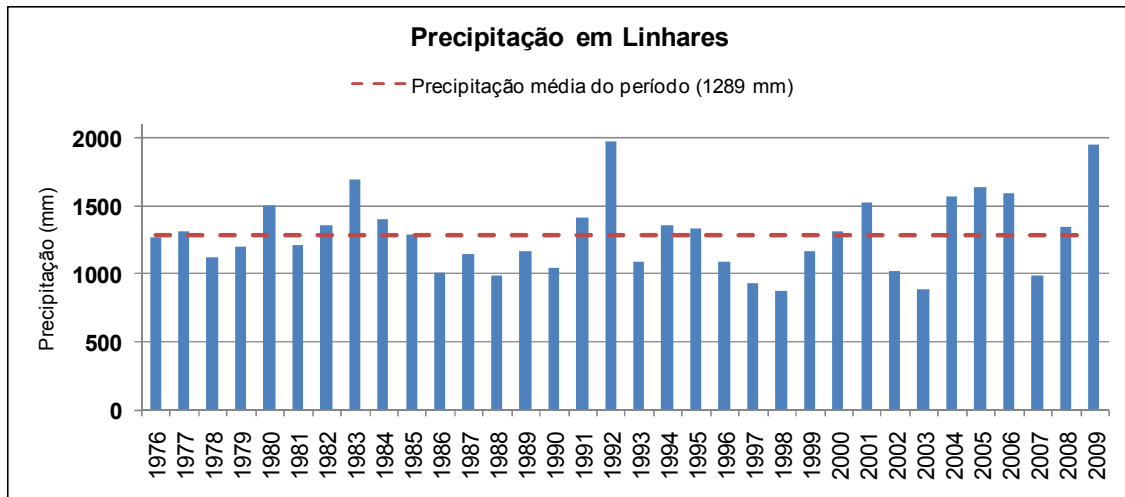


Figura 11: Precipitação anual em Linhares (mm) para o período entre 1976 e 2009 obtida a partir de estação meteorológica do INMET.

Entretanto, de acordo com Cupolillo (2008) o reflexo das chuvas no aumento da vazão do rio Doce faz-se sentir a partir do mês de novembro. Tal fato relaciona-se às chuvas que ocorrem nos primeiros meses da estação chuvosa, outubro e novembro. Nesses meses, o solo não está saturado de água, tornando o processo de infiltração de água no solo superior ao de escoamento superficial. A partir do início de dezembro, o “*runoff*” (escoamento superficial) passa a ser predominante em relação ao processo de infiltração de água no solo, ou seja, a resposta ao aumento de vazão torna-se mais rápida. No entanto essa dinâmica varia dentro da bacia, sendo fortemente influenciada pelas unidades geológicas, condições topográficas e pela cobertura do solo.

As Figuras 12 e 13 foram elaboradas a partir da consolidação dos dados de vazão disponíveis para a estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) localizada no rio Doce em Colatina para todo o período de dados disponível entre 1939 e 2009 (ANA, 2010). A partir da análise do mesmo percebe-se que o regime hidrológico de rio é bem definido, sendo marcado por um período de cheia e um de vazante. O período de dezembro a março apresenta os maiores valores médios de vazão ($> 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) e o período entre maio e outubro os menores valores (400 a $700 \text{ m}^3/\text{s}$). No entanto, o fluxo do rio apresenta variações inter-anuais significativas, com diversos registros de secas e enchentes. A vazão mínima registrada foi de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ (setembro de 2008) e a máxima ultrapassou $8.600 \text{ m}^3/\text{s}$ (janeiro de 2007).

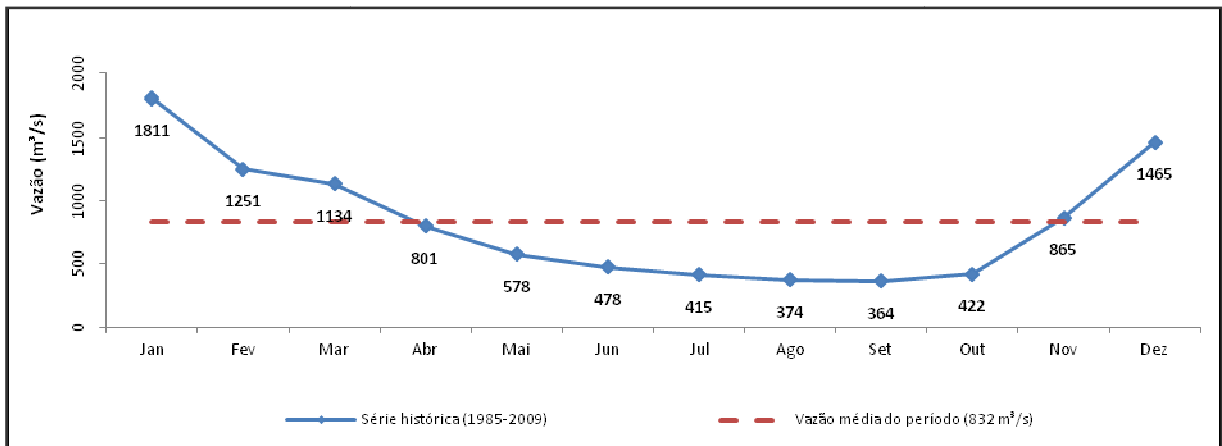


Figura 12: Vazões médias mensais (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500) e média de vazão anual. Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

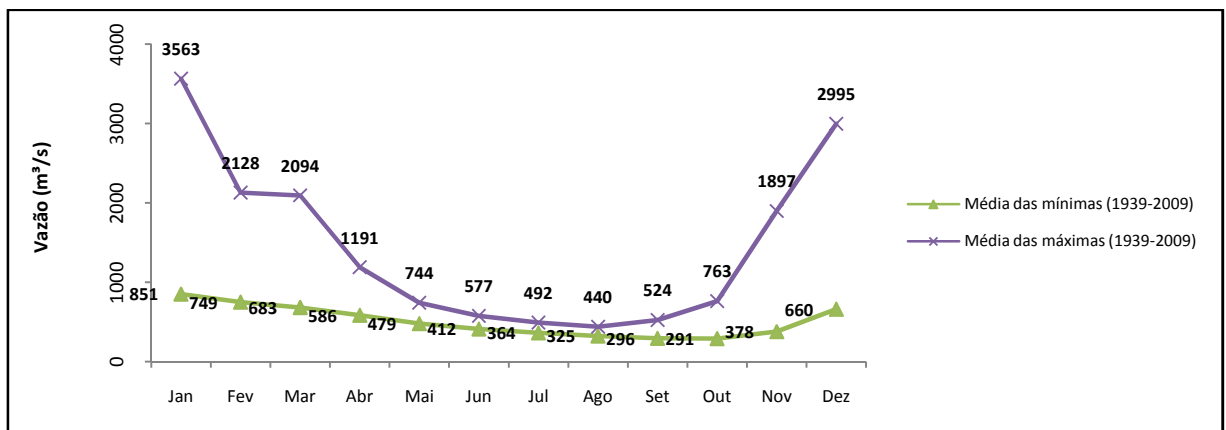


Figura 13: Vazões médias mínimas e máximas (m^3/s) na estação fluviométrica de Colatina (código 56994500). Período dos dados: cerca de 65 anos entre 1939 e 2009. Dados tratados no presente estudo.

Segundo Coelho (2007) a bacia possui nove usinas hidrelétricas (UHEs), sendo que duas merecem destaque pelo porte e por estarem na calha principal do rio Doce: a UHE de Mascarenhas e a UHE de Aimorés. O referido autor, após analisar séries históricas de vazões da estação fluviométrica de Colatina, antes e depois da implantação dessas UHE's constatou um aumento da frequência de vazões mensais inferiores a média histórica calculada, sobretudo após a construção da UHE de Mascarenhas. Essa maior frequência de vazões inferiores à média tem uma relação direta com a capacidade de transporte de sedimentos de fundo ao longo do perfil

longitudinal, e provavelmente contribuiu para mudanças na morfologia fluvial devido à diminuição da carga de sedimentos transportados pelo rio, ocasionando o surgimento de bancos arenosos, aumento de processos de erosão marginal e costeira. A Tabela 1 apresenta algumas características das referidas UHE's.

Tabela 1: Principais características da UHE de Mascarenhas e UHE de Aimorés segundo Coelho (2007).

Descrição	UHE Mascarenhas	UHE Aimorés
Localização	Baixo Guandu (ES)	Divisa entre ES e MG
Início da operação	1974	2005
Área inundada	5,3 km ²	33,9 km ²
Distância até a foz	143 km	165 km
Potência	181,5 MW	330 MW

Além de atuar como barreira física (molhe hidráulico), a descarga do Rio Doce atua como fonte principal de sedimento para as áreas costeiras adjacentes e para a plataforma continental interna (COUTINHO, 1974). De acordo com Albino (1999), as areias finas a grossas da carga atual estão limitadas à proximidade da desembocadura e superficialmente à plataforma continental interna adjacente. As areias grossas a muito grossas encontradas atualmente são provenientes do retrabalhamento dos sedimentos dos antigos cordões litorâneos.

Segundo Bandeira Jr. *et al.* (1975), a vazão e o regime de transporte sedimentar do Rio Doce variam em função do período pluviométrico: em períodos de alta pluviosidade a vazão e a carga sedimentar são altas e compostas por areias, já nos períodos de baixa pluviosidade a vazão é baixa e a carga sedimentar é moderada e composta por areias e siltes.

3.4 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS

3.4.1 Ventos

Segundo Nimer (1989), na região sudeste os ventos que sopram mais freqüentemente durante o ano são dos quadrantes de Leste e Nordeste, provenientes das altas pressões subtropicais, ou seja, do anticiclone semifixo do Atlântico Sul, sendo esse anticiclone subtropical responsável pela estabilidade do tempo. No inverno o deslocamento do centro de baixa pressão para norte, associado às passagens de um sistema anticiclônico de alta pressão promovem a mudança de direção dos ventos, que sopram de sudeste a sul. Segundo Albino *et al.*, (2001), estes ventos estão associados às frentes frias que chegam periodicamente à costa do Estado.

3.4.2 Ondas

Piumbini (2009) realizou uma caracterização do clima de ondas em área localizada entre as coordenadas 23° a 18°S e 40° a 35°W, através de análise estatística de 45 anos de dados de re-análise de onda do European Centre for Medium-range Weather Forecast - ECMWF, entre setembro de 1957 a agosto de 2002. O conjunto de dados de onda avaliados mostram que as ondas são provenientes, principalmente, do quadrante sudeste - SE (90° a 180°), totalizando 59% das direções apresentadas, seguida das ondas provenientes do quadrante nordeste - NE (0° a 90°), com cerca de 27% do total de ocorrências. A altura significativa do conjunto de dados analisados ocorreu, predominantemente, entre o intervalo de 1,0m e 2,0m de altura (cerca de 80%).

De modo geral, na região do ES, as ondas provenientes da direção NE apresentam, geralmente, pequenas alturas, caracterizando baixa quantidade de energia e pequeno período. Ao contrário, as ondas de SE possuem geralmente alturas maiores e períodos mais longos e estão associadas à entrada de marulhos (swell) na região (PIUMBINI, 2009).

Segundo Albino (1999) as ondas na costa norte do Espírito Santo são geradas pelos sistemas de ventos existentes na região, estando as ondas do setor sul associadas às frentes frias. A altura significativa das ondas na região é entre 0,6 e 0,9 m, raramente ultrapassando 1,5 m.

3.4.3 Correntes

A Corrente do Brasil (CB), originada pela bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial, flui na plataforma continental defronte ao Estado do Espírito Santo, na direção sul bordejando a costa até a região da Convergência Subtropical, na latitude aproximada de 38°S (Figura 14). A CB é identificada como uma corrente de contorno oeste que está associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul (CIRANO *et al.*, 2006; SILVEIRA, *et al.*, 2000). As características dessa corrente variam conforme a latitude, sendo que em certas localidades a CB pode afastar-se da quebra de plataforma e se inclinar em seus núcleos superior e inferior, alinhando-se ou desalinhando em função da isóbata de ajuste que garanta a conservação da sua vorticidade potencial (SCHMID, *et al.*, 1995).

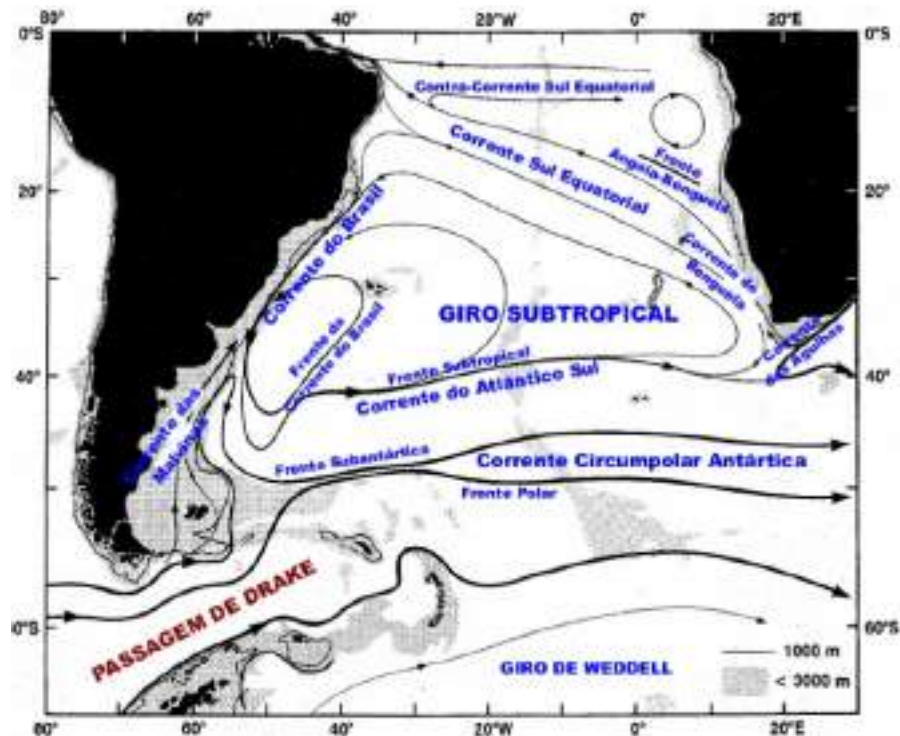


Figura 14: Circulação oceânica no Atlântico Sul, com destaque para a corrente do Brasil, formada a partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial segundo Moura (2008).

Na região entre seu sítio de origem e a latitude de 20° (proximidades da cadeia Vitória-Trindade), a CB é uma corrente rasa, com aproximadamente 200 m de extensão vertical, quente e salina, fluindo acima da quebra de plataforma com transporte próximo de 5Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (FRANCISCO, 2007 *apud* MOURA, 2008) e velocidade média entre 30 e 50 cm/s (CASTRO FILHO & MIRANDA, 1998). Uma feição oceanográfica associada à CB que tem sido investigada nos últimos anos é o Vórtice de Vitória. Estudos indicam que sua ocorrência não é permanente e sua estrutura está associada às peculiaridades da topografia do fundo marinho na região do Banco de Abrolhos e da Cadeia Vitória-Trindade.

Na plataforma continental interna e na região costeira próxima à Vitória-ES, as correntes marinhas mostram um comportamento que pode ser descrito a partir da análise do vento local. De maneira geral, os ventos geram correntes costeiras, acompanhando a direção do vento, que podem atingir até 100 cm/s (CASTRO FILHO & MIRANDA, 1998). Nesta região, ventos de norte tendem a promover correntes para sul, enquanto que ventos de sul tendem a promover correntes para norte.

Essa correlação entre ventos e correntes na costa do Estado já foi demonstrada por diversos autores. Environlink (2006 *apud* M2 Consultoria e Serviços, 2010) realizou medições de correntes com um ADCP na costa de Vila Velha-ES, e constatou que os dados de corrente não revelaram uma forte dependência das marés, entretanto verificou-se uma boa correlação com o regime de ventos. As correntes deslocaram-se paralelamente à linha de costa e apresentaram direção NE para condições de “tempo bom”, SW em condições de “mau tempo” e direções intermediárias nos períodos de inversão do vento.

ASA (2003) realizou medições de correntes durante período de um mês nas proximidades de Regência, litoral de Linhares. As correntes costeiras predominantes seguiram o eixo NE-SW (Figura 15). De acordo com Albino (1999), na situação de predominância dos ventos alísios de nordeste, as correntes longitudinais costeiras se orientam de norte para sul e durante a passagem de frentes frias, os ventos provenientes de sudeste e sudoeste desenvolvem uma corrente longitudinal de sul para norte.

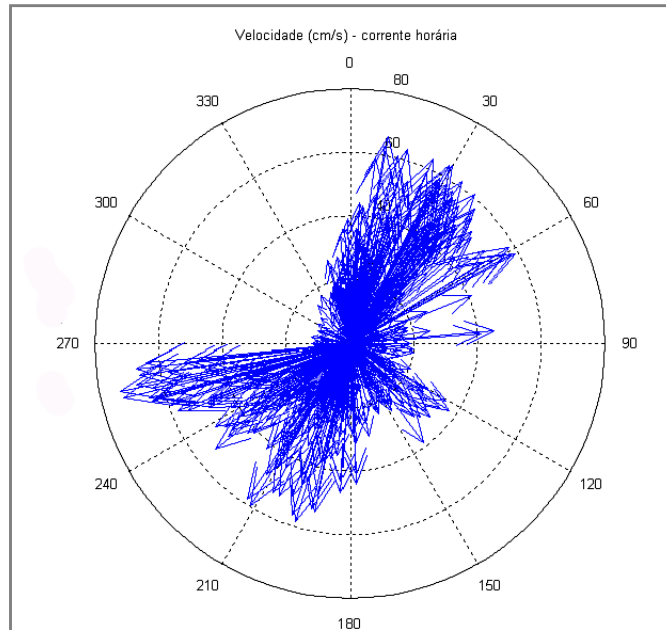


Figura 15: Diagrama rosa de correntes para dados coletados a 2 m de profundidade nas proximidades de Regência, ES, entre 12 out. e 14 nov. 2002, utilizando-se um correntógrafo acústico fundeado em profundidade de 2m (convenção vetorial). ASA (2003).

3.4.4 Maré

ASA (2003) realizou medições de nível do mar durante período de um mês nas proximidades de Regência. A Figura 16 apresenta o espectro de amplitudes calculado a partir da série de dados obtida. Nela observa-se um pico com amplitude de aproximadamente 40 cm na faixa de frequência de dois ciclos por dia, correspondente à maré semidiurna. Um segundo pico pode ser observado na faixa de 1cpd (maré diurna), com amplitude em torno de 10 cm. A Tabela 2 apresenta as constantes harmônicas calculadas por ASA (2003) a partir das informações de nível de água obtidas no fundeio. A componente M_2 predominou com amplitude de 48,57 cm, seguida da S_2 com 19,56 cm.

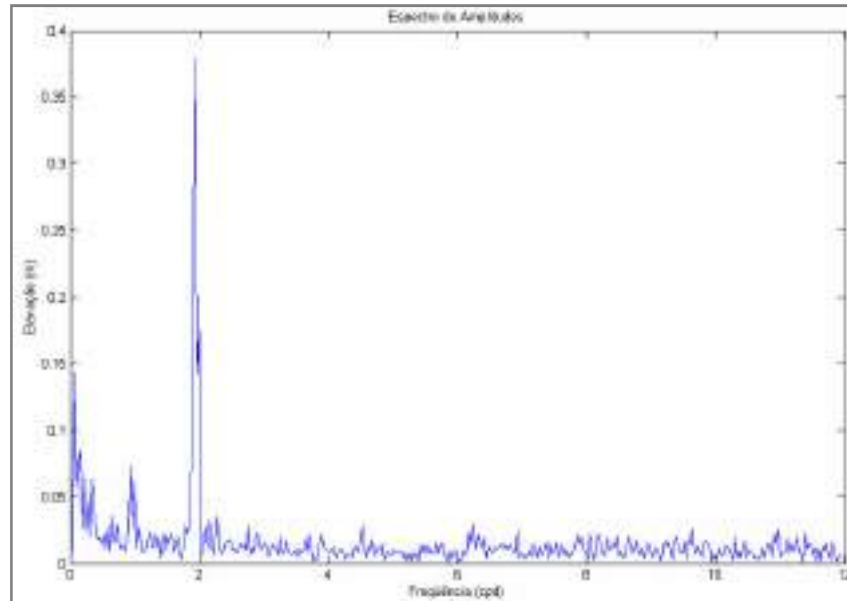


Figura 16: Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de variação do nível do mar registrada no período de 12 de outubro a 14 de novembro 2002, dt=1h. ASA (2003).

Tabela 2: Amplitudes e fases das principais componentes harmônicas de maré obtidas em Regência - ES. ASA (2003).

Comp. de maré	Amplitude (cm)	Fase (°)
O1	8,40	142,10
K1	4,82	229,38
N2	8,58	162,44
M2	48,57	139,18
S2	19,56	129,73
K2	5,32	128,97

A Tabela 3 apresenta os níveis de: média das preamares e baixa-mares de sizígia (MHWS e MLWS) e média das baixa-mares e preamares quadratura (MHWN e MLWN) para a estação maregráfica mais próxima – Terminal de Barra do Riacho (Aracruz, ES).

Tabela 3: Níveis das marés de sizígia e quadratura (m) para a estação maregráfica de Barra do Riacho (19° 50,5'S e 40° 03,5W) - em metros. Femar (2000).

Média das Preamares de Sizígia (MHWS)	1,47
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS)	0,13
Média das Preamares de Quadratura (MHWN)	1,03
Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN)	0,57
Nível Médio	0.80

3.4.5 Estrutura termo-halina do estuário

Com relação à estrutura termo-halina do estuário do rio Doce, ASA (2003) realizou perfis de salinidade e temperatura em estações oceanográficas na região estuarina no dia 18 de março de 2002 com um STD Sensoredata SD-200 (Figura 17). Neste dia o rio apresentava vazão de 948 m³/s. As estações anteriores à desembocadura apresentaram valor zero de salinidade e temperatura variando pouco em toda a coluna d'água. Apenas a estação localizada cerca de 1 km a jusante da desembocadura do rio apresentou forte estratificação de salinidade e temperatura. A água da pluma fluía em uma camada de 1,9 m de espessura e a diferença de densidade entre essas duas camadas era de cerca de 20 kg/m³.

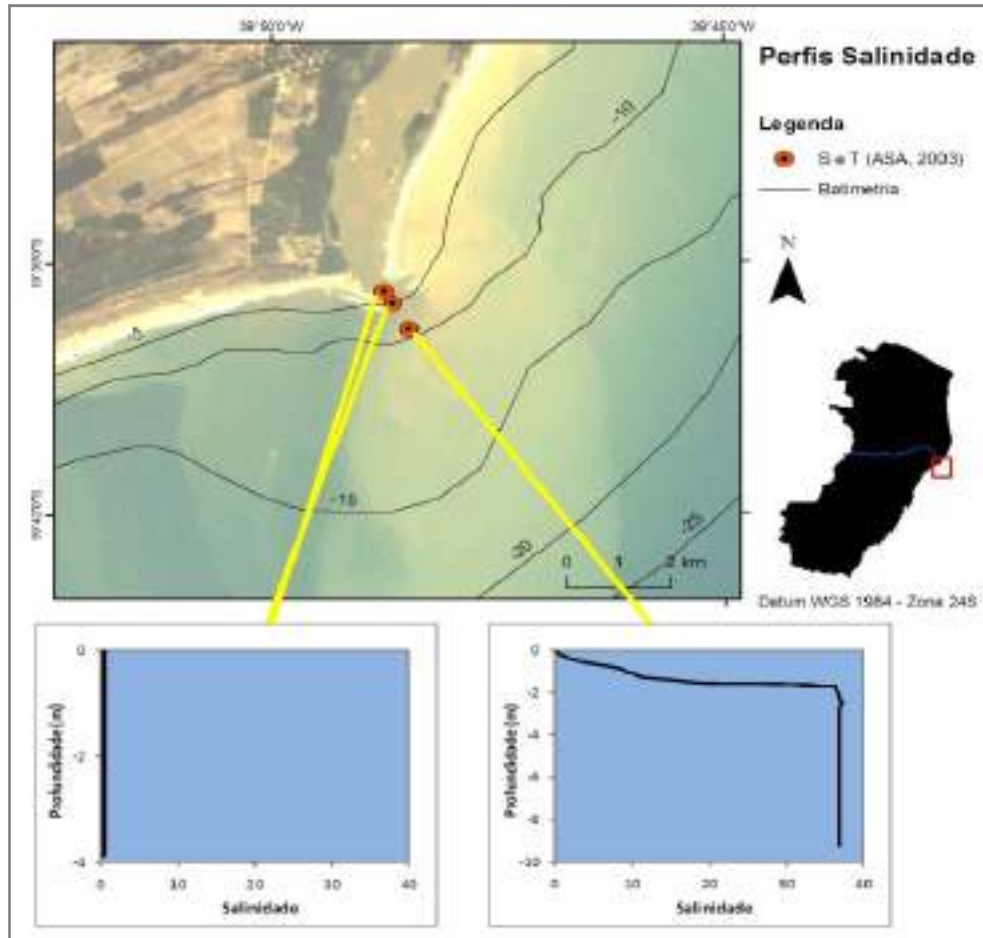


Figura 17: Perfis de salinidade realizados em estação oceanográfica defronte à foz do rio Doce em profundidade aproximada de 10 metros, utilizando um STD Sersordata SD-200. Fonte: ASA (2003).

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi constituído em três etapas principais: (a) desenvolvimento de uma base de dados da área de estudo (seleção e pré-processamento de imagens de satélite, dados de vazão, vento, e dados complementares obtidos em estudos pontuais); (b) processamento de imagens de satélite para delimitação das plumas e (c) correlação dos dados: as imagens de satélite e os resultados obtidos no processamento das mesmas (áreas e padrões de distribuição superficial das plumas) serão correlacionados com os dados de vazão e vento - visando inferir a influência dessas forçantes na variabilidade espaço-temporal da pluma.

4.1 BASE DE DADOS

A base de dados foi desenvolvida com o objetivo de correlacionar os padrões de plumas obtidos a partir das imagens de satélite com dados adquiridos em campo. Cabe aqui ressaltar que o presente estudo apenas utilizou dados de campo adquiridos por outras fontes, como será apresentado abaixo.

4.1.1 Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens das seguintes plataformas de aquisição de dados remotos: sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente e a Câmara Imageadora de alta resolução (CCD) a bordo do satélite CBERS 2 e CBERS 2B (China-Brazil Earth Resources Satellite). Esses satélites foram escolhidos devido ao acesso gratuito às imagens através da Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (<http://www.dgi.inpe.br>), além de possuírem uma resolução espacial adequada ao objetivo do estudo. A Tabela 4 apresenta as órbitas/pontos das imagens utilizadas.

Tabela 4: Órbitas/pontos das imagens Landsat e CBERS utilizadas no estudo.

Satélite	Órbita	Ponto
Landsat 5 e 7	215	74
CBERS 2 e 2B	148	122

A série de satélites Landsat apresentou a vantagem de possuir um acervo com inúmeras imagens disponíveis, e a série de satélites CBERS apresentou um acervo com imagens mais recentes, e com resolução espacial um pouco superior a da série Landsat. Entretanto, a resolução temporal de ambos os satélites é bem limitada, sendo que a série Landsat apresenta resolução um pouco superior: 16 dias contra 26 dias da série CBERS (Tabela 5).

Após o processo de download as imagens foram avaliadas quanto à cobertura de nuvens na região da foz do rio Doce e adjacências e as que apresentaram muitas nuvens foram eliminadas.

Tabela 5: Características dos sensores e bandas utilizadas. (Divisão de Geração e Processamento de Imagens – INPE - www.dgi.inpe.br)

Série	Satélite	Período de operação	Sensor	Número de bandas	Banda / faixa espectral / classificação no E.E.	Resolução espacial	Resolução temporal	Horário de imageamento na área de estudo (UTC)	Nível de quantização do sinal
LANDSAT	5	1984 - atual	TM	7	1 - 450 - 520 nm / azul	30 m	16 dias	Entre 12:10 e 12:35 hs	2 ⁸ = 256 níveis de brilho por banda
					2 - 520 - 600 nm / verde				
					3 - 630 - 690 nm / vermelho				
					4 - 760 - 900 nm / infravermelho próximo				
	7	1999 - 2003	ETM	8					
CBERS	2	2003 – 2006	CCD	5	1 – 450 - 520 nm / azul	20 m	26 dias	Entre 11:50 e 13:00 hs	2 ⁸ = 256 níveis de brilho por banda
					2 – 520 - 590 nm / verde				
					3 - 630 - 690 nm / vermelho				
					4 - 770 - 890 nm / infravermelho próximo				

4.1.1.1 Pré-processamento

A fim de facilitar e possibilitar os procedimentos analíticos com as imagens, as seguintes operações foram realizadas (os procedimentos nessa etapa foram iguais para as imagens Landsat e CBERS):

- Georeferenciamento das bandas 1, 2, 3 e 4 utilizando-se o software ArcGIS 9.2 ESRI e o sistema de coordenadas UTM *datum* geográfico WGS 1984;
- Recorte das imagens para a região de interesse (foz do rio Doce e ambiente marinho adjacente), eliminando também da imagem possíveis nuvens e sombras de nuvens que estivessem presentes;
- Máscara da parte terrestre das imagens utilizando-se como base a banda 4 de ambos satélites. Tal banda foi utilizada devido ao fato de que os corpos d'água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos d' água (EASTMAN, 2006; JENSEN, 2009).
- Exclusão a partir de recorte das áreas cobertas com nuvens e sombras associadas.

Dessa forma as bandas 1, 2 e 3 ficaram apenas com os pixels que representam o ambiente aquático.

4.1.2 Dados de Vazão

A fonte dos dados de vazão foi a estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) - código 56994500, localizada em Colatina (ES). Optou-se por não utilizar os dados da estação de Linhares já que a série histórica para correlação com as imagens de satélite disponíveis era muito restrita, além do fato de que a contribuição hídrica de outros afluentes entre Colatina e a foz ser pouco significativa

em termos de vazão, conforme foi constatado após análises nos dois conjuntos de dados. A Figura 19 apresenta a localização e a Tabela 6 apresenta as características da estação fluviométrica de Colatina.

Tabela 6: Características da estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES

Localização	-19°31'51"S, -40°37'23"O
Área de drenagem	75.800 km ²
Altitude	62 m
Distância para estação fluviométrica de Linhares	65 km
Distância da foz	110 km
Períodos com dados Completos	1939 a 1977; 1983 a 1988 e 1990 a 2009 (65 anos)
Frequência dos dados	Diária
Método de obtenção das vazões	Curva de descarga

4.1.3 Vento

Os dados de vento foram obtidos de estação meteorológica localizada no Porto de Barra do Riacho, litoral de Aracruz, distante cerca de 32 km da foz do rio Doce (Figura). A Figura apresenta a localização e a Tabela 7 apresenta informações sobre a estação meteorológica. Foram adquiridos dados a partir do ano de 2004.

Tabela 7: Características da estação meteorológica localizada no Porto de Barra do Riacho

Localização	19°50' S, 40°03' W
Responsável	Portocel
Altitude	10 m
Períodos dos dados	2004 - atual
Tipos de dados	Velocidade (m/s) e direção (graus)
Frequência dos dados	½ hora

4.1.4 Dados complementares

4.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento

Para comprovar se a maré e o vento possuem significativa influência sobre o padrão de circulação costeira na região da foz do rio Doce, assim como inferir a influência relativa de cada forçante, estes foram correlacionados com dados de corrente.

As medições de ventos e correntes ocorreram simultaneamente por período de um mês entre os meses de outubro e novembro de 2002 e foram realizadas por ASA (2003). As informações de vento foram adquiridas por estação meteorológica Campbell com sensor de vento RM Young modelo 03001-U, localizada, nas coordenadas 19°39,10'S e 39° 50,9'W. O anemômetro ficou instalado a uma altura de 16,5m do nível do mar. Os dados de corrente foram obtidos por correntógrafo acústico Falmouth 2-D, fundeado a 2 metros sob a superfície nas coordenadas 19° 41,7'S e 39° 49,8'W.

4.1.4.1.1 Maré

Foi realizada uma filtragem com filtro “passa banda” nos dados de corrente a fim de se obter do efeito da forçante maré sobre a intensidade das correntes. Os parâmetros de entrada do filtro foram baseados nos períodos das duas principais constantes harmônicas da maré na região: 12 horas, 25 minutos e 12 segundos para a M_2 e 12 horas para a S_2 . Após a filtragem, subtraiu-se dos dados originais os dados resultantes da filtragem. Com isso, retirou-se o efeito causado pelas duas principais componentes da maré nos dados de corrente. Esses dados e os dados originais de correntes foram plotados visando inferir se os padrões de intensidade de corrente são muito influenciados pela maré. Calculou-se também a velocidade média para a série de dados de correntes medidas e para a série de dados obtidos com a filtragem (velocidades ocasionadas pela forçante maré), visando inferir a contribuição da maré na velocidade das correntes medidas.

4.1.4.1.2 Vento

Os dados de vento foram rotacionados para um eixo com inclinação da linha de costa ao sul da desembocadura (60° a partir do norte), a fim verificar principalmente o efeito do vento nas correntes paralelas à costa. A partir de correlação cruzada entre as componentes U e V foi possível inferir o *lag* existente entre o vento e seu efeito nas correntes costeiras (caso haja correlação). A Figura 18 apresenta a localização dos pontos de medição de todos os parâmetros supracitados nesta seção.



Figura 18: Localização dos pontos de medição de vazão (ANA), vento (Portocel) e dados complementares extraídos de ASA (2003)

4.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

A classificação das imagens foi realizada a fim de se delimitar apenas a água do núcleo da pluma. Todo o processo de classificação supervisionada foi realizado no software ENVI 4.5 ITT Visual Information Solutions. Utilizou-se o método de máxima semelhança para todas as imagens selecionadas. A classificação supervisionada requer que as classes de saída desejadas sejam “treinadas” utilizando-se porções representativas da imagem para compilação das propriedades estatísticas espectrais de cada classe (Thomas & Weatherbee, 2006). No classificador de máxima semelhança a distribuição dos valores de reflectância em uma área de treinamento é descrita por uma função de densidade de probabilidade. O classificador avalia a probabilidade de um determinado *pixel* pertencer a uma categoria e o classifica na categoria com a maior probabilidade de associação (EASTMAN, 2006).

Após a análise visual de diversas imagens em várias estações do ano, optou-se por dividir a água do ambiente marinho em apenas duas classes, águas do núcleo da pluma e outras águas, utilizando metodologia adaptada de Thomas & Weatherbee (2006) e Lihan *et al.*, (2008).

Os polígonos de treinamento para as quatro classes foram traçados manualmente em cada imagem a partir de composição das bandas 3(R), 2(G), 1(B), conforme critérios apresentados na Tabela 8 e exemplificado na Figura 19. Essa combinação de bandas foi escolhida porque apresenta um bom contraste visual, formando uma composição em “cor natural”. Para traçar os polígonos considerou-se que grupos de pixels na região da foz do rio Doce que apresentam número digital maior que outros grupos de pixels, conseqüentemente apresentam maior concentração de sedimentos em suspensão na água. JENSEN (2009) cita que a partir de uma imagem obtida em frequências espectrais específicas, é possível observar considerável contraste entre águas com e sem sedimentos em suspensão, devido a maior reflexão das águas com sedimento em suspensão, o que resulta em pixels com maior número digital nessas águas em comparação com as águas sem sedimento em suspensão. Assim,

considerou-se os sedimentos em suspensão na água como demarcadores da pluma do rio Doce.

Tabela 8: Critérios utilizados para definição das regiões de treinamento

Classe óptica de água	Critérios de treinamento	Nº da classe
Núcleo da pluma	Águas com alto retorno do sinal do satélite (alto nível digital de pixel) imediatamente antes e após a desembocadura do rio Doce	1
Outras águas	Todas as outras águas adjacentes ou não ao núcleo da pluma. Essas águas apresentam retorno de sinal do satélite (nível digital de pixel) consideravelmente inferior ao do núcleo da pluma.	2

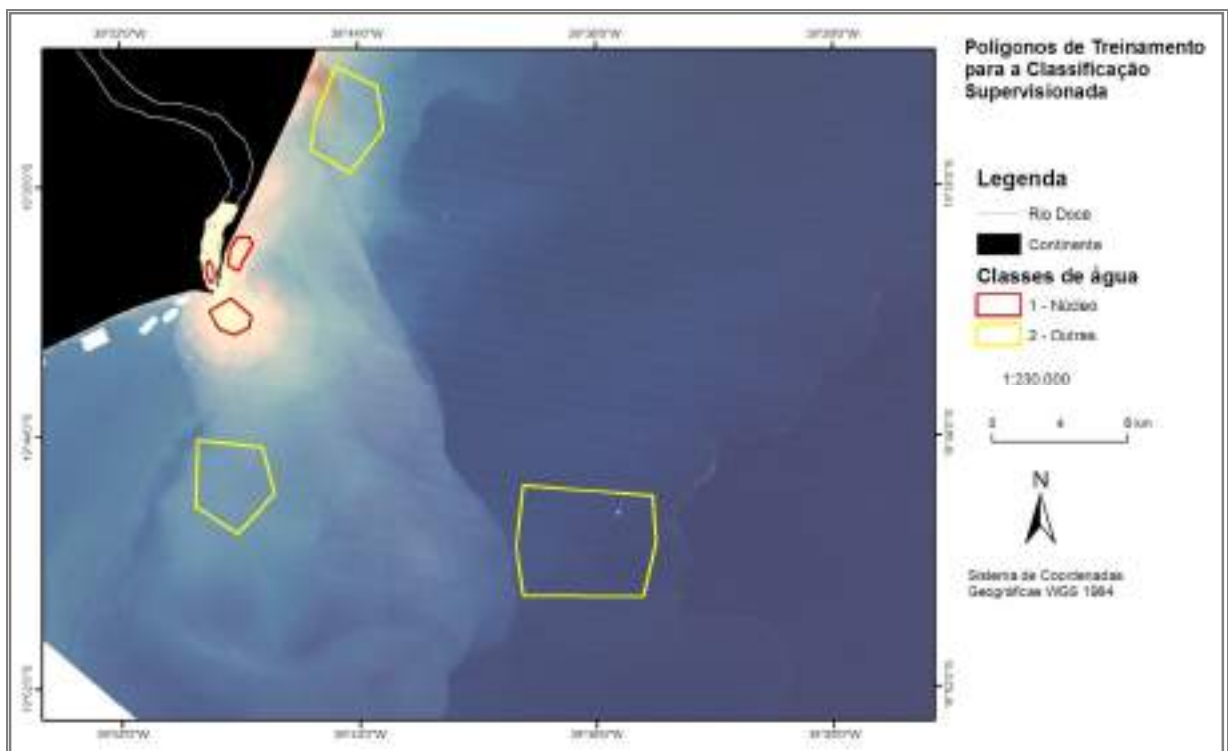


Figura 19: Exemplo de polígonos de treinamento traçados para as classes de água. Composição das bandas RGB 3, 2, 1 Landsat TM.

O sucesso de uma classificação supervisionada de imagem depende da separabilidade das assinaturas espectrais das águas superficiais, sendo uma

medida estatística da distância entre as classes traçadas nos polígonos de treinamento (LIHAN *et al.*, 2008). A medida de separabilidade de Jeffries-Matusita (RICHARDS, 1999) foi aplicada para as classes de polígonos de treinamento traçados em cada imagem, de modo que a classificação supervisionada só foi realizada quando essa medida atingisse o mínimo que indicasse um bom grau de separabilidade entre as classes.

A classificação supervisionada foi realizada utilizando-se as bandas 1, 2 e 3 para o Landsat e CBERS, visto que as mesmas são sensíveis à concentração de sedimentos em suspensão na água (CABRAL *et al.*, 1990). A banda 4 não foi utilizada na classificação pois a mesma apresentou baixo contraste na maioria das imagens adquiridas, o que proporcionaria pouca contribuição para a classificação da imagem.

A classificação gerou uma nova imagem contendo apenas 2 níveis de intensidade de pixel, correspondente ao núcleo da pluma e outras águas. Posteriormente as imagens foram convertidas para formato vetorial (polígonos). Os polígonos das plumas (classe 1) foram editados no software ArcGis 9.3, eliminando alguns possíveis polígonos sobrepostos e pequenos ruídos gerados nas classificações. Os polígonos gerados para classe 2 foram excluídos. A área da classe do núcleo foi calculada em cada imagem classificada. O cálculo foi feito a partir da delimitação do polígono em uma linha reta na foz do rio Doce, excluindo também partes do polígono que claramente não representavam a água do núcleo.

4.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas

A partir de interpretação visual dos polígonos, as plumas foram classificadas em categorias relacionando os principais padrões de distribuição superficial e forma observados a fim de facilitar a correlação com as forçantes vazão e vento.

4.3 CORRELAÇÃO DOS DADOS

4.3.1 Pluma x Vazão fluvial

Para correlacionar as imagens classificadas com a vazão, foi obtido um valor correspondente de vazão para cada imagem. Esse valor foi obtido a partir da média dos valores de vazão do dia anterior e no dia de obtenção da imagem, visto que análises de correlação entre dados de vazão da estação fluviométrica de Colatina e Linhares (65 km à jusante) obtidos no mesmo período mostraram um lapso de um dia entre os dados das duas estações. A partir desse dado e de cálculos simples entre tempo e distância, estimou-se que uma dada vazão que passa em Colatina pode levar até dois dias para chegar ao ambiente marinho.

A fim de determinar um limite para vazões baixas e altas, os valores de vazão foram divididos em três grupos: (a) vazões baixas, (b) vazões médias e (c) vazões altas. Os valores limites para esses grupos foram determinados a partir de curva de permanência de vazões da estação fluviométrica de Colatina obtida a partir do software Hidro 1.0.8 ANA (Figura 20), utilizando dados de vazão do período entre 1939 e 2009. Utilizou-se a vazão de 75% (Q_{75}) de permanência como referência para as vazões baixas e a vazão de 25% (Q_{25}) como referência para as vazões altas (Tabela 9).

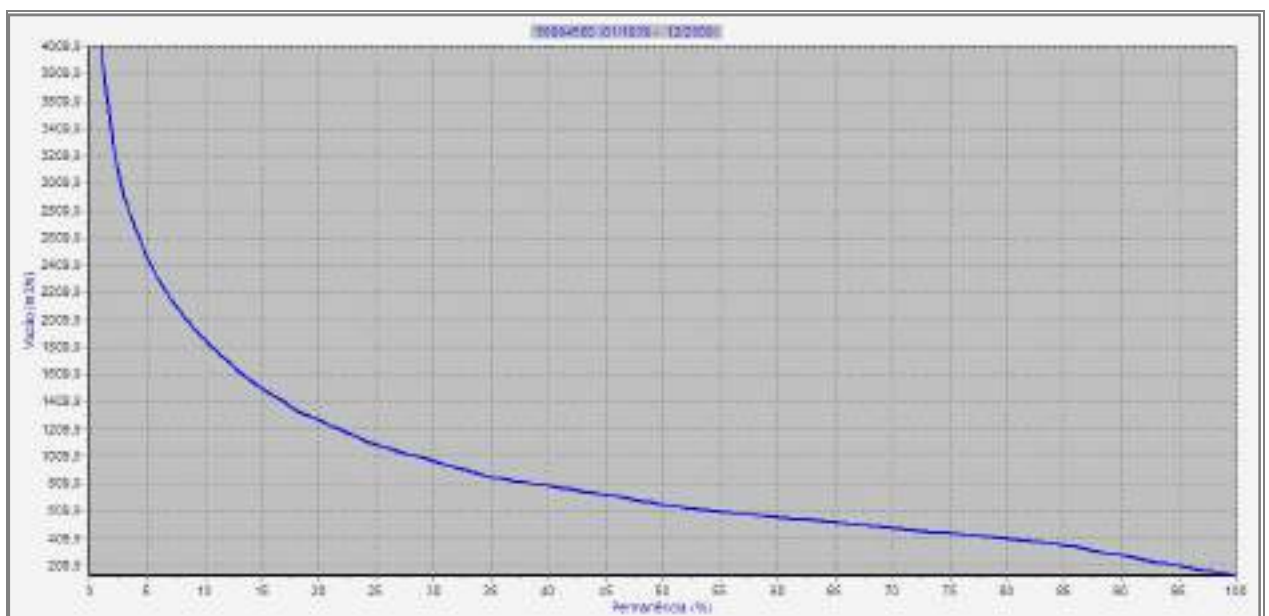


Figura 20: Curva de permanência para a estação fluviométrica de Colatina no período entre 1939 e 2009.

Tabela 9: Limites considerados entre vazões baixas, médias e altas

Referência	Valores	Classificação
Q ₇₅	Abaixo de 445 m ³ /s	Vazões baixas
↓	Entre 445 e 1092 m ³ /s	Vazões médias
Q ₂₅	Acima de 1092 m ³ /s	Vazões altas

- A área do núcleo da pluma (classe 1) de cada imagem foi correlacionada com sua respectiva vazão, e obteve-se um coeficiente de correlação linear com a análise de todas as imagens. Para facilitar os cálculos todos os dados foram transformados para logaritmo natural. A partir do coeficiente de correlação obtido foi possível inferir a possível influência que a vazão possui sobre a área da pluma;
- A fim de correlacionar os padrões de distribuição superficial das plumas com a vazão, foram computadas as vazões médias e áreas médias das plumas para cada um dos padrões identificados.

4.3.2 Padrões de distribuição superficial das plumas x vento

Após a comprovação de correspondência entre os dados de vento e correntes obtidos por ASA (2003), as principais características observadas nos polígonos das plumas e nas imagens de satélite foram comparadas com os dados de vento disponíveis (apenas para as imagens a partir de 2004, ano em que a estação meteorológica de Portocel iniciou operação). Para tal, utilizou-se dados de vento medidos até 72 horas antes do horário em que a imagem foi obtida. Esses dados foram plotados em um diagrama *stick plot* e nas análises buscou-se primeiramente correlacionar o vento predominante nas últimas 24 horas antes da obtenção da imagem. Os principais padrões de ventos identificados foram separados em categorias e seus efeitos sobre a pluma do rio Doce foram descritos. Por fim esses padrões de vento foram correlacionados com os padrões de dispersão superficial das plumas.

5. RESULTADOS

5.1 BASE DE DADOS

Nesta seção será apresentada uma síntese dos dados obtidos e padrões de variabilidade observados.

5.1.1 Imagens de satélite

No total foram selecionadas 33 imagens de satélite, sendo 26 imagens dos satélites Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM+ e 7 dos CBERS, conforme apresentado na Tabela 10. Metade das imagens é representativa de período de vazão média (entre 445 e 1092 m³/s - 16 imagens. Doze imagens são representativas de vazão baixa (até 445 m³/s) e apenas 5 são do período de vazão alta (> 1092 m³/s). Foram obtidas poucas imagens em período de vazão alta devido à alta cobertura de nuvens na região entre dezembro e março (verão), o que inviabilizou a utilização de diversas imagens. A Figura 10 relaciona à data de obtenção das imagens com sua respectiva vazão.

Tabela 10: Imagens selecionadas, assim como respectiva vazão e sua classificação. As duas últimas colunas se referem às correlações realizadas na seção 5.3. X: correlação realizada; - correlação não realizada pela falta de dados. L5: Landsat 5 TM; L7: Landsat 7 ETM+; C 2: CBERS 2; C 2B: CBERS 2B.

Data	Satélite	Vazão (m³/s)	Classif. da vazão	Correl. Vazão	Correl. Vento
28/07/87	L 5	289	Baixa	X	-
30/09/87	L 5	435	Baixa	X	-
08/08/91	L 5	400	Baixa	X	-
07/04/93	L 5	852	Média	X	-
12/05/94	L 5	708	Média	X	-
16/08/94	L 5	425	Baixa	X	-
30/03/96	L 5	764	Média	X	-
21/06/97	L 5	634	Média	X	-
07/07/97	L 5	543	Média	X	-
08/04/99	L 5	554	Média	X	-
26/05/99	L 5	347	Baixa	X	-
14/08/99	L 5	251	Baixa	X	-
29/06/00	L 5	356	Baixa	X	-
16/08/00	L 5	311	Baixa	X	-
29/04/01	L 5	287	Baixa	X	-
07/05/01	L 7	235	Baixa	X	-
23/05/01	L 7	316	Baixa	X	-
19/01/04	C 2	3670	Alta	X	X
11/03/04	C 2	1725	Alta	X	X
23/06/04	C 2	658	Média	X	X
05/04/05	C2	1440	Alta	X	X
18/07/05	C 2	601	Média	X	X
01/10/05	L 5	1009	Média	X	X
16/01/06	C 2	877	Média	X	X
11/04/06	L 5	864	Média	X	X
29/03/07	L 5	795	Média	X	-
30/04/07	L 5	702	Média	X	-
22/08/08	L 5	179	Baixa	X	X
12/12/08	L 5	521	Média	X	X
14/04/09	C 2B	1436	Alta	X	X
19/04/09	L 5	1302	Alta	X	X
22/06/09	L 5	463	Média	X	X
08/07/09	L 5	452	Média	X	X

5.1.2 Vazão

A Figura 21 apresenta a vazão do rio Doce durante o período estudado (1987 a 2009). Na Tabela 10 são apresentadas as vazões para as imagens de satélite selecionadas, e respectiva classificação em vazão baixa, média ou alta. Constata-se que de maneira geral, o rio apresentou vazões mais elevadas durante os meses de outubro/novembro a março/abril e menores vazões durante os meses de maio a setembro. A vazão média para esse período foi de 822 m³/s.

Vazões altas: Na maior parte dos anos as vazões altas atingiram valores médios entre 1500 e 3000 m³/s. Em alguns anos as vazões foram superiores a essa faixa, como nos verões de 1996-1997 e 2002-2003, atingindo um valor médio máximo de 3538 m³/s em jan/1997. Nos verões de 1989 e 1990 as vazões apresentaram valores mais baixos, atingindo média de apenas 748 m³/s em jan/1990, sendo os dois únicos anos em que as vazões médias não ultrapassaram o limite estabelecido para vazões altas nesse estudo (Q_{25} : 1092 m³/s).

Vazões baixas: Para a maioria dos anos os períodos entre maio a setembro apresentaram vazões com valores médios entre 300 e 500 m³/s. Entretanto em alguns anos os valores médios registrados foram muito baixos: set/1995 (208 m³/s), ago/2001 (201 m³/s) e ago/2008 (182 m³/s), bem abaixo do limite que foi proposto para vazões baixas (Q_{75} - 445m³/s), e em ordem de grandeza mais de dez vezes inferior às maiores vazões observadas. Entretanto, em outros anos as vazões médias não chegaram a atingir o valor de Q_{75} (1992, 1993 e 2005).

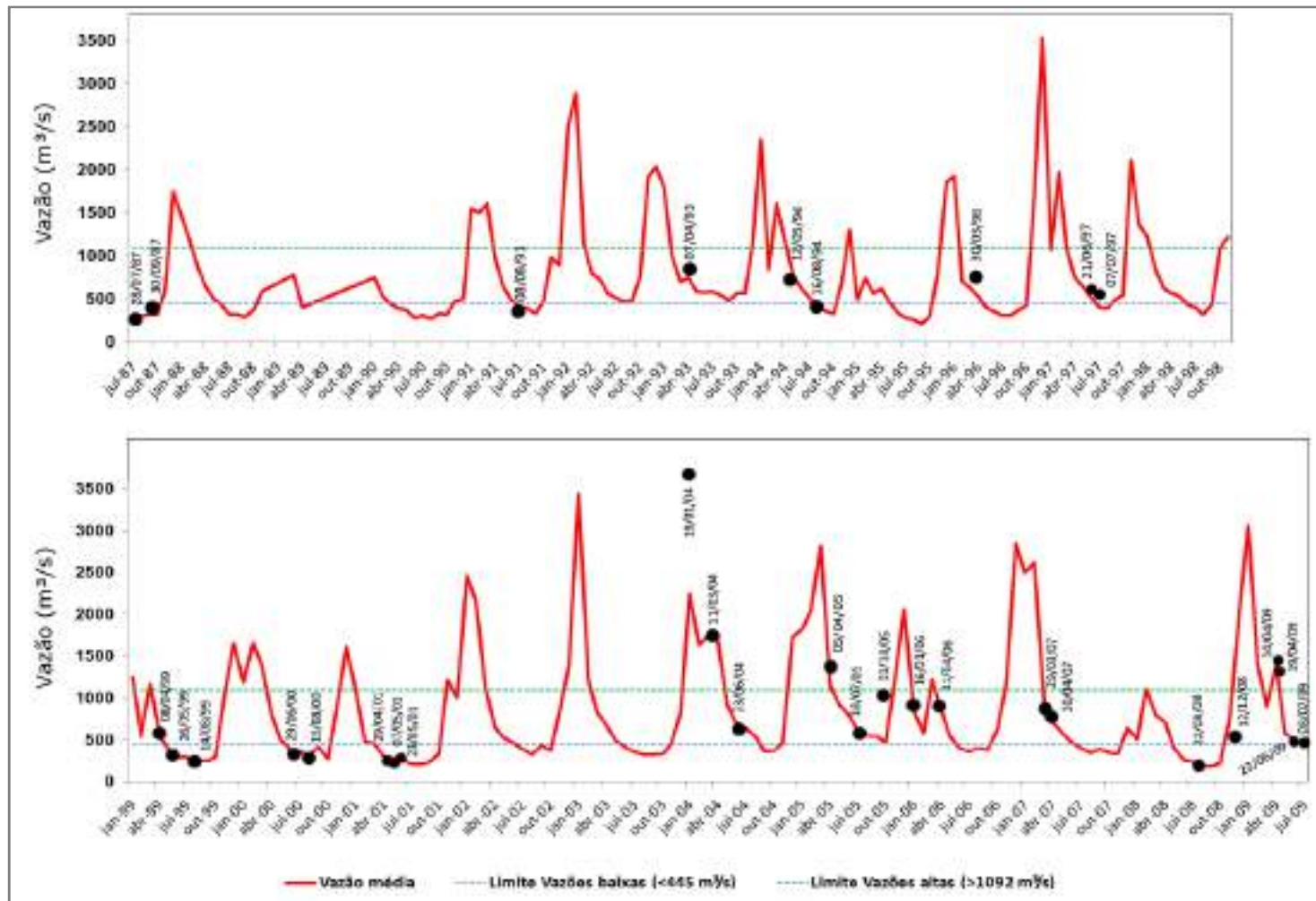


Figura 21: Vazões médias mensais na estação fluviométrica da ANA 56994500 localizada em Colatina-ES para o período entre julho de 1987 e dezembro de 2009. Os pontos com datas indicam as imagens de satélite obtidas e suas respectivas vazões

5.1.3 Vento

A Figura 22 (a) e (b) e Figura 23 apresentam histogramas dos dados de vento da estação meteorológica de Portocel para os meses representativos dos meses de verão (dezembro-março) e inverno (maio-agosto) entre os anos de 2004 e 2006. Pode-se observar que nos meses de verão os ventos mais freqüentes são provenientes de NO a NE e as velocidades médias se situam em cerca de 5 m/s, raramente ultrapassando 8 m/s. Nos meses de inverno os ventos mais freqüentes são provenientes de SO e S, e possuem intensidade mais elevada, chegando a atingir 10 m/s com médias superiores a 5 m/s.

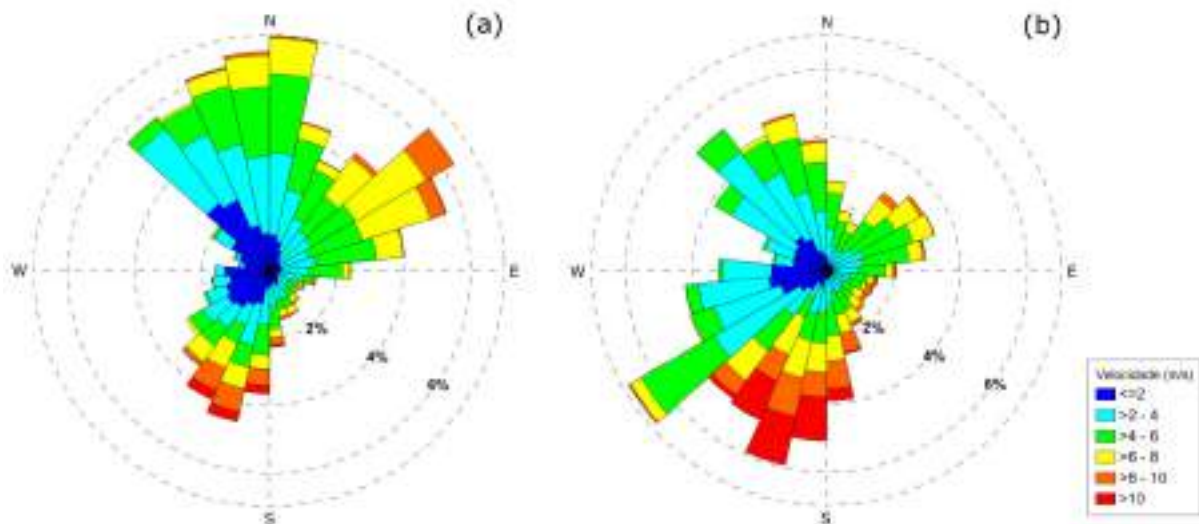


Figura 22: Histograma direcional dos vetores de vento para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) entre os anos de 2004 e 2006. (a) dezembro-março; (b) maio-agosto. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica.

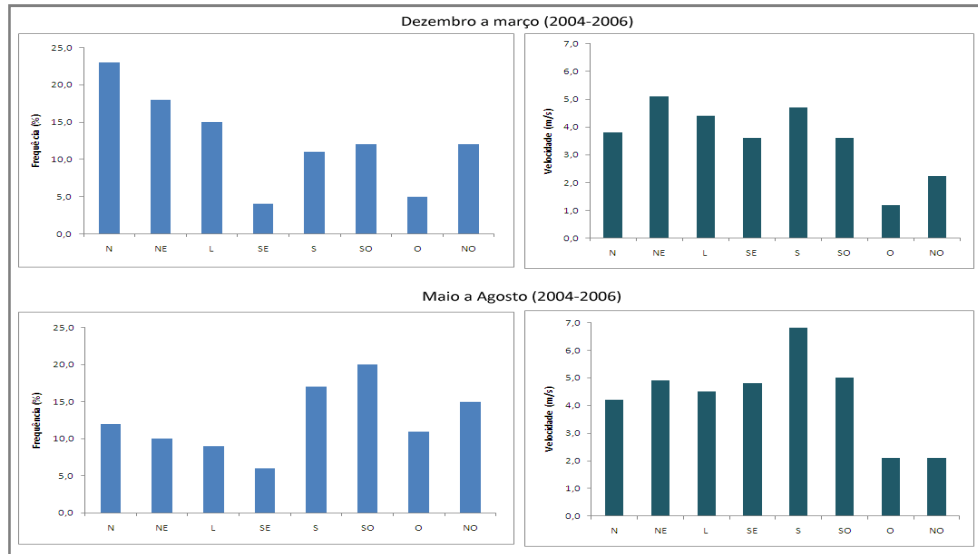


Figura 23: Histograma da direção do vento (esquerda) e velocidade média por direção do vento (direita) para a estação meteorológica de Portocel – Aracruz (ES) nos meses entre dezembro a março (em cima) e maio a agosto (embaixo) dos anos de 2004 a 2006. A direção apresentada segue a convenção meteorológica.

5.1.4 Dados complementares

5.1.4.1 Correlação da corrente costeira com maré e vento

5.1.4.1.1 Maré

Os resultados obtidos mostraram que as duas componentes de maré predominantes na região (M_2 e S_2) possuem influência de baixa magnitude sobre as correntes costeiras na região de estudo. A Figura 24 apresenta uma plotagem das componentes u (E-W) e v (N-S) da corrente medida por ASA (2003) e das componentes u (E-W) e v (N-S) da corrente com a subtração da força maré. Pode-se observar que o padrão exibido pelos dois conjuntos de dados é praticamente idêntico com algumas pequenas variações. A velocidade média obtida para a série de dados das correntes medidas por ASA (2003) foi de 24,01 cm/s, enquanto as velocidades de corrente ocasionadas pela força maré (M_2 e S_2) apresentaram média de 4,66 cm/s para toda a série de dados, e valores máximos que atingiram 12 cm/s nas marés de sizígia (Figura 25). Assim, pode-se afirmar que a força maré (componentes M_2 e S_2) respondeu, em média, por cerca de 20% da

magnitude das velocidades observadas nas correntes medidas em campo no referido período analisado.

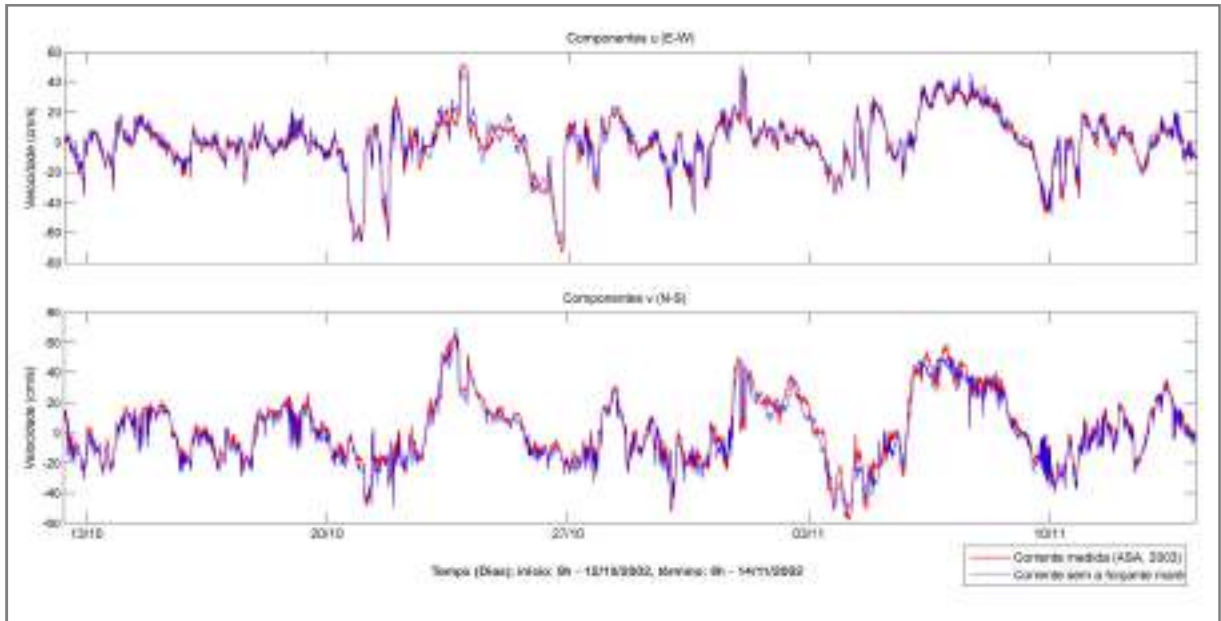


Figura 24: *Plot* vermelho: série temporal das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de correntes medidas por ASA (2003) a 2m de profundidade nas coordenadas 19° 41,7'S e 39° 49,8'W. *Plot* azul: mesma série temporal subtraída da forçante maré (componentes M_2 e S_2). Período dos dados: 12/10 a 14/11/2002, dt= 20 min.

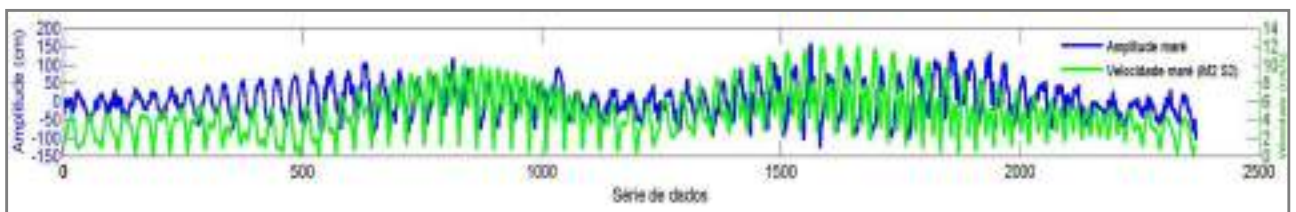


Figura 25: Plotagem da amplitude de maré (azul) e velocidade ocasionada pela maré (verde) obtida a partir de filtragem das componentes M_2 e S_2 . Pode-se observar que as maiores velocidades de corrente ocasionada pela maré ocorrem em maré de sizígia.

5.1.4.1.2 Vento

Na análise de correlação cruzada a maior correlação obtida entre os ventos e correntes paralelos à linha de costa ocorreu para os dados de corrente defasados em duas horas com relação ao vento. De maneira geral, observa-se uma boa

correspondência das correntes superficiais em relação ao vento, conforme apresentado no diagrama *stick plot* da Figura 26. Nele se observa que em todas as situações de inversão dos ventos provenientes do quadrante N para o quadrante sul há correspondência na orientação das correntes, que também invertem de sentido. Na maioria das situações de vento do quadrante norte também há correspondência, entretanto observa-se algumas situações em que as correntes não acompanham a direção do vento, o que pode ser constatado na Figura 27, onde se verifica que os dados de ventos e correntes provenientes de sul apresentam menor dispersão com relação àqueles provenientes de norte.

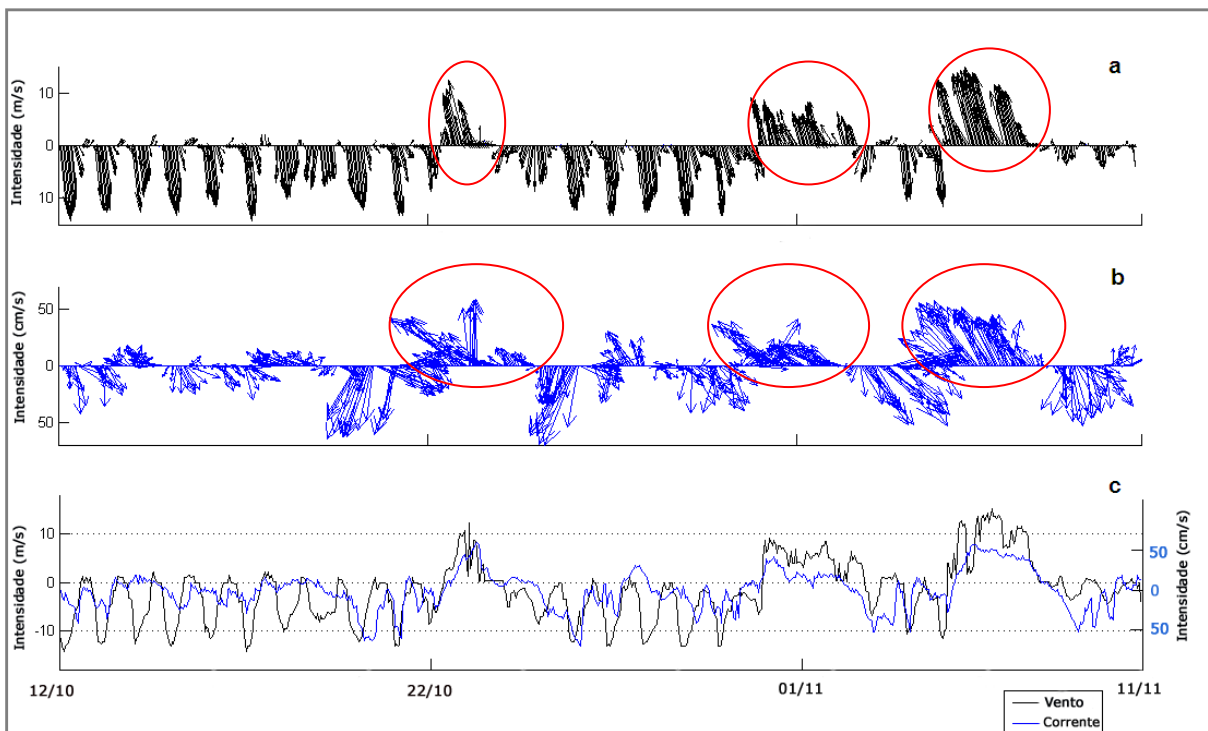


Figura 26: Diagramas *stick plot* para ventos (a) e correntes (b) medidos em Regência entre os dias 12 de outubro e 11 de novembro de 2002 - rotacionados para a inclinação da linha de costa ao sul da desembocadura do rio Doce (60° a partir do norte) - e (c) componentes paralelas à costa do vento e corrente. Em destaque estão os períodos de inversão do vento – pode-se notar que as correntes sempre correspondem nesses períodos. Os dados plotados seguem a convenção oceanográfica.

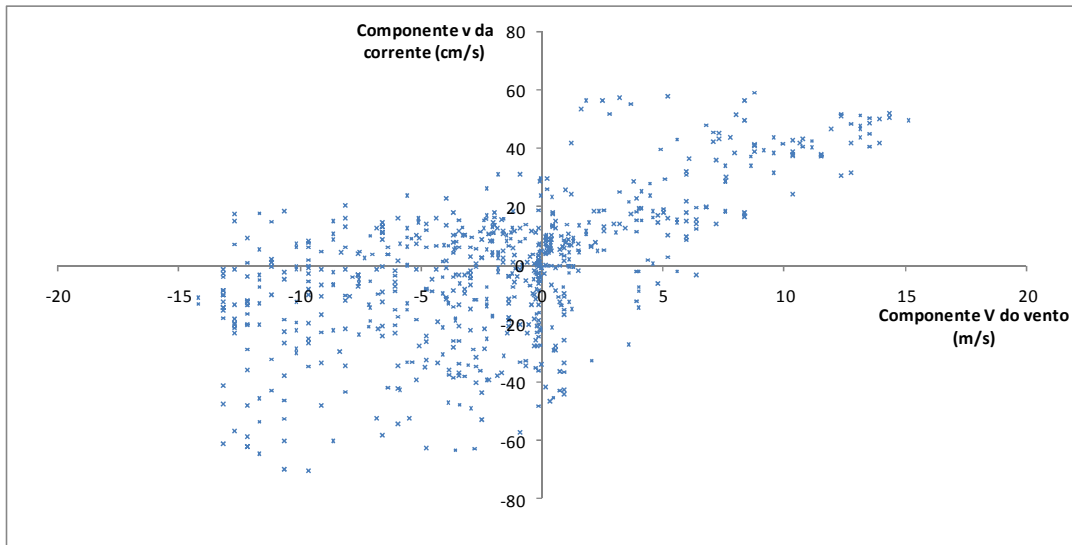


Figura 27: Plotagem conjunta das componentes (v) do vento e (v) da corrente obtidos por ASA (2003) paralelos à linha de costa (60° a partir do norte). Valores positivos indicam ventos e correntes provenientes de sul. Os dados de corrente foram defasados em 2 horas em relação aos dados de vento.

Um aspecto relevante é o local em que as correntes foram medidas: próximo à desembocadura do rio Doce. Dessa forma, não se pode excluir a possibilidade do deságüe do rio influenciar nas correntes superficiais dessa região. A forçante maré, debatida na última seção, também pode ter ocasionado essa variabilidade não explicada pelo vento, assim como ondas e forçantes de meso-escala não abordadas nesse trabalho.

De modo geral, pode-se concluir que existe uma boa correspondência entre vento e corrente costeira na região, sendo que os dados apontam tendência das correntes nas regiões mais rasas se orientarem na direção aproximada do vento, principalmente dos provenientes do quadrante sul.

5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Em geral a pluma do rio Doce foi detectada satisfatoriamente nas classificações supervisionadas realizadas e apresentou posição geográfica e forma bastante variáveis nas imagens processadas. O método utilizado detectou principalmente o “núcleo” das plumas, ou seja, a parte do ambiente marinho significativamente

influenciada pelo deságüe do rio. Partes periféricas da pluma não foram classificadas como “núcleo”, conforme pode ser observado nas Figuras 31, 38 e 39.

As imagens com vazão alta foram as que melhor responderam ao método, enquanto na maioria das imagens de vazão baixa a detecção da pluma foi prejudicada pela presença de água com alta turbidez ao norte da desembocadura, exemplificado na imagem obtida em 28/07/87, apresentada na Figura 28. Essas águas possuíam número digital médio de pixel muito semelhante ou até mesmo superior às águas na desembocadura do rio Doce, o que prejudicou a detecção do real tamanho da pluma. Dessa forma, a maioria dos polígonos gerados para as plumas em imagens de vazão baixa apresentaram tamanho muito reduzido e menor variabilidade de posição geográfica, conforme será apresentado adiante. A menor área de pluma obtida foi de 0,23 km² e a maior foi de 29,1 km². O ANEXO I apresenta todas as 33 imagens classificadas e a Figura 33 apresenta as áreas de pluma obtidas em cada imagem.

5.2.1 Padrões de distribuição superficial das plumas

As plumas foram divididas em cinco categorias de acordo com os principais padrões de distribuição geográfica e formas observadas, apresentadas na Tabela 11 e ANEXO I.

Tabela 11: Padrões de pluma observados e imagens representativas

(1) Sem padrão de dispersão comum	(2) Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura	(3) Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura	(4) Dispersão radial a partir da desembocadura	(5) Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura
28/07/87	14/08/99	07/04/93	19/01/04	30/03/96
30/09/87	16/08/00	08/04/99	11/03/04	29/06/00
08/08/91	23/05/01	23/06/04	05/04/05	01/10/05
12/05/94	18/07/05	16/01/06	12/12/08	30/04/07
16/08/94	-	11/04/06		-
21/06/97	-	29/03/07	-	-
07/07/97	-	14/04/09	-	-
26/05/99	-	19/04/09	-	-
29/04/01	-	-	-	-
07/05/01	-	-	-	-
22/08/08	-	-	-	-
22/06/09	-	-	-	-
08/07/09	-	-	-	-

5.2.1.1 Sem padrão de dispersão comum

No geral essas plumas apresentaram tamanho muito pequeno (área máxima: 4,1 km²), e conseqüentemente não apresentaram grande variabilidade de posição geográfica, e não adentraram muito no ambiente marinho (Figura 29). Treze das trinta e três imagens se enquadraram nesta categoria, apresentadas nas Figuras 39 a 51 do ANEXO I.

Na maioria dessas imagens observou-se que as águas mais rasas (profundidade < 5 metros) ao norte da desembocadura apresentaram considerável turbidez, o que dificultou a compreensão do fenômeno causador da mesma: o deságüe do rio ou ressuspensão de sedimentos causada por ondas e correntes. Entretanto, em boa parte das imagens essa faixa de turbidez se estende por toda a costa do município

de Linhares. Dessa forma, pode-se inferir que o deságüe do rio tenha pouca influência sobre essa faixa de turbidez ao norte da desembocadura devido a pequena magnitude relativa da descarga fluvial, mas não se pode descartar essa possibilidade já que não foram realizadas medições de salinidade *in situ*, que comprovariam se a pluma se estende para o norte nessas situações. Já na imagem de 30/09/87, pode-se inferir que o deságüe do rio tenha sido o causador da turbidez que pode ser vista ao norte da desembocadura, pois essas águas não se estendem por grandes distâncias e possuem número digital de pixel semelhante às águas da pluma. Devido à baixa vazão, na maioria das imagens a região fluvial à montante da desembocadura apresentava presença de bancos arenosos em grande quantidade.

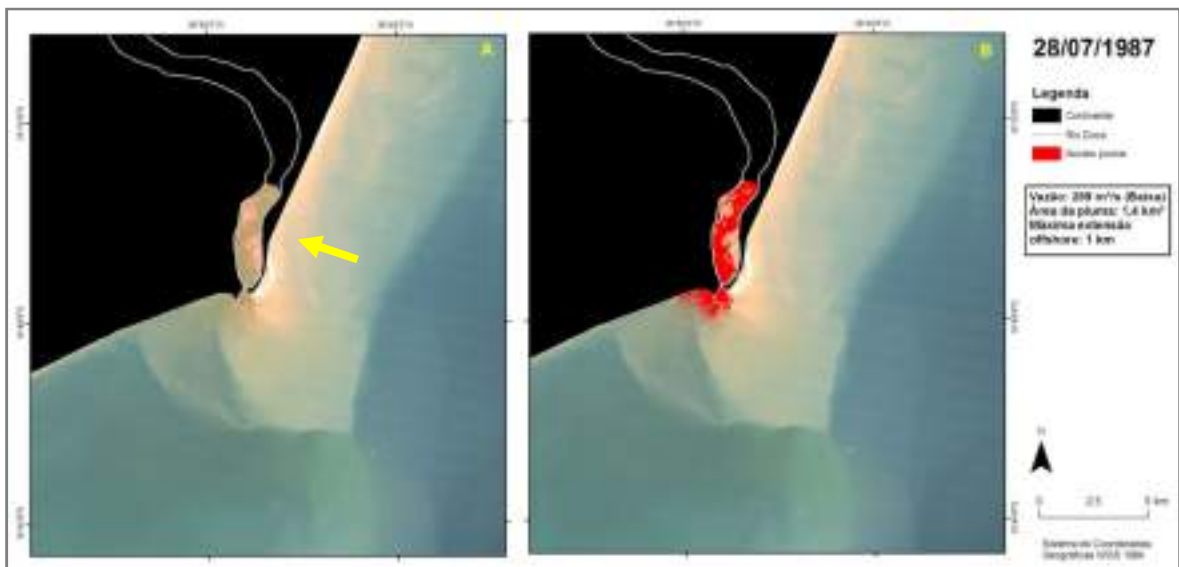


Figura 28: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 28/07/1987. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce, razão pela qual a pluma apresentou pequeno tamanho.

5.2.1.2 Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura

Esse padrão apresentou as mesmas características do padrão supracitado. No entanto, em quatro imagens observa-se a presença de uma circulação ciclônica, aparentando ser um vórtice, com posição variando entre 5 e 10 km ao sul da

desembocadura do rio Doce e em profundidades superiores à 15 m (Figura 29) e Figuras 52 a 55 do ANEXO I. Aparentemente essa feição é formada por água costeira proveniente do norte da desembocadura, não se excluindo a possibilidade da água da pluma também colaborar para a formação desta.

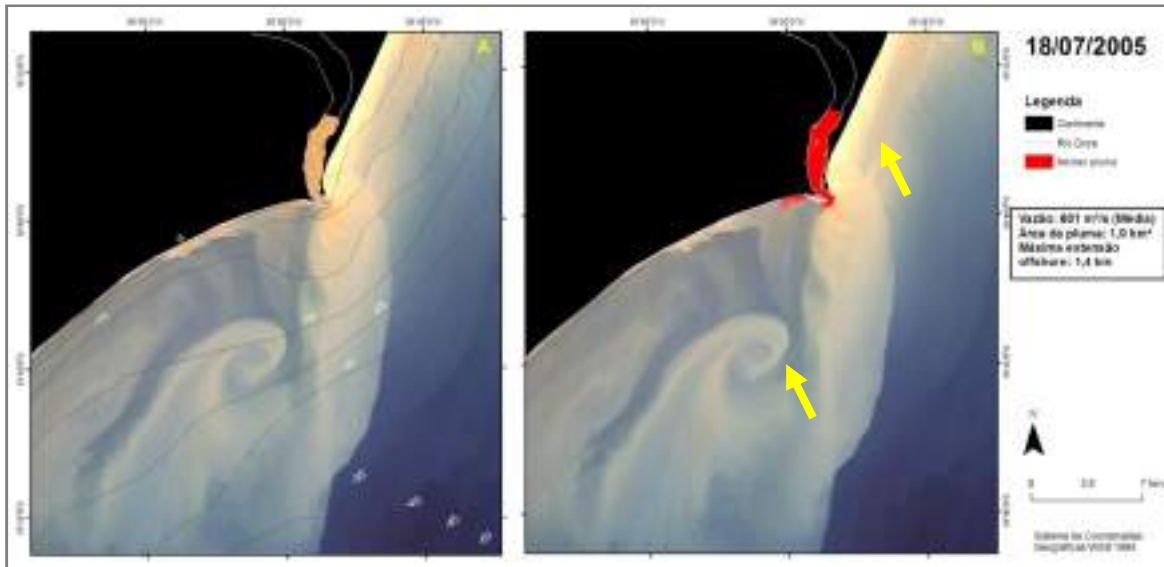


Figura 29: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 18/07/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se ao norte da desembocadura águas com turbidez superior àquela visualizada na água proveniente do rio Doce. Ao sul da desembocadura se observa feição com circulação ciclônica.

5.2.1.3 Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura

Essas plumas ficaram concentradas defronte à desembocadura do rio Doce e apresentaram uma protuberância circular em formato que lembra uma “gota” (Figura 30 e Figuras 56 a 63 do ANEXO I). Em algumas imagens esta feição é orientada em SE (07/04/1993, 11/04/06) e na imagem de 14/04/09 está adjacente à costa sul da desembocadura. A forma dessa feição varia muito entre as plumas: algumas apresentam formatos mais arredondados (ex: 11/04/06), e outras mais “ovalados” (29/03/07). A extensão *offshore* dessa feição varia entre 2,2 km (29/03/07) e 5,2 km (19/04/09). Associado a essa forma circular havia um fluxo para a costa norte da

desembocadura, que varia em largura e extensão, chegando a atingir mais de 5 km de extensão na imagem de 14/04/09.

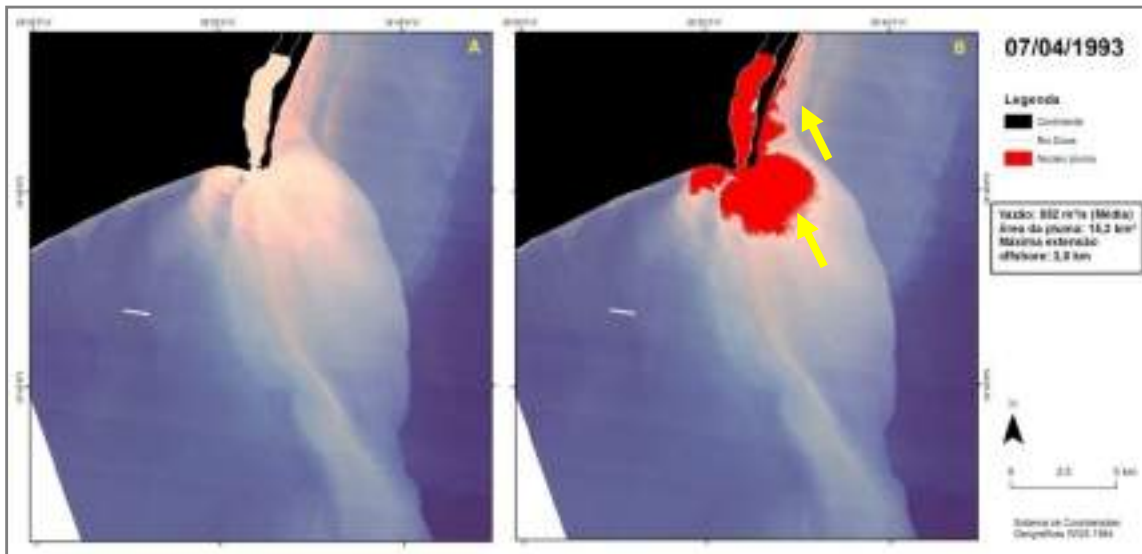


Figura 30: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 07/04/1993. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se a formação de uma protuberância orientada em SE e um fluxo ao norte da desembocadura.

5.2.1.4 Dispersão radial a partir da desembocadura

Nessas imagens a distribuição da pluma se dá de forma radial a partir da desembocadura. Quatro imagens se encaixaram nessa classificação, sendo que na imagem 19/01/04 pode-se observar considerável fluxo de água para a costa ao norte da foz do rio (Figura 31 e Figuras 64 a 67 do ANEXO I).

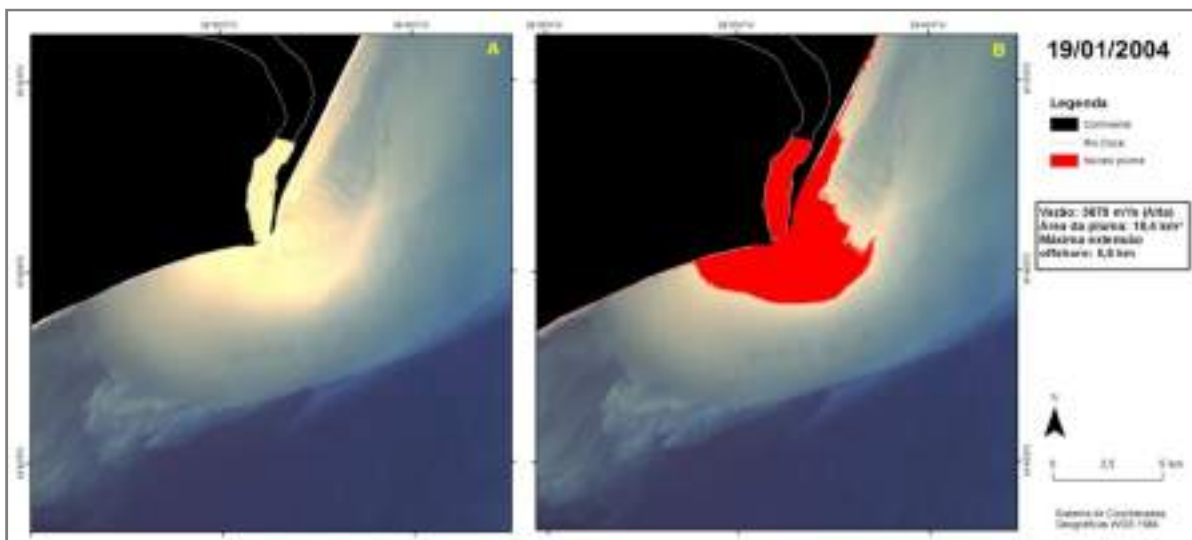


Figura 31: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 19/01/2004. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que a pluma se espalha radialmente em torno da desembocadura.

5.2.1.5 Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura

Quatro imagens foram classificadas nessa categoria. A pluma dessas imagens está majoritariamente localizada na costa norte da desembocadura do rio (Figura 32 e Figuras 68 a 71 do ANEXO I).

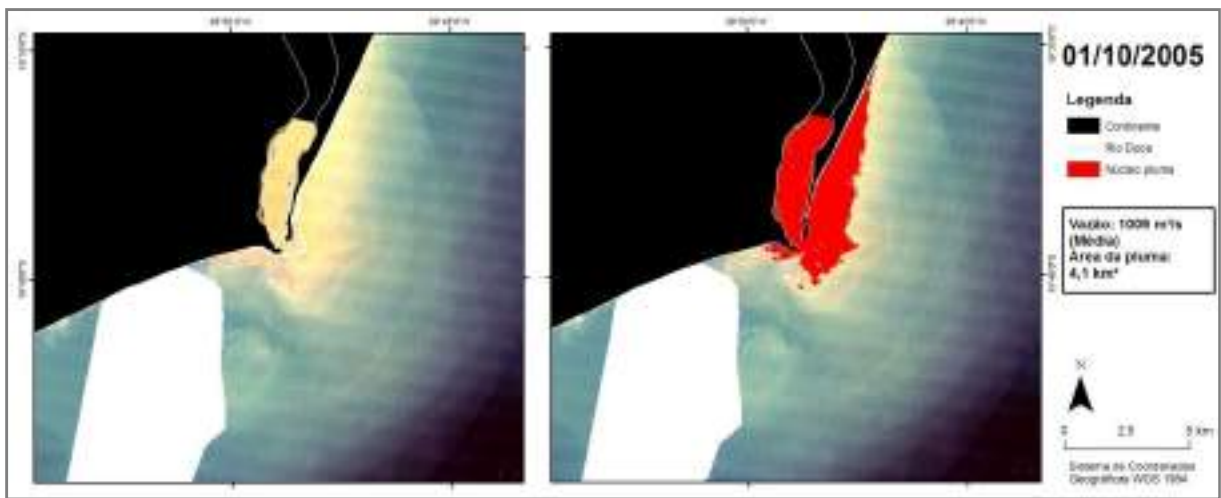


Figura 32: Resultado obtido com a classificação da imagem do dia 01/10/2005. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Observa-se que toda a pluma está deslocada para a costa ao norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

5.3 CORRELAÇÃO DOS DADOS

A Tabela apresenta as imagens em que foram realizadas correlações com a vazão e dados de vento.

5.3.1 Pluma x Vazão fluvial

A Figura 33 apresenta a área de pluma obtida para cada imagem, assim como sua respectiva vazão associada. De maneira geral, observou-se as seguintes situações:

- As menores áreas de pluma ocorreram entre o final do outono e final do inverno (vazões baixas – até 445 m³/s). As plumas das imagens de vazão baixa variaram entre 0,23 km² (14/08/99, Q = 251 m³/s) e 6,2 km² (29/06/00, Q= 356 m³/s). Todas as imagens de vazão baixa, exceto esta última, apresentaram plumas com áreas inferiores a 5 km² e não apresentaram um padrão de dispersão comum, sendo classificadas nas categorias (1) e (2) da Tabela 11.

- As maiores áreas de pluma ocorreram entre o verão e o início do outono (vazões altas, > 1092 m³/s). Destaque para as imagens obtidas em 14/04/09 (29,1 km², Q = 1436 m³/s) e 11/03/04 (27,7 km², Q = 1725 m³/s). Importante ressaltar que a imagem com a maior vazão (19/01/04, Q = 3670 m³/s) não apresentou a maior área de pluma (25,5 km²).

- Em imagens obtidas em vazões médias (entre 445 e 1092 m³/s) as duas situações ocorreram: plumas com grande área e plumas muito pequenas. As áreas variaram entre 1,0 (18/07/05, Q = 601 m³/s) e 15,3 km² (07/04/93, Q = 852 m³/s).

A Figura 34 apresenta as áreas médias para as três categorias de vazão. Apesar do alto desvio padrão para as áreas em vazões baixas e médias, observa-se uma grande disparidade entre as áreas das categorias, principalmente entre vazões médias e altas, indicando uma correspondência entre a vazão e as áreas das plumas. Nas vazões médias foi observado o maior desvio padrão, o que indica uma maior variabilidade no tamanho de pluma gerada.

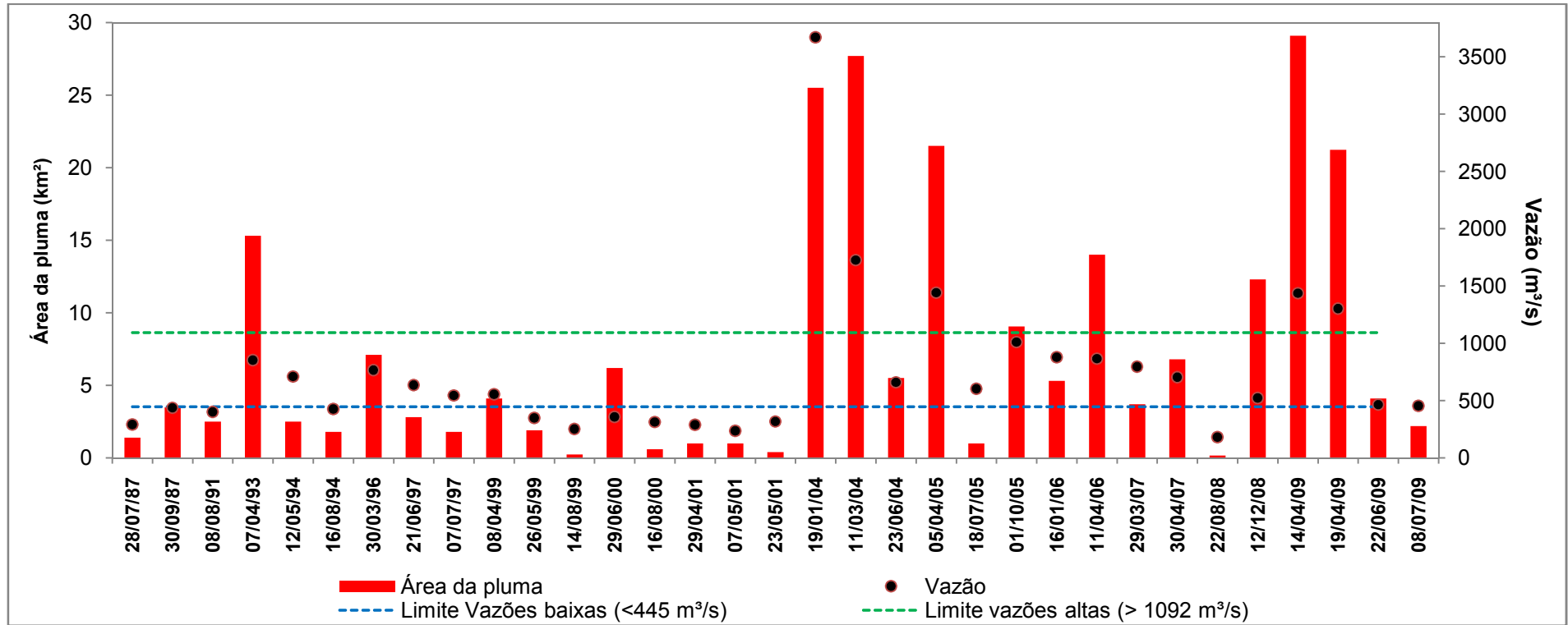


Figura 33: Área de pluma obtida para cada imagem classificada com sua respectiva vazão associada. As linhas tracejadas azul e verde indicam os limites para vazões baixas e altas, respectivamente.

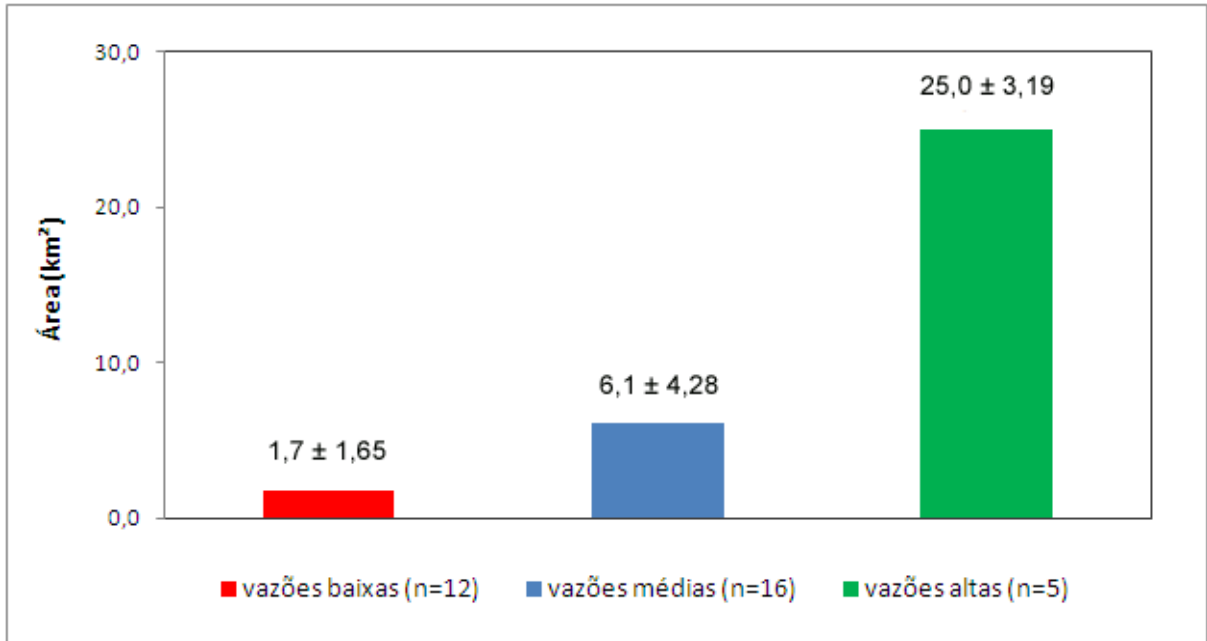


Figura 34: Áreas médias de pluma para as imagens em vazões baixas, médias e altas e desvios-padrão associados.

A Figura 35 apresenta a correlação entre a vazão do rio Doce e a área da pluma por meio de regressão linear, cujo coeficiente de determinação obtido foi de 0,73. Assim, este coeficiente indica que existe uma correlação positiva entre a vazão e a área da pluma.

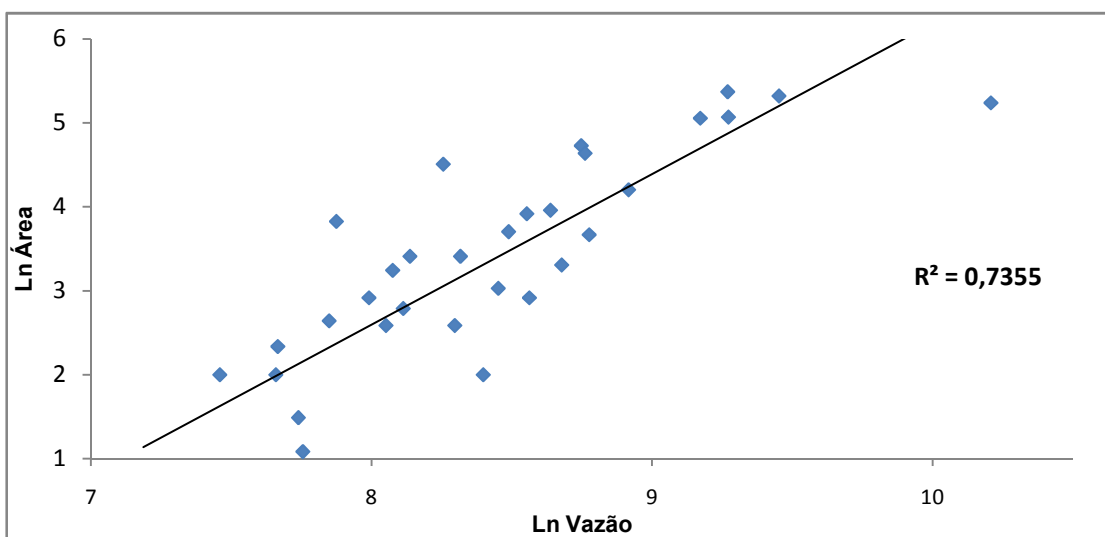


Figura 35: Regressão linear entre a vazão do rio Doce e as áreas de pluma. Os dados foram transformados em logaritmo natural.

A Figura 36 apresenta os padrões de distribuição superficial das plumas relacionados com a área média de pluma e vazões médias dos grupos de imagens classificadas em cada um dos padrões. Os desvios-padrão obtidos para as áreas e vazões dos padrões de distribuição superficial foram elevados, exceto para a área do padrão nº 5. Entretanto, pode-se comprovar que na média:

- Os padrões de distribuição superficial (1) e (2) ocorreram em imagens com vazões baixas a médias, apresentaram áreas pequenas e foram típicos dos meses entre maio e setembro;
- O padrão (3) ocorreu em imagens com vazão média a alta e apresentou áreas de pluma em torno de 10 km²;
- O padrão (4) ocorreu apenas em imagens com vazão alta e as plumas possuíam as maiores áreas, entretanto com grande variação de tamanho. Este e o padrão anterior (nº 3) foram típicos dos meses entre dezembro e abril;
- Por fim, o padrão de distribuição (5) ocorreu nas imagens com vazão baixa a média, apresentou áreas em torno de 7 km² e ocorreu nos meses entre abril e outubro.

Novamente se observa uma relação positiva entre a vazão e a área de pluma gerada.

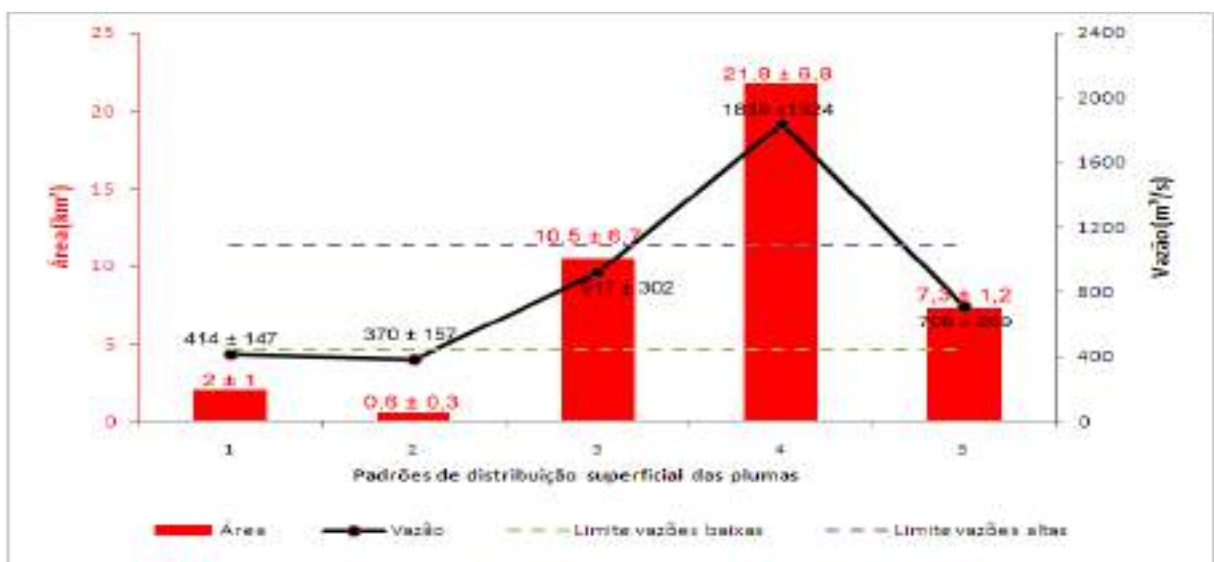


Figura 36: Padrões de distribuição superficial das plumas, suas áreas médias e desvio-padrão e vazões médias e desvio-padrão dos grupos de imagens classificadas em cada um dos padrões. 1: Sem padrão de dispersão comum; 2: Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura; 3: Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura; 4: Dispersão radial a partir da desembocadura; 5: Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura. n(1)= 13; n(2)= 4; n(3)= 8; n(4)= 4; N(5)= 4.

5.3.2 Pluma x vento

Essa correlação foi realizada para 14 das 33 imagens, conforme apresentado na Tabela 12. A maioria das imagens apresentou um bom nível de resposta em relação ao vento, entretanto com efeito variável. Na maior parte das imagens com vazão baixa e plumas de área pequena não se observou efeitos aparentes do vento no núcleo das plumas. As imagens com maiores áreas de plumas responderam melhor ao efeito do vento. Em muitas imagens são observadas feições na superfície oceânica que indicam o transporte da pluma e das águas costeiras na direção aproximada do vento predominante nas horas anteriores à obtenção da imagem. Essas feições foram mais facilmente identificadas nas regiões periféricas das plumas e na ressuspensão de sedimentos de águas rasas que não estavam associadas às plumas, conforme pode ser observado nas imagens do ANEXO I. A Tabela 12 apresenta as direções e velocidades médias de ventos nas últimas 24 horas antes da obtenção de cada imagem bem como uma classificação dos padrões de ventos observados nas mesmas. Foram definidos três padrões principais: ventos de baixa intensidade, ventos do quadrante norte e ventos do quadrante sul. O diagrama *stick plot* de ventos de cada imagem está na parte inferior das figuras presentes no ANEXO I.

Tabela 12: Direções e velocidades médias de ventos (m/s) nas últimas 24 horas antes da obtenção de cada imagem de satélite, agrupados por períodos de 3 horas e classificação dos padrões de ventos observados (convenção meteorológica).

	Horas anteriores / Direção e velocidade média do vento (m/s)									Classificação
	24-21h	21-18h	18-15h	15-12h	12-9h	9-6h	6-3h	3-0h	-	
19/01/04	S, 6,2	S, 6,5	S, 3,9	S, 2,1	SO, 0,7	SO, 0,5	SO, 1,5	S, 4,0		2) Ventos do quadrante sul
11/03/04	L, 4,6	L, 5,9	NE, 4,1	NO, 1,6	NO, 0,6	NO, 1,5	NO, 2,7	NE, 3,4		1) Ventos de baixa intensidade
23/06/04	SO, 5,1	O, 2,1	O, 3,2	SO, 2,7	SO, 3,8	SO, 3,4	SO, 2,4	S, 2,5		1) Ventos de baixa intensidade
05/04/05	NE, 7,1	NE, 6,3	N, 4,4	NO, 2,9	N, 2,9	N, 3,5	N, 4,5	N, 4,9		3) Ventos do quadrante norte
18/07/05	N, 7,3	N, 6,0	N, 5,1	N, 4,2	N, 5,5	N, 4,7	N, 4,0	L, 1,2		3) Ventos do quadrante norte
01/10/05	S, 5,2	SE, 4,1	SE, 4,9	SE, 3,8	SO, 3,9	SO, 3,9	SO, 2,7	NE, 1,6		2) Ventos do quadrante sul
16/01/06	NE, 5,5	NE, 5,5	NE, 4,4	N, 1,5	NO, 0,2	O, 0,2	O, 0,3	NE, 3,3		1) Ventos de baixa intensidade
11/04/06	N, 3,8	N, 4,6	NO, 2,1	NO, 1,4	NO, 2,1	NO, 2,8	SO, 2,3	S, 2,4		1) Ventos de baixa intensidade
22/08/08	L, 6,6	L, 8,1	NE, 4,1	NO, 2,5	O, 3,2	NO, 3,4	NO, 3,1	NE, 4,8		3) Ventos do quadrante norte
12/12/08	N, 7,5	NE, 6,1	NE, 6,2	N, 4,9	-	-	-	-		3) Ventos do quadrante norte
14/04/09	S, 9,1	S, 8,1	SO, 6,8	SO, 6,6	SO, 4,2	O, 3,1	SO, 3,5	SE, 2,3		2) Ventos do quadrante sul
19/04/09	S, 7,8	S, 7,6	S, 6,1	O, 4,3	O, 4,7	O, 4,4	O, 3,6	S, 1,6		2) Ventos do quadrante sul
22/06/09	S, 4,6	SE, 4,7	S, 3,2	S, 2,7	O, 3,5	O, 3,0	O, 2,0	NE, 2,0		2) Ventos do quadrante sul
08/07/09	SE, 3,3	L, 3,9	NE, 2,4	O, 1,3	O, 2,0	O, 3,7	O, 2,8	L, 1,6		1) Ventos de baixa intensidade

5.3.2.1 Ventos de baixa intensidade

Imagens com velocidade média do vento inferior a 3 m/s nas últimas 24 horas antes de sua obtenção foram classificadas nessa categoria. Observa-se que essas imagens apresentam em comum um deslocamento de água da pluma para o norte da desembocadura, em magnitude variável, sendo que três das cinco imagens apresentam o padrão 3 (Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura) da Tabela 11. Apesar de apresentarem baixa velocidade média de ventos, foram observadas em todas as imagens feições oceanográficas associadas às direções do vento que indicam deslocamento das camadas superficiais em águas rasas, inclusive as da pluma. A Figura 37 apresenta as feições observadas nas imagens de 11/03/04 e 16/01/06, nas quais predominaram ventos do quadrante norte.

5.3.2.2 Ventos do quadrante Norte

Feições observadas nas imagens indicam que esses ventos exerceram considerável influência no deslocamento da pluma do rio Doce, apesar da análise de correlação entre ventos e correntes medidos por ASA (2003) ter demonstrado menor correspondência entre esses ventos e as correntes costeiras do que os provenientes do quadrante sul. A Figura 38 apresenta algumas imagens com ventos do quadrante norte, onde se pode observar um considerável deslocamento para sul de águas das águas periféricas da pluma, chegando a mais de 30 km da desembocadura do rio Doce na imagem de 05/04/05. Entretanto, observou-se que as imagens que possuem vazões mais elevadas tiveram as plumas com leve dispersão para a costa ao norte da desembocadura (padrão de dispersão radial).

A feição oceanográfica com circulação ciclônica presente ao sul da desembocadura da imagem de 18/07/05 provavelmente está associada aos ventos vindos de N-NO com intensidade superior a 5 m/s que sopraram com boa regularidade nos dois dias anteriores à obtenção dessa imagem. Na costa ao norte da desembocadura esses ventos realizaram transporte de água rumo ao sul, além de possuírem potencial de mobilização das águas mais rasas para offshore, fato constatado pela larga faixa de

águas turvas nessa região. Assim, tais ventos possivelmente geraram uma corrente costeira em direção ao sul fluindo em profundidade média de 5 m, conforme observado na Figura 29. Possivelmente o encontro entre essa corrente costeira com o fluxo fluvial associado às características da plataforma continental na região originaram essa feição, que será investigada adiante.

Já na imagem de 22/08/08, devido à vazão extremamente baixa não se observou efeitos na pluma pela pequena área desenvolvida, mas feições nas águas costeiras mais rasas mostram influência do vento na circulação.

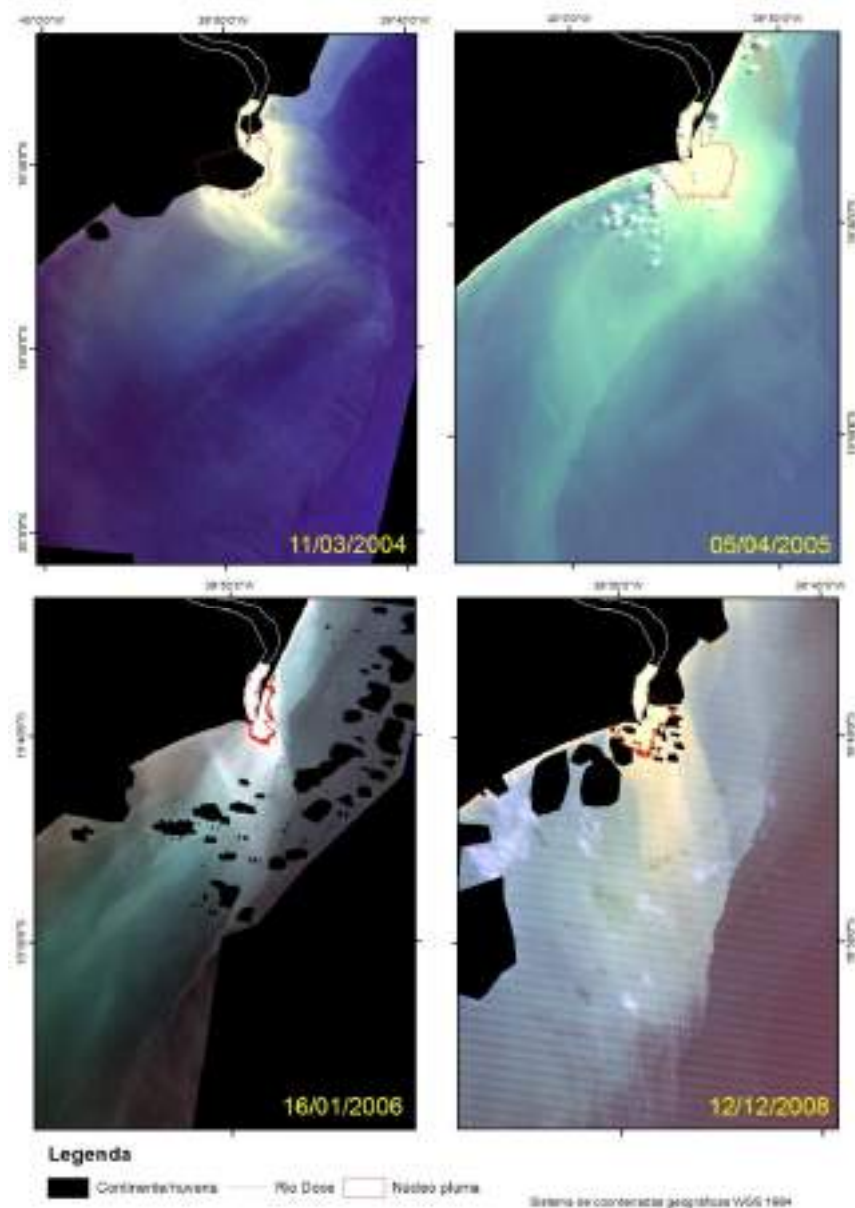


Figura 37: Imagens com ventos do quadrante norte, onde se pode observar um considerável deslocamento para sul das águas periféricas da pluma.

5.3.2.3 Ventos do quadrante Sul

Feições observadas nas imagens indicam que esses ventos dificultaram o deslocamento para sul das águas periféricas da pluma do rio Doce. A Figura 38 apresenta as imagens com ventos desse quadrante, onde se pode observar que a “frente” de turbidez causada pelo deságüe do rio não avança muito em direção a sul em comparação com as imagens obtidas com ventos do quadrante norte. Devido à vazão alta do rio (exceto na imagem de 01/10/05), observa-se que os ventos do quadrante sul não são suficientes para impedir o deslocamento da pluma rumo ao sul. Pelas poucas observações realizadas, observa-se uma tendência de intensificação do fluxo para a costa norte da desembocadura causada pelo vento nas imagens com padrão de dispersão radial (19/01/04) e nas imagens com o padrão nº 3.

A imagem de 01/10/05 foi a única imagem com dados de ventos disponíveis que apresentou deslocamento da pluma totalmente para o norte. Esse padrão foi reflexo de ventos muito fortes e constantes que provinham de S-SO durante 4 dias antecedentes à obtenção da imagem. Do 4º ao 2º dia anterior os ventos chegaram a ultrapassar 10 m/s.

O formato radial da imagem de 19/01/04 é reflexo de ventos fortes provenientes de norte que predominaram do 10º ao 4º dia anterior à obtenção da imagem e deslocaram a pluma rumo a sul. Já o ligeiro alongamento da pluma em direção ao norte deve estar associado aos ventos de sul com intensidade média que sopraram nos três dias anteriores e deslocou água para a costa ao norte da desembocadura.

As imagens de 14/04/09 e 19/04/09 não responderam da mesma forma aos ventos predominantes de S-SO, mesmo estes tendo considerável intensidade. A primeira aparenta ter respondido aos ventos provenientes de sul que sopraram entre a 24ª e 12ª hora anterior à obtenção da imagem que podem ter dificultado a saída de água na foz e mantido a pluma na costa sul da desembocadura. Já na segunda imagem, obtida após 5 dias, o ligeiro deslocamento da pluma para nordeste, sua forma e a intensificação do fluxo para o norte da desembocadura indicam uma boa resposta aos ventos de SO.

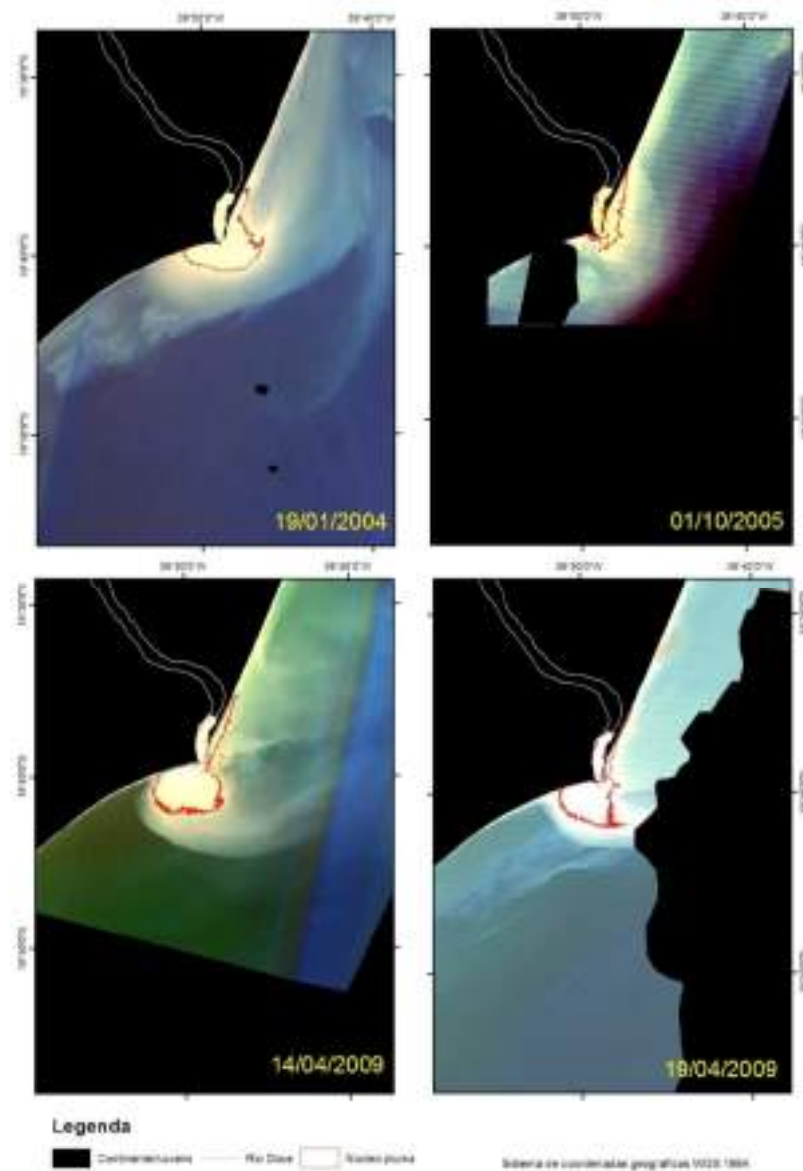


Figura 38: Imagens com ventos do quadrante sul. Pode-se observar que a “frente” de turbidez causada pelo deságüe do rio não avança muito em direção ao sul em comparação com as imagens obtidas com ventos do quadrante norte.

5.3.3 Síntese das correlações obtidas

A Tabela 13 apresenta uma síntese resumida integrando as correlações obtidas entre os padrões de distribuição superficial e os dados de vazão e vento.

Tabela 13: Síntese das correlações obtidas entre os padrões de distribuição superficial das plumas e os dados de vazão e vento

Padrão de distribuição superficial da pluma	Número de imagens	Área média (km²) / desvio padrão	Média das vazões observadas / desvio padrão	Ventos observados	Nº de imagens com dados de vento
1) Sem padrão de dispersão comum	13	2,0 / 1,0	415 m ³ /s (vazão baixa) / 147	Variável	3
2) Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura	4	0,6 / 0,3	379 m ³ /s (vazão baixa) / 157	NO e N. Intensidade >5 m/s e constantes	1
3) Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura	8	10,5 / 6,8	917 m ² /s (vazão média) / 302	Variável	5
(4) Dispersão radial a partir da desembocadura	4	21,8 / 6,8	1972 m ³ /s (vazão alta) / 1324	Variável	4
(5) Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura	4	7,3 / 1,2	708 m ³ /s (vazão média) / 269	SO e S	1

6. DISCUSSÃO

A discussão dos resultados foi dividida em três seções: a primeira irá abordar os aspectos referentes à correlação dos dados, a segunda discutirá alguns aspectos referentes à metodologia utilizada e na última serão apresentadas sugestões de estudos futuros visando aprofundar o conhecimento a respeito da dinâmica da pluma do rio Doce.

6.1 CORRELAÇÃO DOS DADOS

6.1.1 Influência das forçantes vazão fluvial e vento sobre a variabilidade espaço-temporal da pluma

Com relação à vazão fluvial, o coeficiente de determinação obtido entre as áreas das plumas e as vazões ($r^2 = 0,73$) demonstra uma correlação positiva, ou seja, existe uma correlação significativa entre essas duas variáveis. A partir das observações realizadas pode-se inferir que a vazão é o principal fator controlador do tamanho do núcleo da pluma do rio Doce. Esses resultados se assemelham aos obtidos por Halverson & Pawlowicz (2008) – rio Fraser, Canadá e Lihan *et al.*, (2008) – rio Tokachi, Japão. Estes últimos também observaram as maiores áreas de pluma nos períodos com maiores vazões do rio. Nesses períodos os autores observaram os maiores coeficientes de correlação entre vazão e área de pluma, com valores de r^2 que variaram entre os anos, indo de 0,40 a 0,66. No período de inverno (baixa vazão), não foram observadas correlações significativas. Já Walker *et al.*, (2005) constataram que o tamanho da pluma de sedimentos do rio Mississippi (EUA) é fortemente influenciada pela descarga do rio em todas as condições de vento observadas. Segundo esses autores, a vazão, junto com o vento são os principais fatores controladores da dinâmica da pluma de sedimentos desse rio. A predominância dessas duas forçantes na dinâmica de plumas também foi constatada por Liu *et al.*, (2008) – rio Danshuei, Taiwan e Thomas & Weatherbee (2006) – rio Columbia, EUA.

A constatação de que a área de uma dada pluma não é diretamente proporcional à vazão, como apresentado na Figura 34, assim como o grande desvio padrão observado nas médias das vazões e áreas dos padrões de distribuição superficial já indicam que outros fatores, entre eles o vento (através do transporte de Ekman nas camadas de água superiores), também influenciam no tamanho da pluma do rio Doce. Resultados obtidos por Garvine (1975) – rio Connecticut, EUA e Halverson & Pawlowicz (2008) indicaram influência preponderante do *stress* do vento na mistura das águas de plumas fluviais e espalhamento das mesmas. Nesse contexto, a pluma da imagem do dia 19/01/04 ($Q = 3670\text{m}^3/\text{s}$) apresentaria área muito maior caso o vento predominante fosse do quadrante norte, favorecendo o espalhamento da mesma.

A baixa quantidade de imagens de satélite associada a dados de vento (devido às limitações na disponibilidade desses dados) restringiu as análises a poucas situações. No entanto, foi possível constatar que essa forçante exerce papel importante na hidrodinâmica costeira da região, e conseqüentemente na mistura e deslocamento da pluma do rio Doce, conforme demonstrado na correlação entre ventos e correntes obtidos por ASA (2003), por feições oceanográficas (presentes na maioria das imagens do ANEXO I) e pela influência no espalhamento e deslocamento da pluma. Esse mesmo padrão já foi observado na plataforma continental do Espírito Santo em alguns estudos (CASTRO FILHO & MIRANDA, 1998; PETROBRAS, 2006).

A maior influência do vento nas regiões periféricas da pluma vai ao encontro de diversos estudos (FONG & GEYER, 2002; BERDEAL *et al.*, 2002; LAHET & STRAMSKI, 2010) com destaque para o modelo proposto por Hetland (2005), apresentado na Figura 1, pois a vazão fluvial e o cisalhamento inercial são as forçantes dominantes nas regiões próximas à desembocadura. Os ventos do quadrante sul com intensidade moderada a alta, além de limitarem o espalhamento rumo ao sul da pluma em situações de vazões altas, também devem gerar uma frente de sedimentos, nutrientes, poluentes e fitoplâncton com importantes conseqüências ecológicas. Fenômeno semelhante foi observado por WALKER *et al.*, (2005) na pluma do rio Mississipi, e essas regiões foram denominadas de “*hot spots*” pelos autores. No estudo de caso da pluma do rio Doce os ventos do quadrante

norte intensificam o espalhamento da pluma rumo a S-SE, pois a orientação da desembocadura já favorece o espalhamento do fluxo fluvial nessas direções.

Com relação aos ventos do quadrante norte, mais observações são necessárias para se confirmar a presença da pluma na costa norte da desembocadura em situações de vazão média (521 m³/s), conforme observado na imagem de 12/12/08. Devido à presença de nuvens na imagem não foi possível confirmar se a turbidez era proveniente do deságüe fluvial ou de ressuspensão de sedimentos costeiros.

6.1.2 Padrões de distribuição superficial da pluma no ambiente marinho

Os padrões de distribuição superficial das plumas são resultado de um somatório de forçantes externas (ex: ventos, marés) e internas (ex: diferenças de densidade entre a água fluvial e marinha, variação morfológica da desembocadura) que influenciaram na dinâmica da pluma por vezes até muitos dias antes de uma dada imagem. Como não se dispunha de imagens de satélite com alta resolução temporal do ambiente (16 dias para série Landsat e 26 dias para série CBERS), a interpretação das forçantes que configuram uma determinada feição de pluma foi dificultada. Entretanto, foi possível realizar inferências que em boa parte explicam os padrões observados.

O padrão de distribuição superficial nº 3 (protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura) é muito semelhante a uma típica pluma de espalhamento superficial descrita por diversos autores (GARVINE, 1975; FONG & GEYER, 2002; HUQ, 2009). Os perfis de salinidade obtidos por ASA (2003) na região da desembocadura do rio Doce em situação com ($Q = 948 \text{ m}^3/\text{s}$) e outras evidências corroboram com essa afirmação:

- a) A grande diferença de densidade observada entre as águas do deságüe fluvial e a água oceânica. Segundo Chapman & Lentz (1994) e Yankovisky & Chapman (1997), a formação de uma pluma com advecção de fundo só é possível quando

houver uma pequena diferença de densidade entre a água da descarga e a água oceânica (baixo número de Burguer);

- b) A boa resposta no deslocamento das águas da pluma observadas em feições oceanográficas mesmo em situações de ventos com velocidades médias inferiores a 3 m/s, o que indica que a pluma se espalha no ambiente marinho em uma fina camada sobre a água oceânica;
- c) Plumas com espalhamento superficial são mais propensas a ocorrerem em baixas latitudes do que plumas com advecção de fundo, já que o parâmetro de Coriolis diminui, fazendo o número de Burguer aumentar (descrição apresentada no ANEXO II);
- d) Visando verificar o padrão superficial da pluma do Rio Doce foi testado um índice proposto por Yankovisky & Chapman (1997). Esses autores propõem a comparação entre a profundidade do influxo fluvial na desembocadura com a “profundidade de equilíbrio” que determina a máxima profundidade que o transporte na camada limite de fundo pode mover a pluma offshore, para o caso de uma pluma com advecção de fundo. A profundidade de equilíbrio calculada para a pluma do rio Doce foi menor que a profundidade do influxo na desembocadura, o que segundo os autores demonstra que a dinâmica do transporte na camada limite de fundo não tem influência significativa e uma pluma com espalhamento superficial é desenvolvida. O ANEXO II apresenta esses cálculos.

O padrão de dispersão superficial nº 3 também demonstra que a pluma sofre considerável influência de Coriolis e apresenta circulação anticiclônica interna na protuberância circular, já que ocorre a formação de um fluxo ao norte da desembocadura, assim como demonstrado por diversos estudos utilizando modelos computacionais que não levaram em consideração forçantes externas como maré, ventos e correntes costeiras (CHAO & BOICOURT, 1986; CHAO, 1988; KOURAFALOU *et al.*, 1996; YANKOVSKY & CHAPMAN, 1997; FONG & GEYER, 2002; HUQ, 2009). O balanço entre a aceleração centrífuga-aceleração de Coriolis e gradiente de pressão são as forçantes físicas controladoras da dinâmica da protuberância de uma pluma, enquanto a geostrofia controla o balanço de momentum do fluxo associado (HORNER-DEVINE *et al.*, 2006).

Nos resultados obtidos foi constatado que nas situações de ventos fracos ($< 3\text{m/s}$) havia a presença de água da pluma também na costa norte da desembocadura, o que pode indicar um comportamento condizente com os modelos desenvolvidos por esses autores. A restrita quantidade de observações não permite inferir as condições de vento relacionadas com essa feição, mas constatou-se que a mesma ocorreu em ventos do quadrante sul (SO dominante) e ventos fracos do quadrante norte. Os ventos do quadrante sul possivelmente auxiliam na dispersão para o norte do fluxo associado à protuberância, como já relatado.

Com relação à vazão fluvial, a ocorrência desse padrão de distribuição superficial em vazões médias a altas está de acordo com o observado por Choi & Wilkin (2006), que realizaram modelagem hidrodinâmica da pluma do rio Hudson (EUA) e só observaram a formação desse padrão quando o fluxo fluvial foi alto. A realização de modelagem matemática em modelo hidrodinâmico 3D e medições de salinidade *in situ* poderiam comprovar objetivamente os resultados obtidos, principalmente com relação às situações em que esse padrão é formado e estabelecer a dinâmica entre protuberância e fluxo associado, assim como realizado por Yankovsky & Chapman (1997), Fong & Geyer (2002), Horner-Devine *et. al.*, (2006) e Huq (2009). Esses autores citam que a formação ou não dessas feições, e formato das mesmas estão relacionados com o raio interno da onda de Rossby (relação entre a diferença de densidade entre a água fluvial e oceânica, profundidade da desembocadura e parâmetro de Coriolis) e o número de Kelvin (razão entre a largura da desembocadura e raio interno da onda de Rossby). Como não eram objeto de estudo desse trabalho, tais índices não foram calculados, mas ficam como sugestão para estudos posteriores.

Com relação ao padrão de dispersão superficial nº 1 (sem padrão de dispersão comum), observa-se que o mesmo é típico dos meses entre maio e setembro, período que apresenta as menores vazões médias do regime hidrológico. Os maiores desvio-padrão das áreas desse padrão provavelmente são resultado das dificuldades de delimitação do perímetro da pluma devido às águas com alta turbidez provenientes da desembocadura, conforme já relatado. Zoffoli *et al.*, (2011) realizaram classificações supervisionadas em nove imagens (categorizadas em períodos de vazão alta e baixa) do satélite Landsat, subdividindo as águas

oceânicas em quatro classes, sendo a pluma uma delas. Esses autores também obtiveram maiores desvios-padrão para as áreas de pluma em período de vazão baixa e sugerem que as condições das águas receptoras (ventos, marés, correntes) seriam as determinantes da escala espacial de distribuição da pluma, apesar de não utilizarem diretamente tais dados nas análises. Tal consideração foi constatada em parte pelo presente estudo, pois os resultados indicam que a vazão seja o principal fator controlador do núcleo da pluma, não sendo possível avaliar objetivamente o efeito do vento devido às pequenas áreas de pluma, localizadas principalmente defronte à desembocadura, com pouca extensão *offshore*. Uma modelagem hidrodinâmica seria a melhor ferramenta de análise dessa situação.

O padrão de distribuição superficial nº 2 (sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura) apresenta praticamente as mesmas características do supracitado, e apesar de apenas uma imagem representativa possuir dados de vento, pode-se inferir que para a feição com circulação ciclônica ao sul da desembocadura seja originada é necessário que os ventos sejam constantes de N-NO com intensidades superiores a 5 m/s. Aparentemente essa feição só ocorre nessas situações de vazão, já que ventos constantes e moderados também sopraram antes da imagem de 05/04/05 (vazão alta). A associação entre as águas da corrente costeira gerada pelos ventos ao norte da desembocadura, a água do fluxo fluvial, assim como as diferenças batimétricas entre o norte e o sul da desembocadura devido à mudança de inclinação da linha de costa possivelmente são as condicionantes causadoras dessa feição, originada pela manutenção da vortacidade do fluxo que fluía rumo a sul junto à costa ao norte da desembocadura.

Já no padrão de distribuição nº4 (dispersão radial a partir da desembocadura), são observadas áreas de plumas muito grandes. As três imagens com maiores vazões (19/01/04, 11/03/04 e 05/04/05) apresentaram este padrão, o que pode indicar uma tendência das maiores vazões em apresentar uma distribuição de pluma radial. Entretanto, estudos posteriores precisam ser realizados para confirmar tal tendência devido à restrita quantidade de observações realizadas.

Por fim, as observações indicam que o padrão de distribuição nº 5 (deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura) se desenvolve na combinação de dois fatores: vazões baixas a médias e ventos de S-SE constantes, com velocidades elevadas e soprando por vários dias. Apesar de apenas uma imagem desse padrão possuir dados de vento, pode-se inferir que esse padrão não ocorra em vazões muito altas, situação em que o fluxo fluvial parece ser predominante, assim como observado nas imagens de 14/04/09 e 19/04/09, nas quais apenas a pluma da última apresentou um pequeno deslocamento para NE.

6.1.3 OUTRAS FORÇANTES NÃO ABORDADAS DIRETAMENTE NESTE ESTUDO

Apesar de serem reconhecidamente forçantes que também atuam no espalhamento superficial da pluma, não se correlacionou forçantes de meso/macro-escala, maré e ondas com os padrões de distribuição superficial de plumas observados, visto que essa análise seria complexa e subjetiva, sendo possível apenas em uma modelagem hidrodinâmica. Com relação à maré, espera-se que sua influência seja considerável em situações em que marés de sizígia e ventos muito fracos estejam associados. Os resultados obtidos por Halverson & Pawlowicz (2008) demonstraram que a maré e a vazão são as forçantes dominantes na plataforma continental defronte ao rio Fraser, Columbia Britânica, Canadá. Entretanto, a amplitude máxima de maré dessa região gira em torno de 5 m, muito superior à observada na região do presente estudo (1,5 m).

Não obstante, Munchow & Garvine (1993) citam que em plataformas continentais internas com fortes fluxos fluviais, ventos locais e fluxos de flutuabilidade são as forçantes dominantes, o que de certa forma vai ao encontro dos resultados obtidos para as correntes ocasionadas pelas componentes semi-diurnas da maré, apresentados na seção 4.

Uma característica importante a ser destacada foi a alta variabilidade de largura e orientação da desembocadura do rio Doce, observada nas imagens analisadas e

bem relacionada com o regime fluvial. A largura variou entre 100 e 700 m (medidos a partir da banda 4 das imagens). Já a orientação da desembocadura variou entre Sul e Sudoeste. Segundo Avicola & Huq (2003a e 2003b), a geomorfologia da desembocadura de um rio influencia fortemente nas características da pluma formada. Como exemplo, a imagem de 30/03/96 apresenta a desembocadura com largura de 600 metros voltada para SE, o que provavelmente facilitou a dispersão da pluma para a costa ao norte da desembocadura. Entretanto, os padrões de distribuição superficial das plumas não foram correlacionados com essa variabilidade geomorfológica no presente estudo, porém espera-se que a mesma influencie significativamente na morfologia da pluma formada.

6.2 METODOLOGIA UTILIZADA

Avalia-se que o método utilizado atendeu ao objetivo principal do estudo: analisar a variabilidade espaço-temporal da pluma do rio Doce e correlacionar padrões de imagens de satélite com dados obtidos em campo, como a vazão do rio e ventos. Essa análise vai ao encontro de inúmeros estudos recentes que mostram que o sensoriamento remoto é uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar e monitorar a descarga e a evolução de uma pluma no ambiente costeiro (WALKER *et al.*, 2005; THOMAS & WEATHERBEE, 2006; LIHAN *et al.*, 2008). O monitoramento das plumas fluviais é importante devido ao transporte de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica, além do potencial transporte de contaminantes e conseqüente impacto negativo na qualidade da água e ecologia das regiões costeiras (ALBER, 2002). Entretanto o estudo apresentou algumas limitações devido a algumas restrições impostas pela metodologia utilizada, como será discutido abaixo.

6.2.1 Imagens de satélite

A utilização da diferença na coloração da água causada principalmente pela presença de sedimentos em suspensão como um “marcador” para identificar a pluma do rio Doce pode ter gerado algumas imprecisões na delimitação da área da pluma nas imagens de satélite obtidas em vazão baixa. Como já mencionado, nessas situações as plumas apresentaram tamanho muito reduzido devido à

presença de águas com número digital médio de pixel muito semelhante ou até mesmo superior às águas na desembocadura do rio Doce. Entretanto, um estudo de campo para delimitação da pluma com a realização de perfis de salinidade não permitiria a análise sinóptica da mesma, e métodos muito semelhantes ao presente foram utilizados com sucesso por diversos autores (WALKER, et al., 2005; THOMAS & WEATHERBEE, 2006; LIHAN *et al.*, 2008). A Tabela 14 apresenta uma síntese de vantagens e desvantagens na utilização dos satélites Landsat e CBERS.

Tabela 14: Vantagens e desvantagens na utilização dos satélites Landsat e CBERS para a análise da pluma do rio Doce

Vantagens	Desvantagens
Média resolução espacial	Baixa resolução temporal
Série histórico considerável	Baixa disponibilidade de imagens em vazões altas
Imagens gratuitas	Aplicações aquáticas
Facilidade de aquisição	-

A média resolução espacial (20 m para os CBERS e 30 m para os Landsat) favoreceu a identificação da pluma do rio Doce, e sua análise possivelmente seria limitada caso fosse utilizado imageamento de satélite com baixa resolução espacial, como o SeaWifs (1,1 km). A série histórica considerável, a gratuidade e facilidade de aquisição das imagens Landsat e CBERS tornam muito atraente e vantajosa a utilização desses satélites.

No entanto, a baixa resolução temporal (16 dias para o Landsat e 26 dias para o CBERS) foi um importante fator limitante dos resultados obtidos. Tal característica dificultou análises mais abrangentes acerca da dinâmica espaço-temporal da pluma do rio. Dessa forma, não foi possível acompanhar o comportamento seqüencial das plumas nas imagens, já que na maioria dos casos as análises realizadas utilizaram apenas uma imagem de satélite – uma “fotografia” do ambiente em um dado

momento. A baixa resolução temporal também limitou muito o total disponível de imagens em condições adequadas para as análises, principalmente nos períodos de vazão alta (final da primavera ao início do outono). Nesses períodos a região apresenta cobertura de nuvens muito superior ao inverno, o que impossibilitou a análise de diversas imagens disponíveis. No entanto, com as cinco imagens utilizadas foi possível realizar uma caracterização satisfatória da pluma nos períodos de vazão alta.

Também é interessante ressaltar que esses satélites não possuem a mesma resolução espectral de sensores desenvolvidos para aplicações aquáticas, caso dos sensores SeaWiifs MERIS e Aqua MODIS, por exemplo. A título de comparação, o sensor MODIS apresenta 9 bandas na faixa entre 400 e 900 nm (NASA, 2011) – região que concentra a maior parte dos estudos oceanográficos (NOVO, 2008) – contra apenas 4 bandas dos sensores TM e ETM+ dos Landsat e CCD dos CBER's. A maior quantidade de bandas nessas regiões e suas “janelas espectrais” mais estreitas possibilitam investigar características específicas dos oceanos (e.g., turbidez, sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e clorofila) com maior precisão em relação aos sensores utilizados nesse estudo.

6.2.2 Processamento das imagens de satélite

As classificações supervisionadas foram eficientes em delimitar o núcleo da pluma do rio Doce principalmente em imagens com vazão média a alta e não detectaram as regiões periféricas da mesma. Dessa forma, apesar de ter sido computada uma extensão offshore máxima da ordem de 10 km, em algumas imagens se verifica que claramente a influência do deságüe do rio na turbidez das águas oceânicas foi muito superior, chegando a mais de 30 km na imagem de 11/04/06. Essa restrição no tamanho das plumas foi ocasionada pela banda 3 (630 - 690 nm) dos satélites Landsat e CBERS, que se concentra nos comprimentos de onda do vermelho, e apresenta menor penetração em corpos d'água em relação à banda 2 (520 – 590/600 nm), concentrada nos comprimentos de onda do verde (NASA, 2008).

Os resultados obtidos para as áreas da pluma do rio Doce diferem significativamente dos apresentados por Zofolli *et al.*, (2011). Em imagens de vazão baixa esses autores obtiveram uma área média de pluma de 47,6 km². Já nas imagens em vazão alta a área média foi de 81,7 km². Esses valores mostram discrepância com os valores obtidos no presente estudo que muito provavelmente foram resultantes de uma classificação supervisionada realizada com polígonos de treinamento para as águas da pluma englobando áreas mais a offshore da desembocadura, o que resultou em áreas mais amplas que incorporaram regiões periféricas da pluma. Os critérios de avaliação das classificações também foram menos específicos do que o presente estudo, visto que toda a região de águas rasas ao norte da desembocadura foi classificada como pluma em período de vazão baixa. No presente estudo foi constatado que a origem dessa turbidez nesses períodos está principalmente relacionada com a ressuspensão de sedimentos na plataforma continental e não com a pluma do rio.

6.3 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Apesar da contribuição deixada pelo presente estudo, ainda restam algumas questões a serem aprofundadas a fim de se conhecer completamente a dinâmica da pluma do rio Doce e sua inter-relação com os fatores vazão, vento, maré e circulação oceânica. Desse modo, abaixo seguem algumas sugestões de estudos futuros.

- Realizar perfis de salinidade na coluna d'água ao longo de transectos na região estuarina e oceânica tendo como base os padrões de dispersão de plumas observados nesse estudo, visando a perfilagem vertical dos parâmetros salinidade e temperatura e opcionalmente turbidez, material em suspensão, clorofila *a*, nutrientes totais e dissolvidos. Sugere-se que essas amostragens sejam realizadas em pelo menos três períodos do ano (vazão baixa, média e alta), a fim de investigar as características e variações na estrutura termo-halina da pluma nas diferentes situações de descarga fluvial;

- Realizar modelagem hidrodinâmica em modelo 3D para analisar de forma objetiva a variabilidade espaço-temporal da pluma do rio Doce, preferencialmente em modelo

tridimensional. Nessa modelagem, vazão, vento, largura e orientação da desembocadura, maré e estrutura termo-halina poderiam ser investigados separadamente a fim de se determinar a influência relativa de cada variável na variabilidade da pluma, assim como realizado por Kourafalou (1996), Garvine (1999), Hetland (2005) e Huq (2009). Os resultados obtidos nas modelagens poderiam ser confrontados com imagens de satélite e dados de campo (vazão, vento, correntes) para validação dos resultados obtidos;

- Avaliar a viabilidade de utilização de sensores com maior resolução temporal como SeaWifs, MODIS e MERIS para mapear com maior frequência a variabilidade da pluma;

7. CONCLUSÕES

- A vazão do rio Doce é a principal forçante que controla a área do núcleo da pluma fluvial, porém a área não é diretamente proporcional a vazão, pois outros fatores, como o vento, também influenciam na dimensão da área;
- O vento atua principalmente no espalhamento das regiões periféricas da pluma, sendo efetivo mesmo em baixas velocidades;
- De maneira geral, ventos provenientes do quadrante sul limitam o espalhamento rumo ao sul da pluma, enquanto ventos do quadrante norte auxiliam no espalhamento da pluma rumo a sul, sendo que essa dinâmica pode ser mais ou menos intensa dependendo da vazão fluvial e constância e intensidade do vento;
- Evidências da estrutura termohalina vertical da coluna d'água indicam que a pluma fluvial se espalha no ambiente costeiro em uma fina camada superficial sobre a água oceânica;
- Foram descritos cinco padrões de distribuição superficial de plumas: os padrões (1) sem padrão de dispersão comum e (2) sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura - são típicos dos meses de baixa vazão (outono-inverno), sendo que o padrão (2) só ocorreu na presença de ventos constantes de N-NO com intensidades superiores a 5 m/s;
- O padrão de distribuição (3) - protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura - é muito semelhante a uma pluma fluvial com espalhamento superficial descrita em inúmeros estudos, sendo que algumas evidências também colaboram para essa consideração. Esse padrão ocorreu em vazões médias e altas e em diversas situações de vento;
- As observações realizadas indicam uma tendência das vazões mais altas em apresentar o padrão de distribuição (4) dispersão radial a partir da desembocadura. O padrão (5) - deslocada para o norte com pequena ou

nenhuma dispersão para o sul da desembocadura – foi observado em vazões baixas e médias com ventos de S-SE fortes e constantes.

- A metodologia utilizada na delimitação das plumas (classificação supervisionada das bandas 1, 2 e 3 das imagens Landsat TM/ETM e CBERS CCD foi eficiente na detecção do núcleo da pluma em imagens com vazões médias a altas;
- Devido a limitações impostas pela resolução temporal das imagens de satélite, disponibilidade de imagens correlacionadas com dados de vento e para comprovar os resultados obtidos, sugere-se a realização de estudos complementares, tais como: amostragens em campo, modelagem hidrodinâmica e avaliação da utilização de sensores com maior resolução temporal.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA TÉCNICA BACIA DO RIO DOCE. Plano Operacional 1998/99, 1998.

ALBER, M. A Conceptual Model of Estuarine Freshwater Inflow Management. **Estuaries**, v. 25, n. 06, p. 1246-1261, 2002.

ALBINO, J. **Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga a Povoação, ES**. 1999. Tese de doutoramento - Programa de Pós Graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ALBINO, J.; PAIVA, D. S.; MACHADO, G. M. V. Geomorfologia, tipologia, vulnerabilidade erosiva e ocupação urbana das praias do litoral do Espírito Santo, Brasil. **Geografares**, v. 02, p. 63-70, 2001.

ANA. Agência Nacional das Águas (2010). Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em 20 dez. 2010.

ASA. **Cenários de acidentes com petróleo no Terminal de Regência (ES)**. 2003.

AVICOLA, G.; HUQ, P. The characteristics of the recirculating bulge region in coastal buoyant outflows. **Journal of Marine Research**, v. 61, p. 435–463, 2003a.

AVICOLA, G.; HUQ, P. The role of outflow geometry in the formation of the recirculating bulge region in coastal buoyant outflows. **Journal of Marine Research**, v.61, p. 411–434, 2003b.

BANDEIRA Jr., A. N.; PETRI, S.; SUGUIO, K. **Projeto Rio Doce (Relatório Final)**.. Rio de Janeiro. Petrobrás/Cenpes. 203p. 1975.

BERDEAL, I. G.; HICKEY, B. M.; KAWASE, M. Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 09, p. 1-24, 2002.

BILLEN, G.; GARNIER, J. The Phison River plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 13, p. 3-17, 1997.

CABRAL, A. P.; MANTOVANI, J. E.; COSTA, M. P. F.; LIMA, R. A. F.; NOVO, E. M. M. L. Efeitos da Concentração e da Granulometria na assinatura espectral do material inorgânico em suspensão. **Anais do 6º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Manaus, 1990.

CABRAL, J. B. P. Utilização de técnicas de segmentação e correlação de spearman em imagens TM para o estudo da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório de barra bonita – São Paulo-Brasil. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, v. 03, p. 235-267, 2003.

CASTRO FILHO, B. M.; MIRANDA, L. B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4N and 34S. In: Robinson, A.R. and Brink, K.H., (eds), **The Sea**. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., v. 11, p. 209-251, 1998.

CHAO, S.; BOICOURT, W. C. Onset of estuarine plumes. **Journal of Physical Oceanography**, v. 16, p. 2137-2149, 1986.

CHAO, S. River-forced Estuarine Plumes. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 72-88, 1988.

CHAPMAN, D. C.; LENTZ, S. J. Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer. **Journal of Physical Oceanography**, v. 24, p. 1464-1479, 1994.

CHOI, B. J.; WILKIN, J. L. The effect of wind on the dispersal of the Hudson River plume, **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, p. 1878-1897, 2006.

CIRANO, M.; MATA, M. M.; CAMPOS, E. J. D.; N. F. R, DEIRÓ. A circulação oceânica de larga escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 209-230, 2006.

COCCOSSIS, H. Integrated Coastal Management and River Basin Management. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 4, p. 411-419, 2004.

COELHO, A. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce / ES**. 2007. 247 f. Tese de Doutorado - Departamento de Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

COUTINHO, J. M. V. Os minerais pesados de areia na foz do rio Doce. **Anais XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia**, 1974, v. 5, p. 61-77.

CROSSLAND, C. J.; BAIRD, D.; DUCROTOY, J. P.; LINDEBOOM, H. J. The coastal zone: a domain of global interactions. In: CROSSLAND, C. J.; KREMER, H. H.; LINDEBOOM, H. J.; MARSHALL, J. I.; MARSHALL-CROSSLAND, J. J.; TISSIER, M. D. A. **Coastal fluxes in the Anthropocene**. Berlin, Springer: 1-37, 2005.

CUPOLILLO, F. **Diagnóstico Hidroclimático da Bacia do Rio Doce**. 2008. 156 f. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

DORAXAN, D.; FROIDEFONG, J. M.; LAVENDER, S.; CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 149-161, 2002.

EASTMAN, J. R. **Guide to GIS and Image Processing**. Clark University, Worcester, 2006.

EPE. **Termo de Referência para o estudo: Avaliação ambiental integrada dos aproveitamentos hidrelétricos na bacia do rio Doce.** Empresa de Pesquisa Energética. 2005.

EPE. **Avaliação ambiental integrada dos aproveitamentos hidrelétricos na bacia do rio Doce.** Relatório Técnico. Empresa de Pesquisa Energética. 2009.

ESA. European Space Agency. Disponível em: <http://www.esa.int/esaLP/ESAL3B2VMOC_LPsmos_0.html>. Acesso em 12 abr. 2011.

FEMAR. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro, 281p. 2000.

FONG, D. A.; GEYER, W. R. The Alongshore Transport of Freshwater in a Surface-Trapped River Plume. **Journal of Physical Oceanography**, v. 32, p. 957-972, 2002.

GARVINE, R.W. The Distribution of Salinity and Temperature in the Connecticut River Estuary. **Journal of Geophysical Research**. v. 80, p. 1176-1183, 1975.

GARVINE, R. W. Penetration of Buoyant Coastal Discharge onto the Continental Shelf: A Numerical Model Experiment. **Journal of Physical Oceanography**, v. 29, p. 1892-1909, 1999.

HALVERSON, M. J.; PAWLOWICZ, R. Estuarine forcing of a river plume by river flow and tides, **Journal of Geophysical Research**. v. 113, c09033, doi:10.1029/2008JC004844, 2008.

HETLAND, R. D. Relating river plume structure to vertical mixing. **Journal of Physical Oceanography**, v. 35, p. 1667-1688, 2005.

HORNER-DERVINE, A, R.; FONG, D. A.; MONISMITH, S. G.; MAXWORTHY, T. Laboratory experiments simulating a coastal river inflow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 555, p. 203-232, 2006.

HUQ, P. The Role of Kelvin Number on Bulge Formation from Estuarine Buoyant Outflows. **Estuaries and Coasts**, v. 32, p. 709-719, 2009.

ISOBE, A.. Ballooning of River-Plume Bulge and its stabilization by tidal currents. **Journal of Physical Oceanography**, v. 35, p. 2337–2351, 2005.

ISOGUCHI, O.; SHIMADA, M.; SAKAIDA, F.; KAWAMURA, H. Investigation of Kuroshio-induced cold-core eddy trains in the lee of the Izu Islands using high-resolution satellite images and numerical simulations. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1912-1925, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KAYA, S.; SEKER, D. Z.; KABDASLI, S.; MUSAOGLU, N.; YUASA, A.; SHRESTHA, M. B. Monitoring turbid freshwater plume characteristics by means of remotely sensed data. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 2429-2440, 2006.

KOURAFALOU, V. H.; OEY, L.; WANG, J. D.; LEE, T. N. The fate of river discharge on the continental shelf 1. Modeling the river plume and the inner shelf coastal current. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. c2, p. 3415-3434, 1996.

LAHET, STRAMSKI. MODIS imagery of turbid plumes in San Diego coastal waters during rainstorm events. *Remote Sensing of Environment*, 114, 332-344, 2010.

LIHAN, T.; SAITOH, S. I.; IIDA, T.; HIRAWAKE, T.; IIDA, K. Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 78, p. 237-249, 2008.

LIU, Y.; ISLAM, M. A.; GAO, J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 24-43, 2003.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. The potential for remote sensing of loess soil suspended in surface Waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, p. 111-117, 1997.

LORENZZETTI, J. A.; NEGRI, E.; KNOPERS, B.; MEDEIROS, P. R. P. Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, 2007, p. 3429-3436.

LUCAS, L. V. **Implications of estuarine transport for water quality**. In: LEVINSON, A. V. *Contemporary issues in estuarine physics*. New York: Cambridge University press, 2010.

M2 Consultoria e Serviços. **Capacidade de Suporte do Bota-fora da dragagem da Baía de Vitória**. Vitória, 2010.

MARANGONI, M. B. **Análise morfo-sedimentar da plataforma continental do Espírito Santo**. 2009. 82 f. Monografia - Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J-M.; ARCHANJO, D. Coastal Quaternary formations of the state of Espírito Santo, (Brazil). **Anais Academia Brasileira Ciências**, v. 68, n. 3, p. 389-404, 1996a.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J-M.; ARCHANJO, D.; BITTENCOURT, A. C. S. P. Quaternary sea-level history and variation in dynamics along the Central Brazilian coast: consequences on coastal plain construction. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, n. 3, p. 303-354, 1996b.

MCLUSKY, D. S.; ELLIOTT, M. Transitional waters: A new approach, semantics or just muddying the waters? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 71, p. 359-363, 2007.

MOLLERI, G. S. F.; KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J.; FONSECA, L. M. G. Comparação entre as respostas espectrais dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 para o monitoramento do material em suspensão na Foz do Rio Amazonas. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, 2007, p. 977-984.

MOREY, S. L., DUKHOVSKOY, D. S., BOURASSA, M. A. Connectivity of the Apalachicola River flow variability and the physical and bio-optical oceanic properties of the northern West Florida Shelf. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 1264-1275, 2009.

MORRIS, A. W.; ALLEN, J. I.; HOWLAND, R. J. M.; WOOD, R. G. The Estuary Plume Zone: Source or Sink for Land-derived Nutrient Discharges? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 40, p. 387-402, 1995.

MOURA, I. L. **Influência do Transporte de volume na passagem de Drake na dinâmica da Corrente do Brasil**. 2008. 84 f. Monografia - Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

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

NASA. Science Data Users Handbook. 2008. Disponível em: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter1/chapter1.html>. Acesso em 5 out. 2009.

NASA. Modis Web, 2011. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em 10 abr. 2011.

NEZLIN, N. P.; DIGIACOMO, P. M. Satellite ocean color observations of stormwater runoff plumes along the San Pedro Shelf (southern California) during 1997–2003. **Continental Shelf Research**, v. 25, p. 1692-1711, 2005.

NEZLIN, N. P.; WEISBERG, S. B.; DIEHL, D. W. Relative availability of satellite imagery and ship-based sampling for assessment of stormwater runoff plumes in coastal southern California. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 71, p. 250-258, 2007.

NICOLODI, J. L.; ZAMBONI, A.; BARROSO, G. F. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, 2009.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2 ed, Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 360 p. 2008.

PECKHAN, S. D. A new method for estimating suspended sediment concentrations and deposition rates from satellite imagery based on the physics of plumes. **Computers and Geosciences**, v. 34, p. 1198-1222, 2008.

PEDRUZZI, C. V. **Simulação computacional da pluma do rio Doce, região costeira norte do Espírito Santo**. Dissertação de Mestrado (em desenvolvimento). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

PETROBRAS. **Modelagem de vazamento de condensado a partir do gasoduto do campo de Camarupim**, Bacia do Espírito Santo. Revisão 00, 2006.

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

PIUMBINI, P. P. **Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos do Espírito Santo**. 2009. 110 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

REIS, R. S.; NOVO, E. M. L. M. M.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; SEVERI, W. Uso de imagens Landsat e dados de campo para avaliar a distribuição espacial de material em suspensão em Reservatórios do semi-árido brasileiro. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, 2003, p. 2569–2577.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

SCHMID, C.; SCHAFFER H.; PODESTÁ G.; ZENK W.. The Vitoria Eddy and Its Relation to the Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**. v. 25, p. 2532-2546, 1995.

SILVEIRA, J. D. **Morfologia do litoral**. In: Azevedo, A. Brasil: a Terra e o Homem. São Paulo: Cia Ed Nacional, p. 253-305, 1964.

SILVEIRA, I.C.A.S.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. The Brazil current off the eastern Brazilian coast. **Brazilian Journal of oceanography**, v. 48, p. 171-183, 2000.

SOUZA, R. B. **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; DOMINGUEZ, J. M. L. Evolução da planície costeira do Rio Doce (ES) durante o Quaternário: Influência das flutuações do nível do mar. **Atas do IV Simpósio do Quaternário no Brasil**, 1982, p. 93 – 116.

TEODORO, A. C.; VELOSO-GOMES, F.; GONÇALVES, H. Statistical Techniques for Correlating Total Suspended Matter Concentration with Seawater Reflectance Using Multispectral Satellite Data. **Journal of Coastal Research**, v. 24, p. 40-49, 2008.

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.

WALKER, N. D.; WISEMAN, W. J.; ROUSE, L. J.; BABIN, A. Effects of River Discharge, Wind Stress, and Slope Eddies on Circulation and the Satellite-Observed Structure of the Mississippi River Plume. **Journal of Coastal Research**. v. 21, n.6, p. 1228-1244, 2005.

WHITNEY, M. M.; R. W. GARVINE. Simulating a coastal buoyant outflow: Comparisons to observations. **Journal of Physical Oceanography**, v. 36, p. 3-21, 2006.

YANKOVSKY, A. E.; CHAPMAN, D. C. A Simple Theory for the Fate of Buoyant Coastal Discharges. **Journal of Physical Oceanography**, v. 27, p. 1386-1401, 1997.

ZOFFOLI, M. L.; KAMPEL, M.; FONSECA, L. M. G. Caracterização da pluma de sedimentos do rio Doce (ES) utilizando dados TM – Landsat 5. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, 2011, p. 5025-5031.

ANEXO I
RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SUPERVISIONADAS

1) Sem padrão de dispersão comum

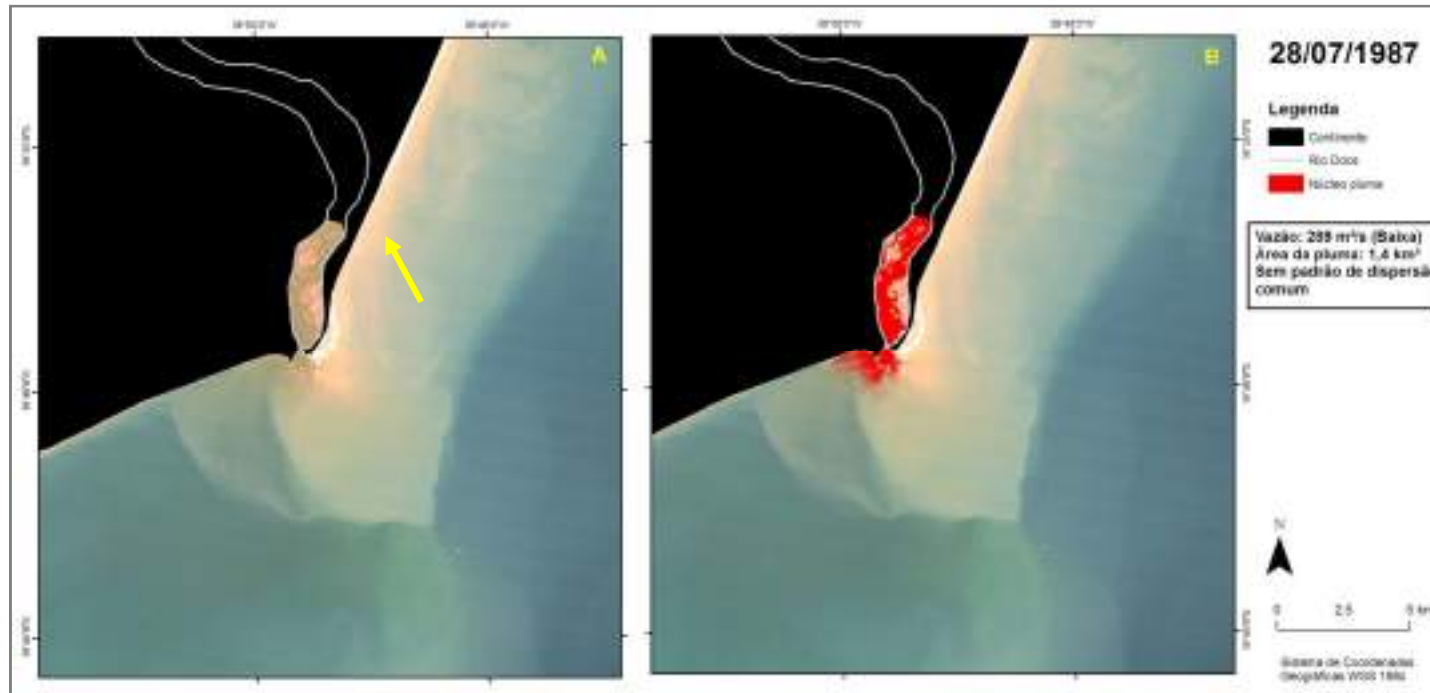


Figura 39: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 28/07/1987. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce.

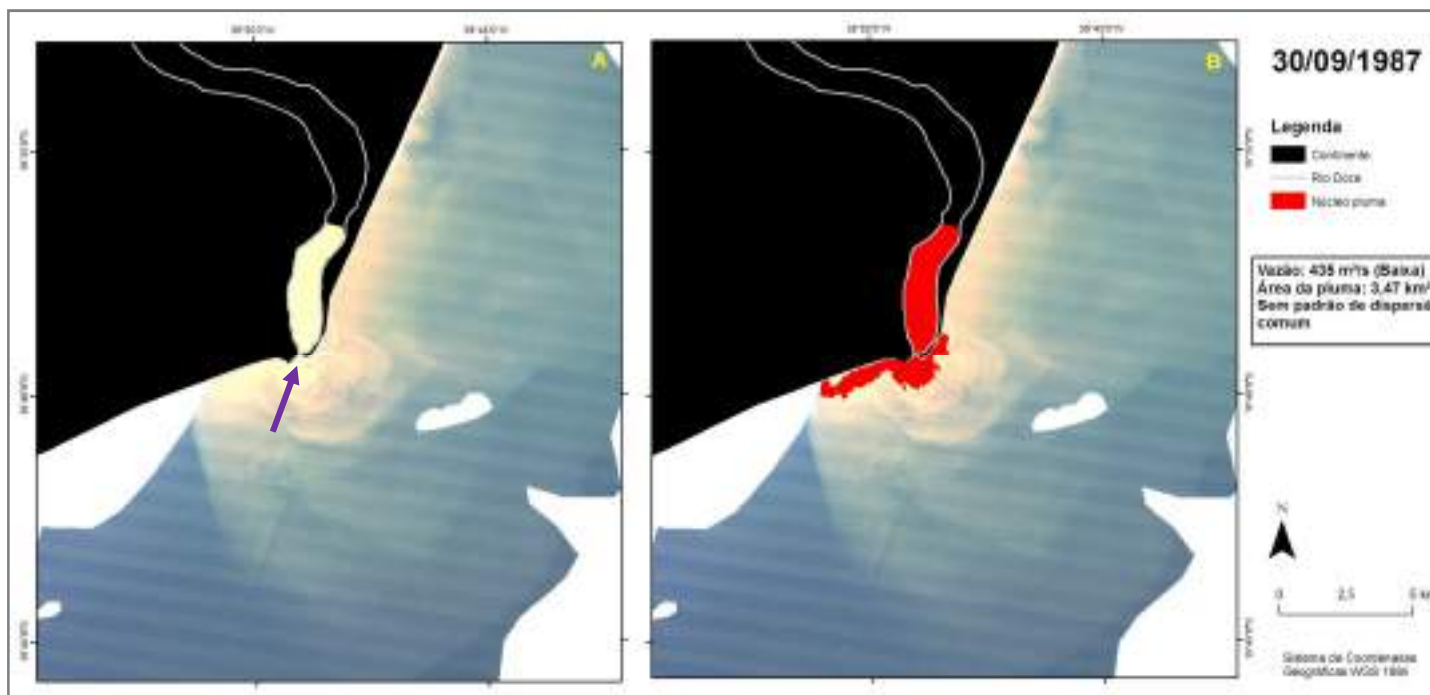


Figura 40: Resultado obtido com a classificação supervisiona da imagem Landsat TM do dia 30/09/1987. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens. Seta roxa: detalhe para morfologia da desembocadura: bem estreita e voltada para S-SE.

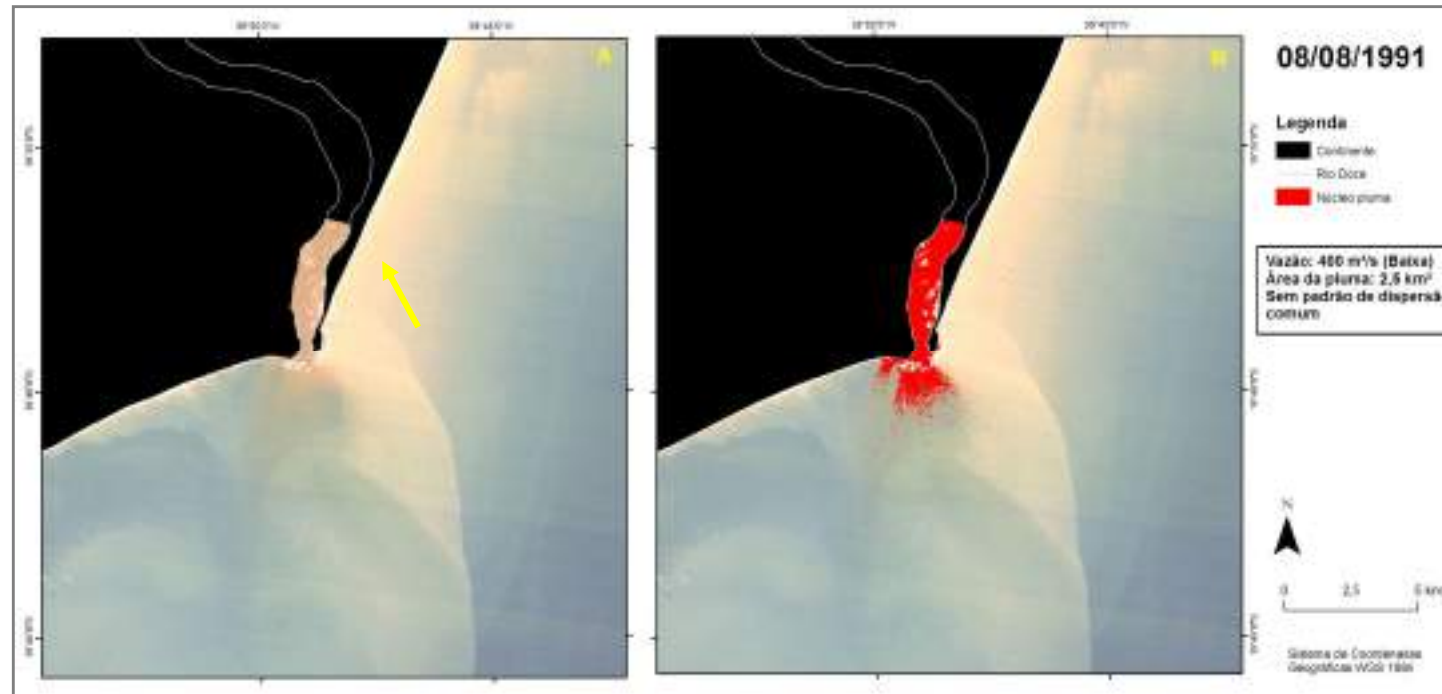


Figura 41: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 08/08/1991. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce.

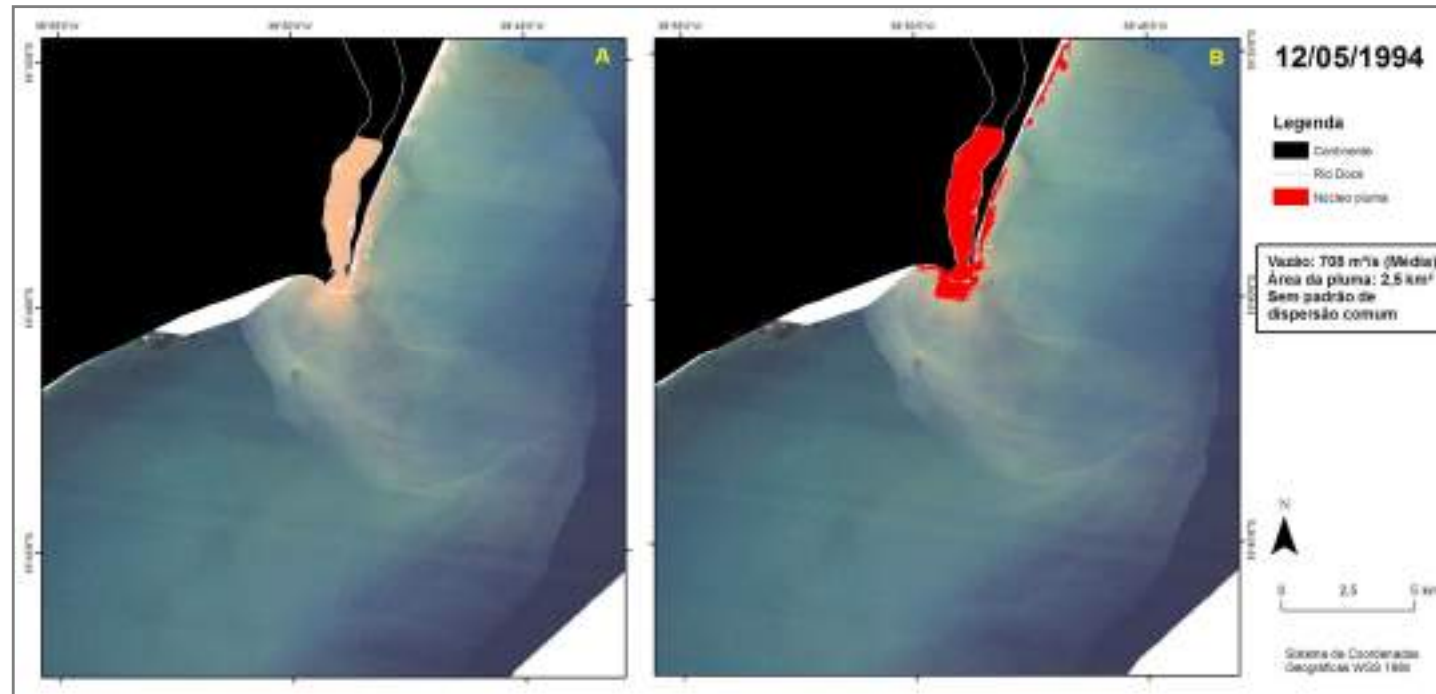


Figura 42: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 12/05/1994. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens.

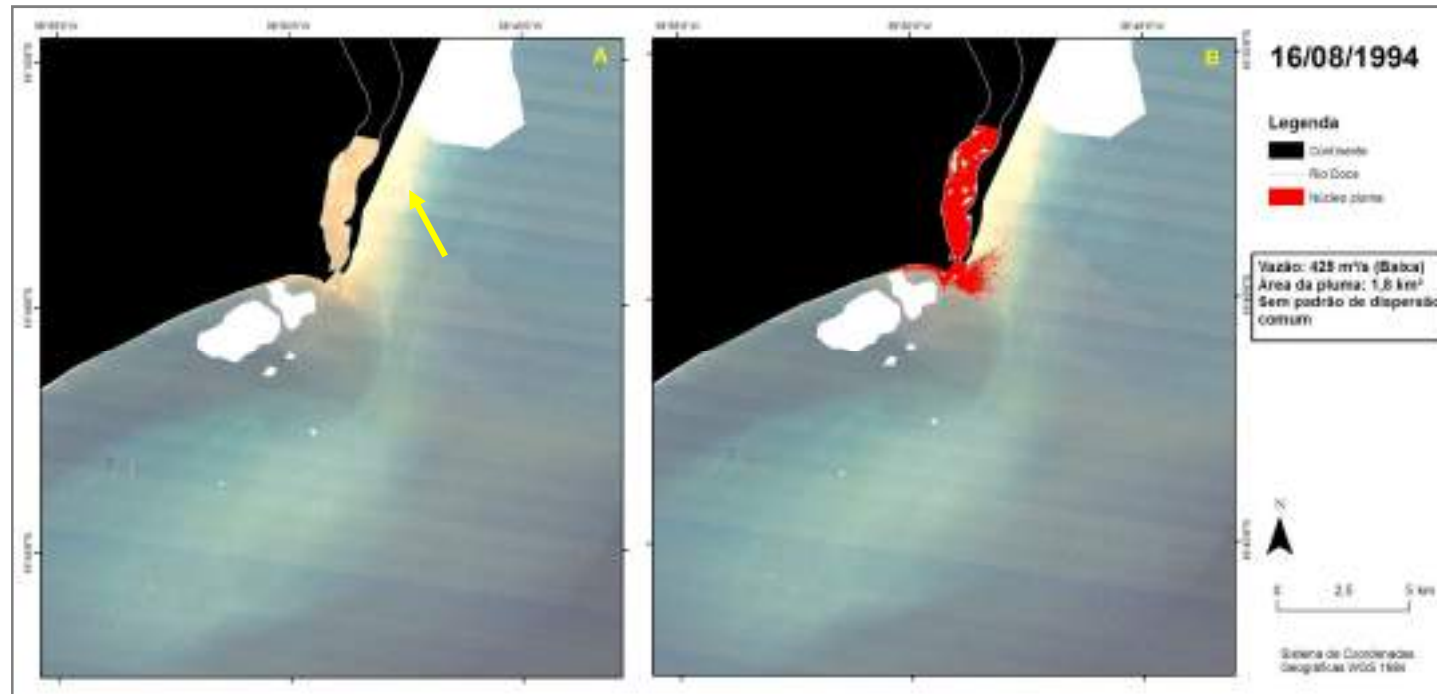


Figura 43: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 16/08/1994. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Áreas em branco são nuvens

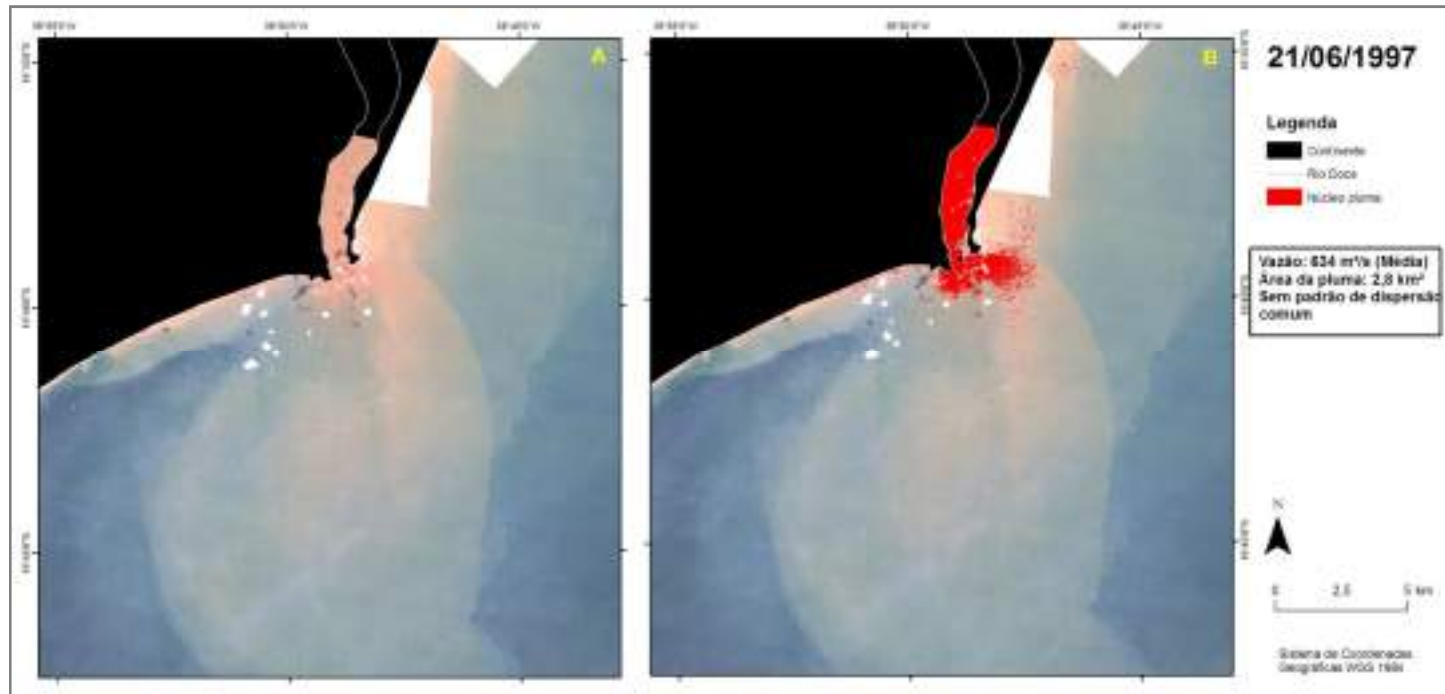


Figura 44: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 21/06/1997. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens.

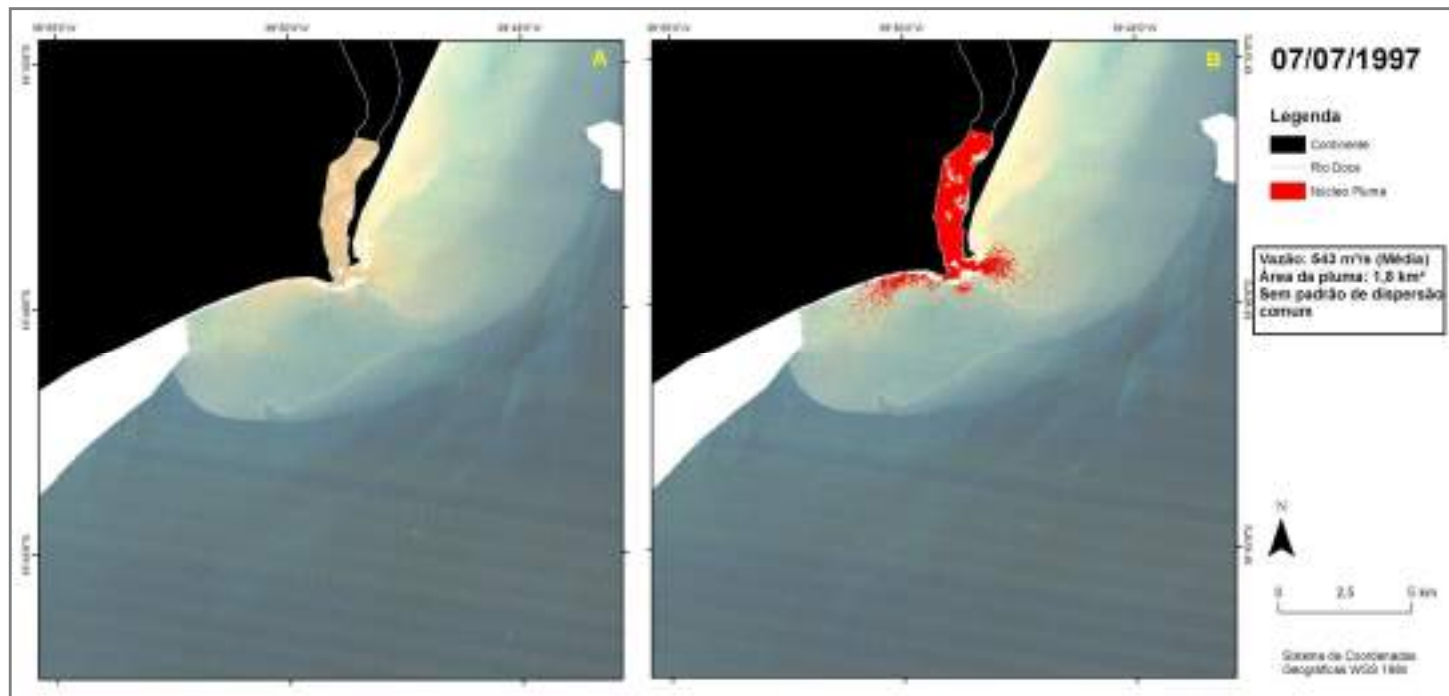


Figura 45: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 07/07/1997. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens.

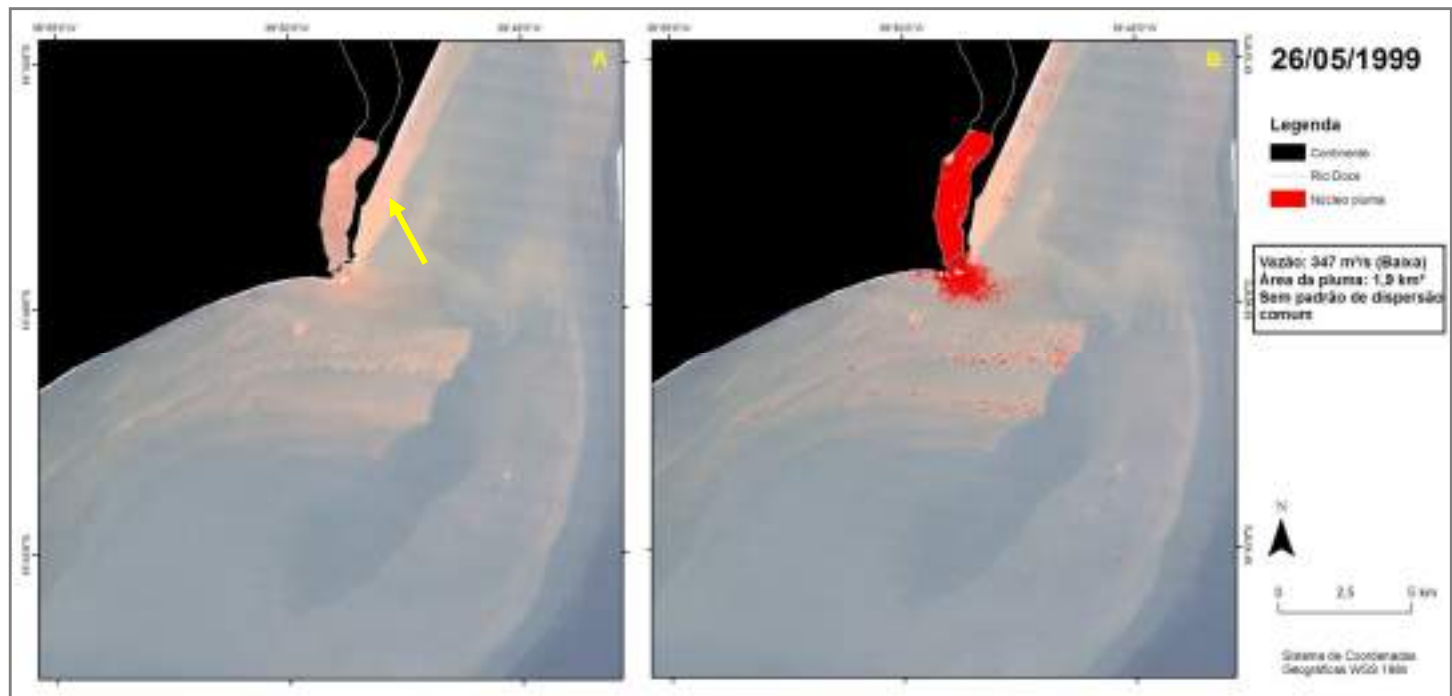


Figura 46: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 26/05/1999. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce.

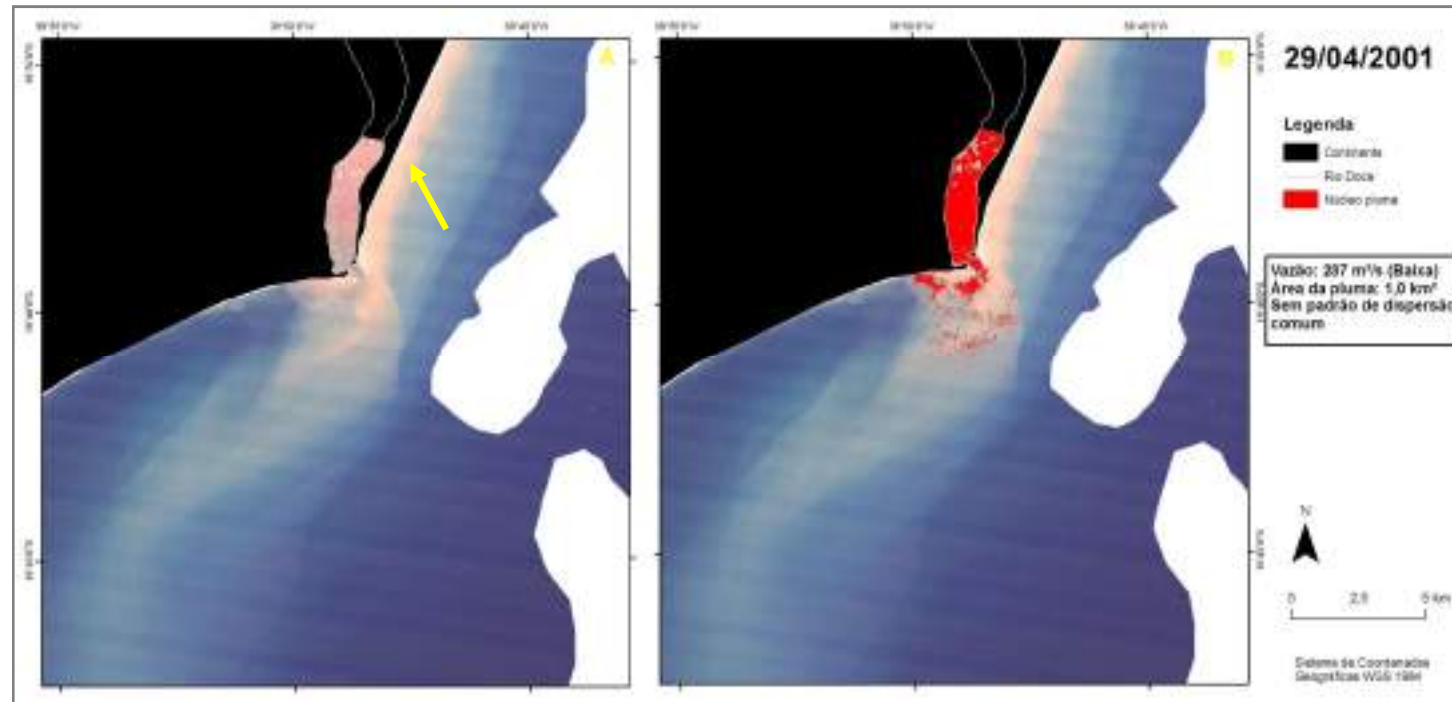


Figura 47: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 29/04/2001. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Áreas em branco são nuvens.

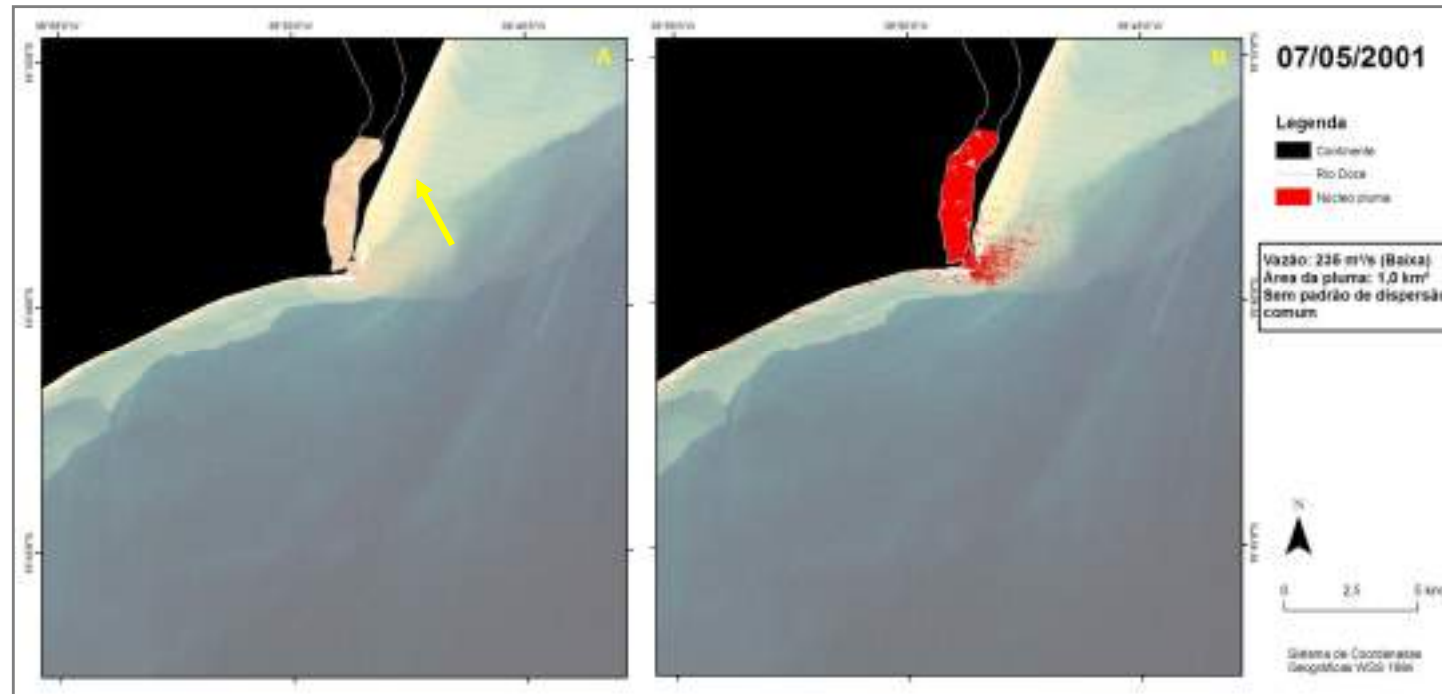


Figura 48: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat ETM do dia 07/05/2001. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce.

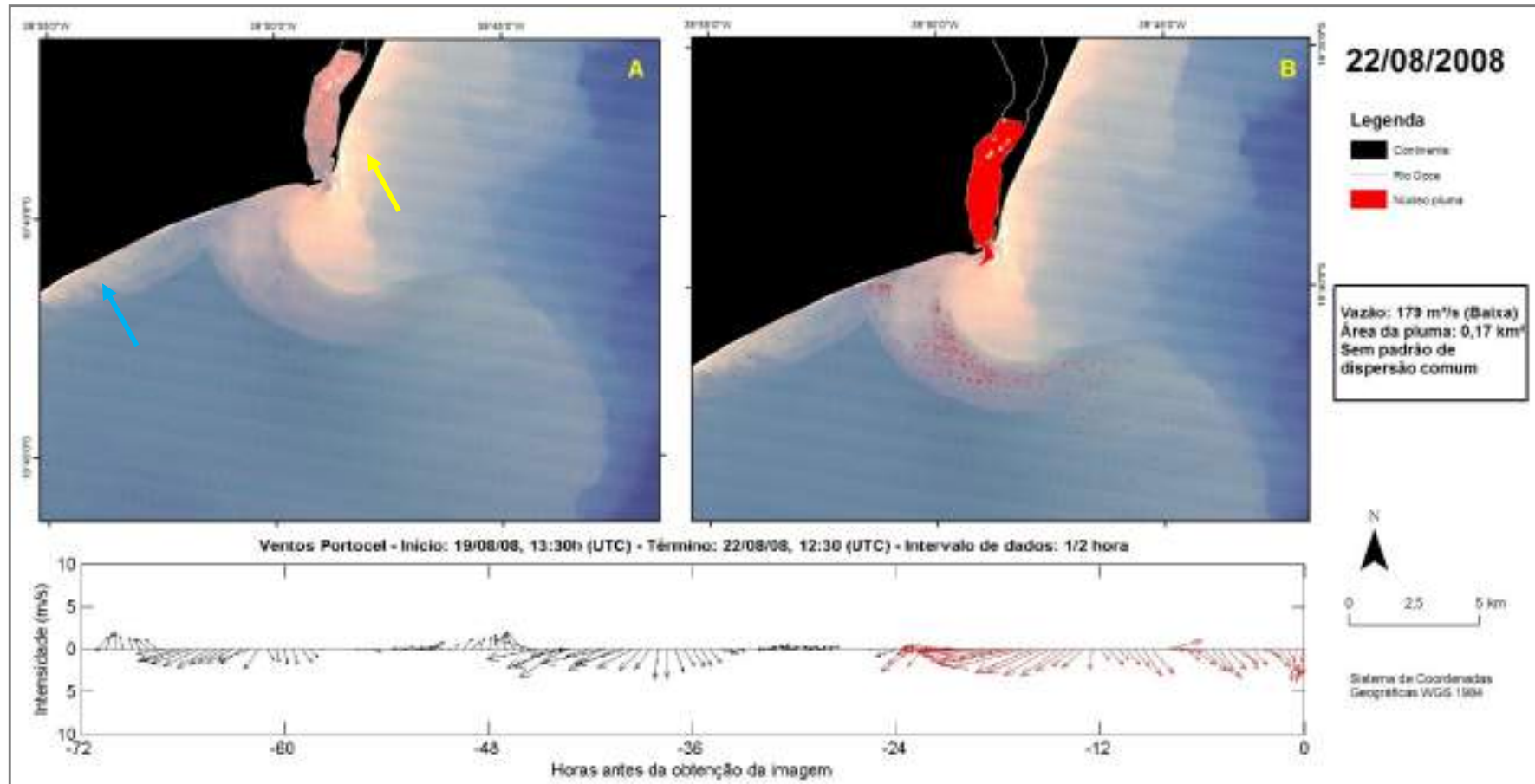


Figura 49: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 22/08/2008 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Seta azul: feições alongadas indicam influência dos ventos do quadrante Norte que estavam atuando. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

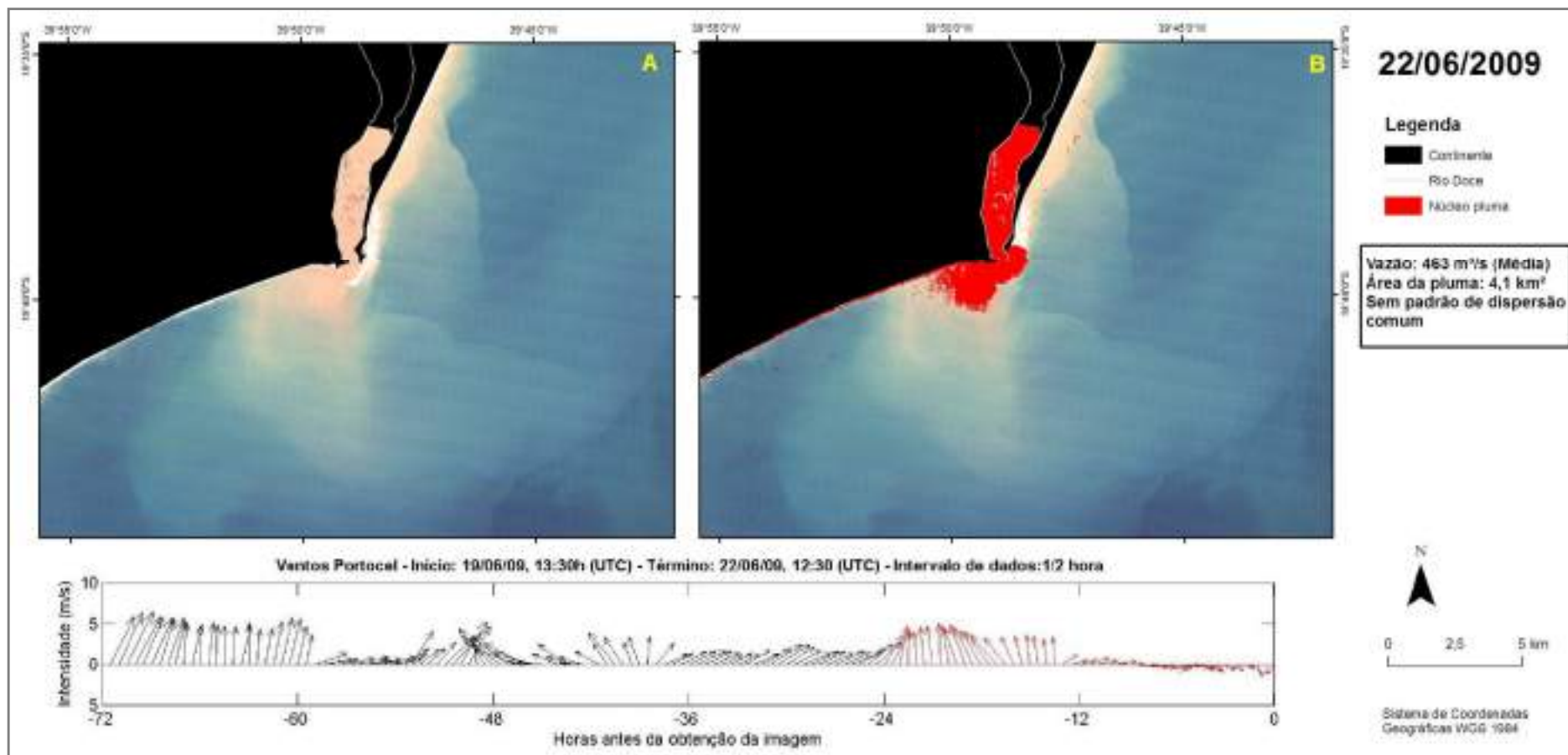


Figura 50: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 22/06/2009 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

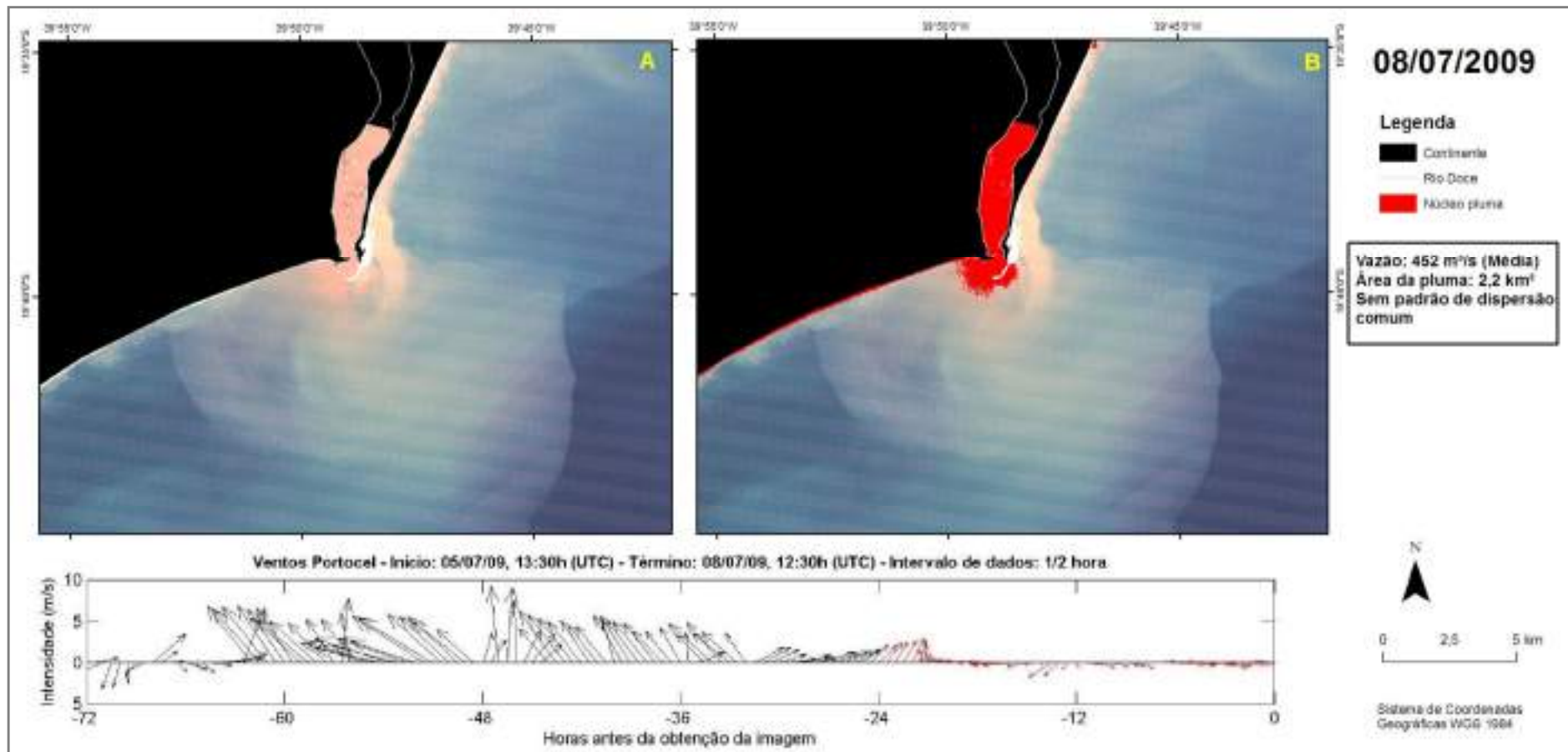


Figura 51: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 08/07/2009 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

2) Sem padrão de dispersão comum com presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura

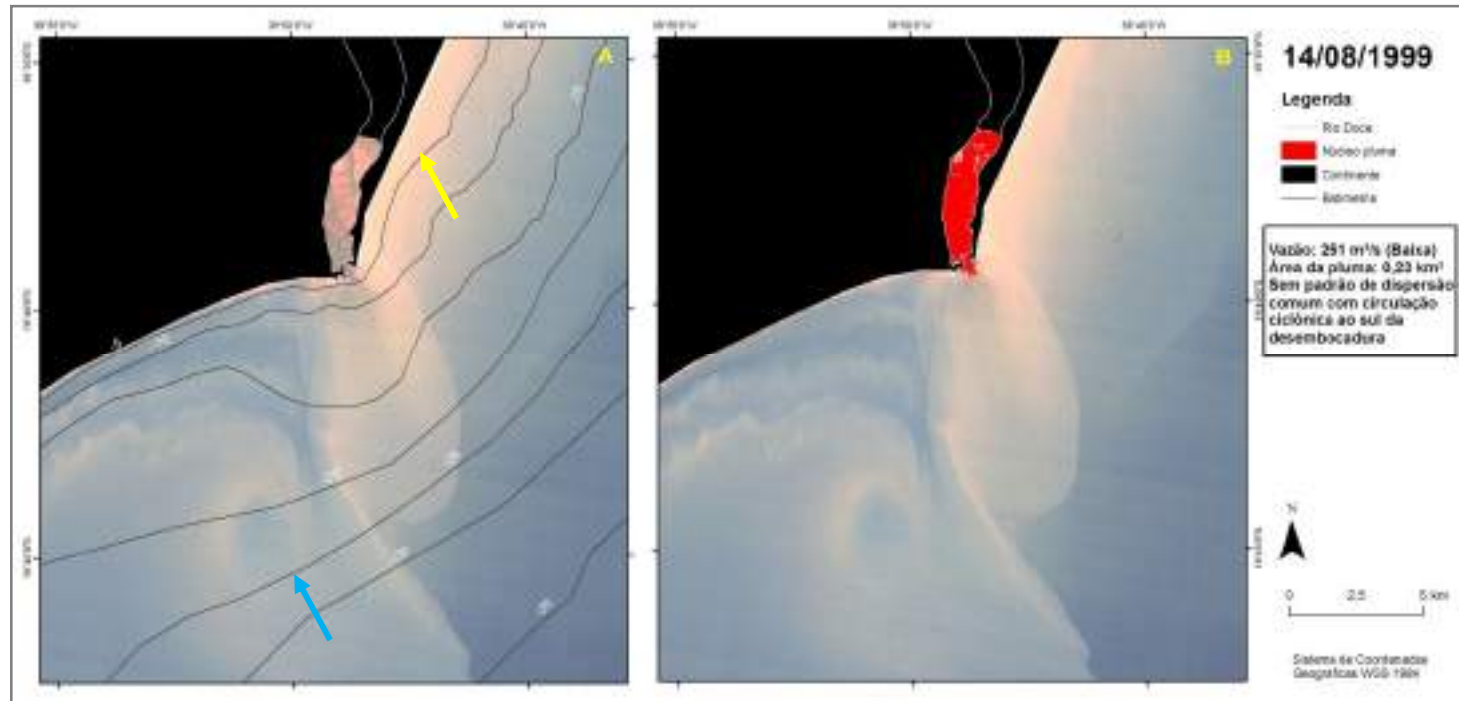


Figura 52: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 14/08/1999. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Seta azul: feição com circulação ciclônica ao sul da desembocadura.

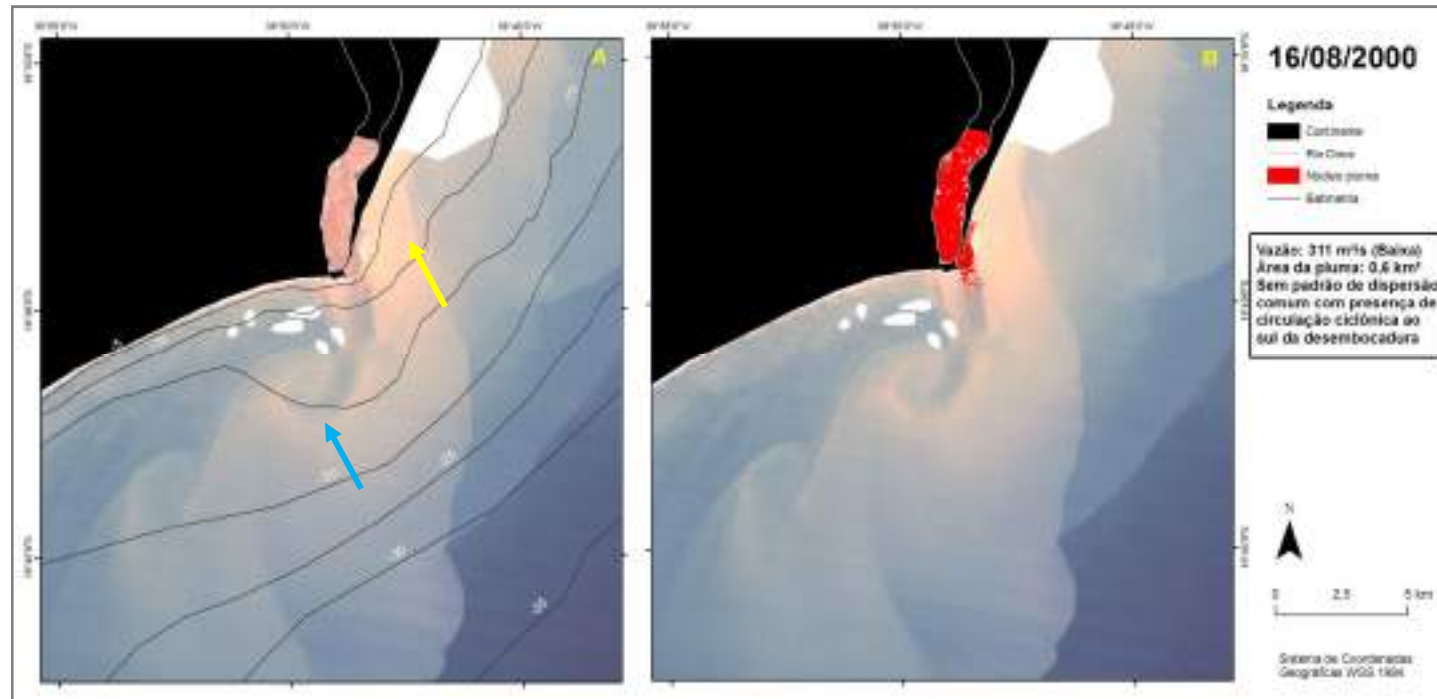


Figura 53: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 16/08/2000. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: águas na costa ao norte da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Seta azul: feição com circulação ciclônica ao sul da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

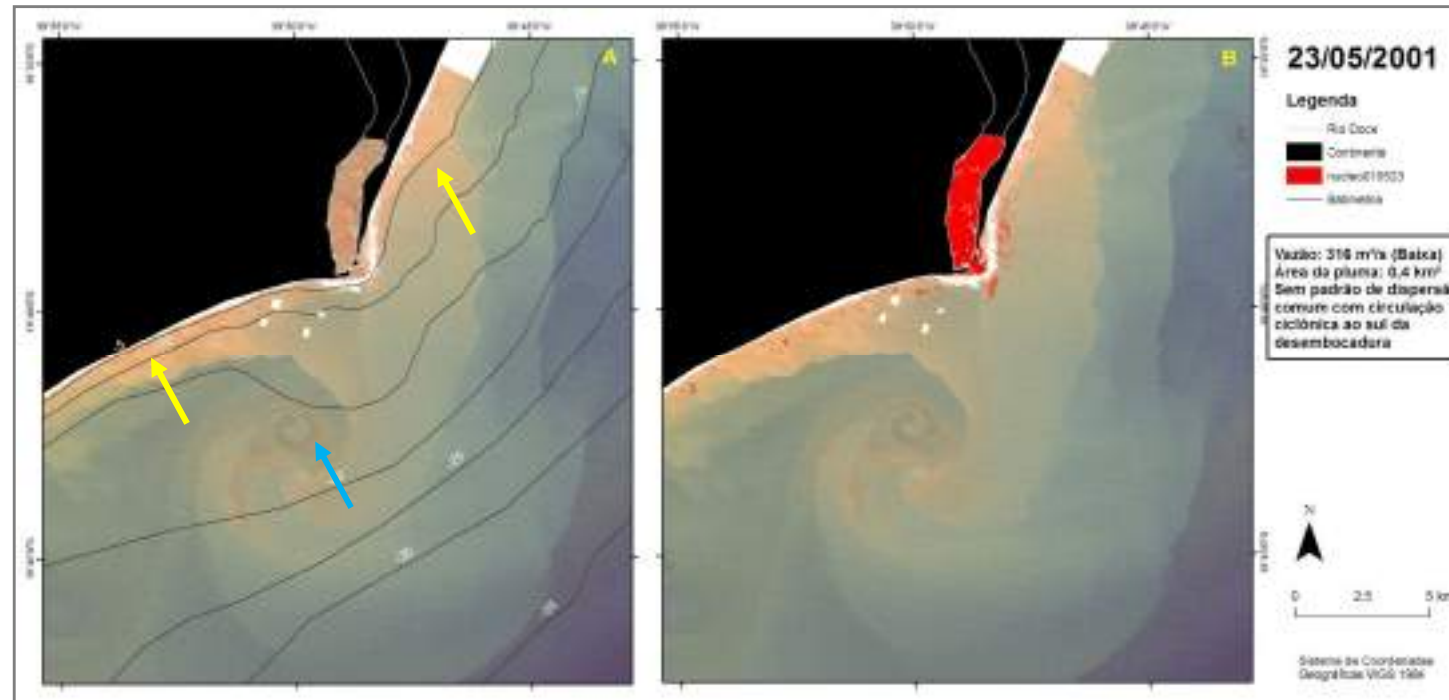


Figura 54: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat ETM do dia 23/05/2001. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Setas amarelas: águas no norte e sul da desembocadura com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Seta azul: feição com circulação ciclônica ao sul da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

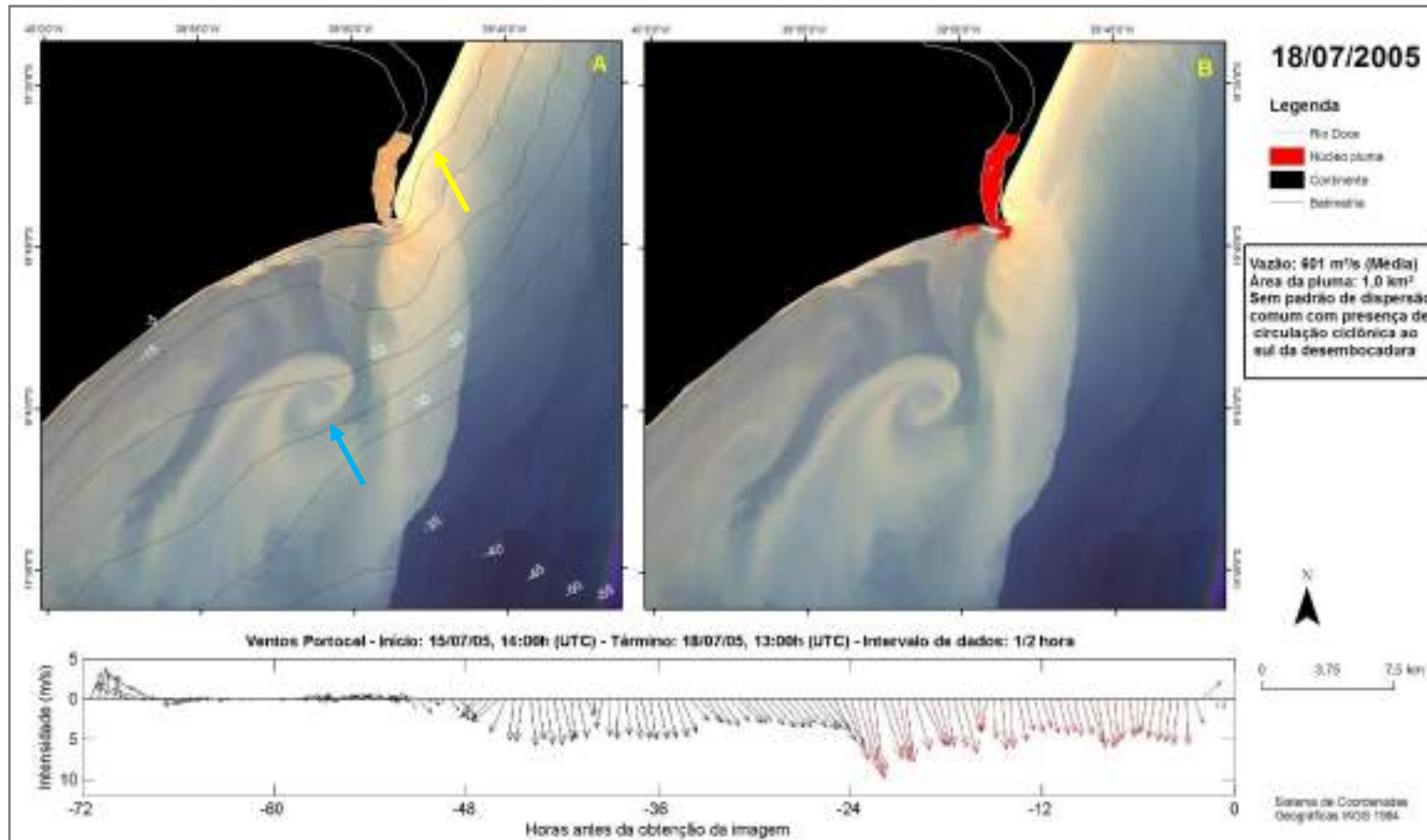


Figura 55: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 18/07/2005 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: com número digital médio de pixel superior às águas provenientes do rio Doce. Seta azul: feição com circulação ciclônica ao sul da desembocadura. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

3) Protuberância circular orientada entre SE e S / fluxo anexo para o norte da desembocadura

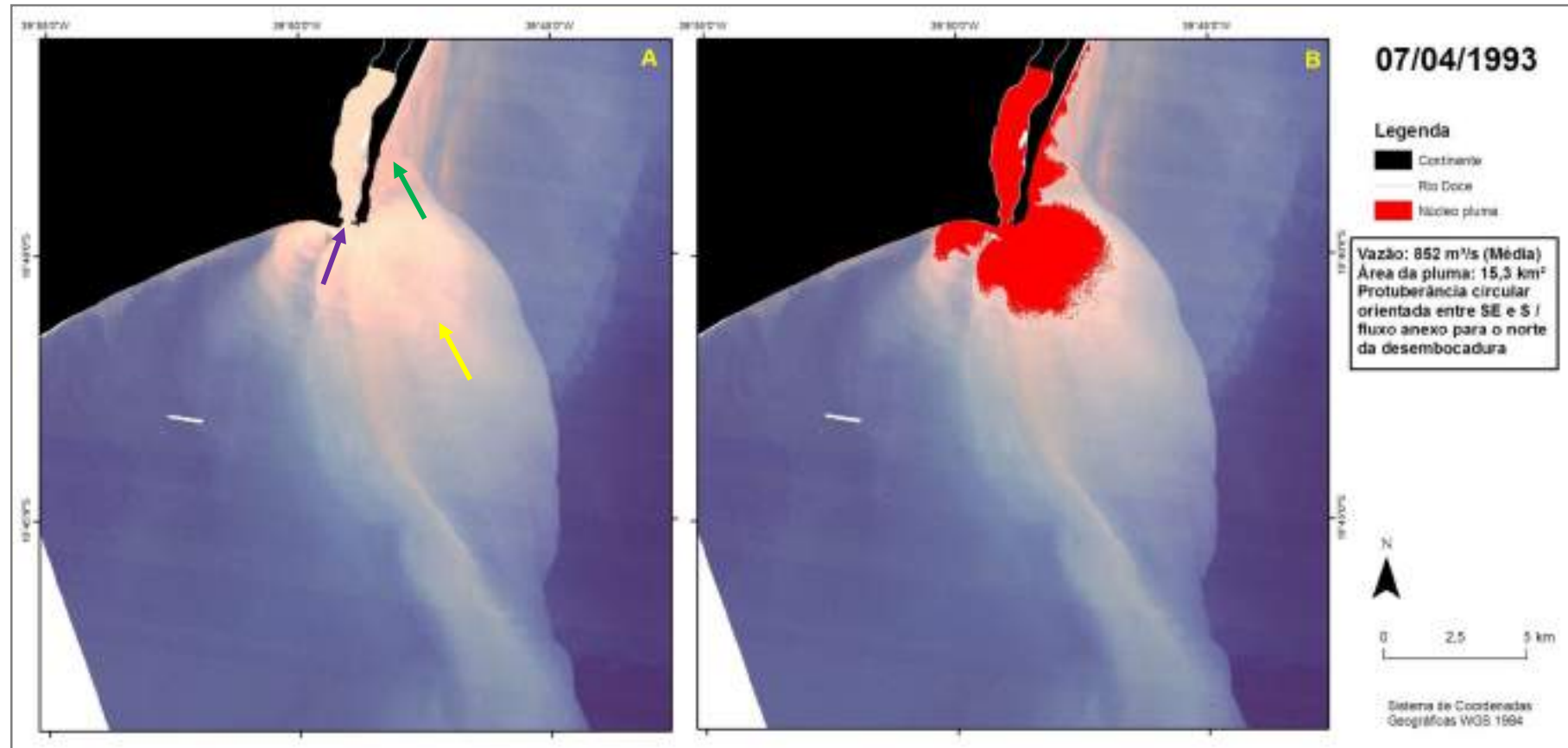


Figura 56: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 07/04/1993. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Seta roxa: detalhe para a orientação da desembocadura totalmente voltada para S.

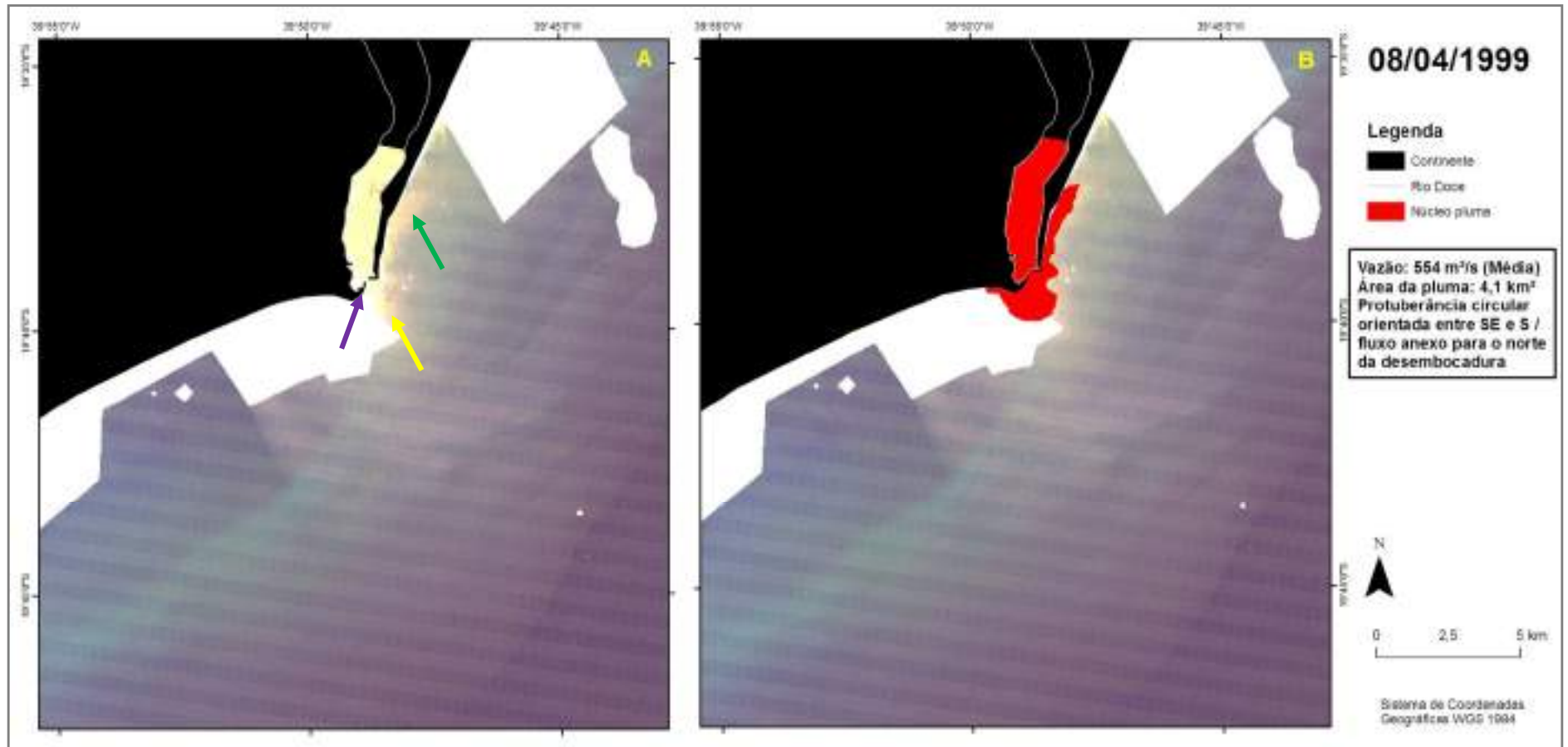


Figura 57: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 08/04/1999. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Seta roxa: detalhe da reduzida largura da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

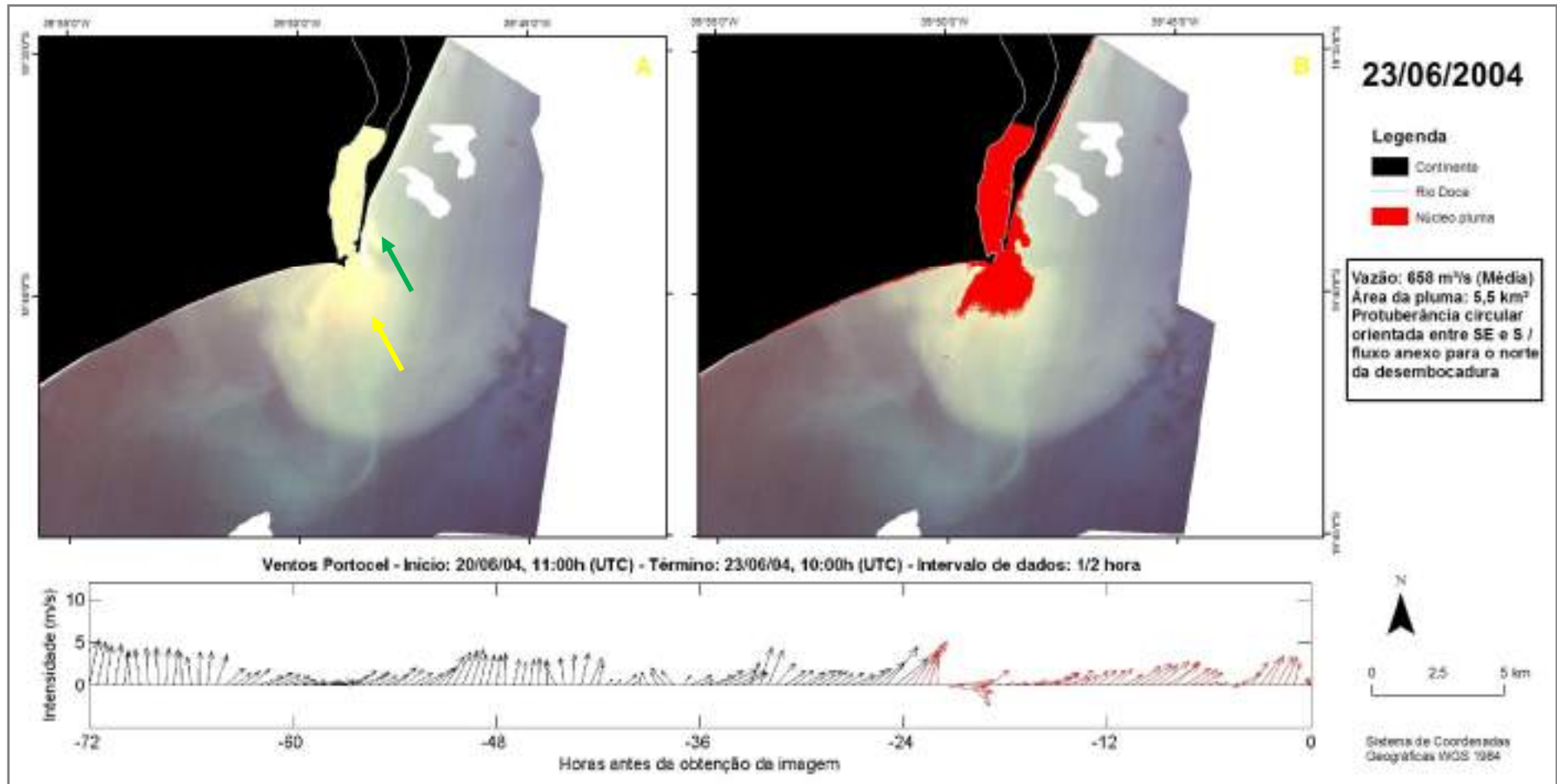


Figura 58: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 23/06/2004 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

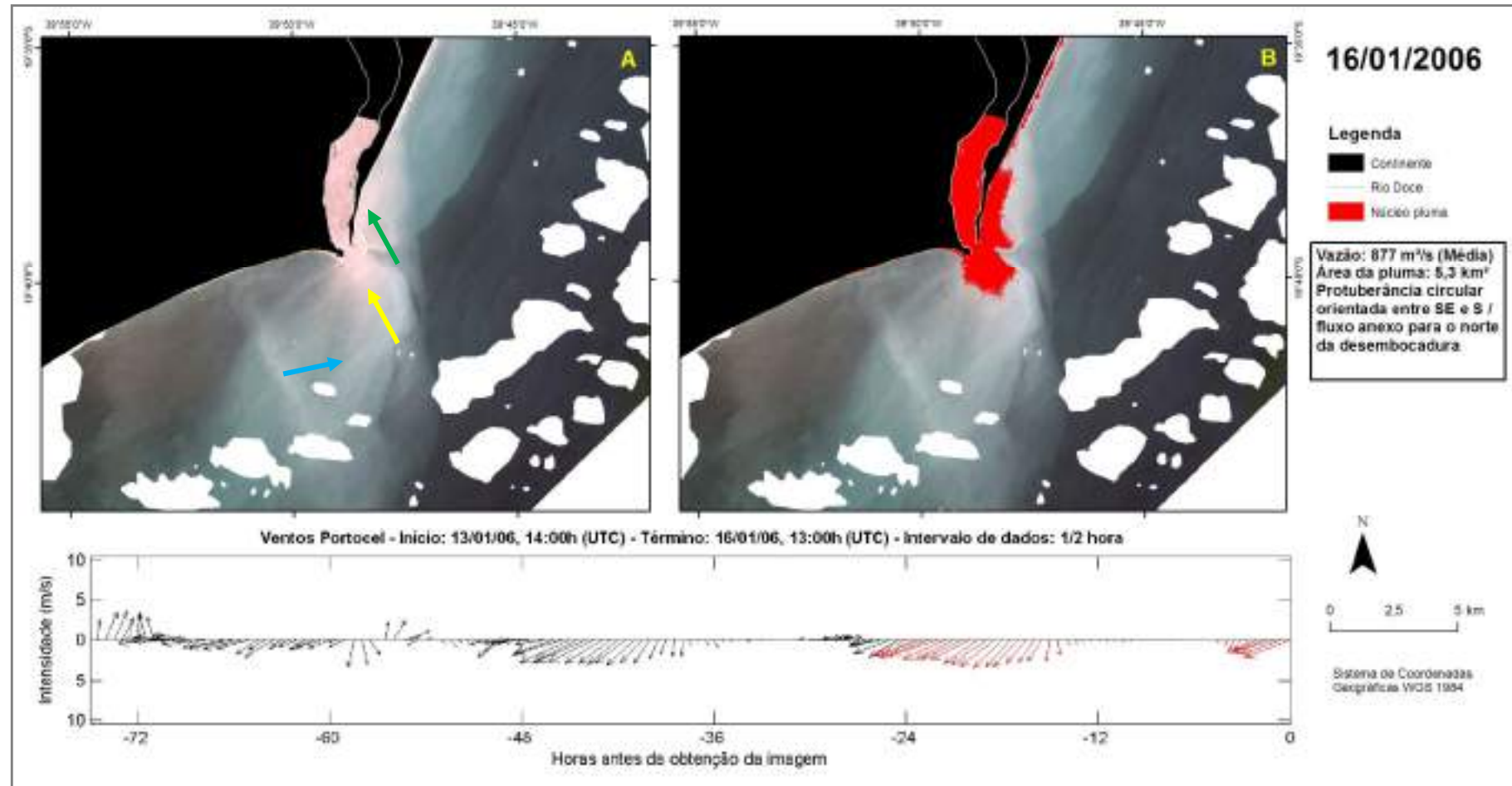


Figura 59: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 16/01/2006 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta azul: feições alongadas indicam influência dos ventos NE que estavam atuando. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

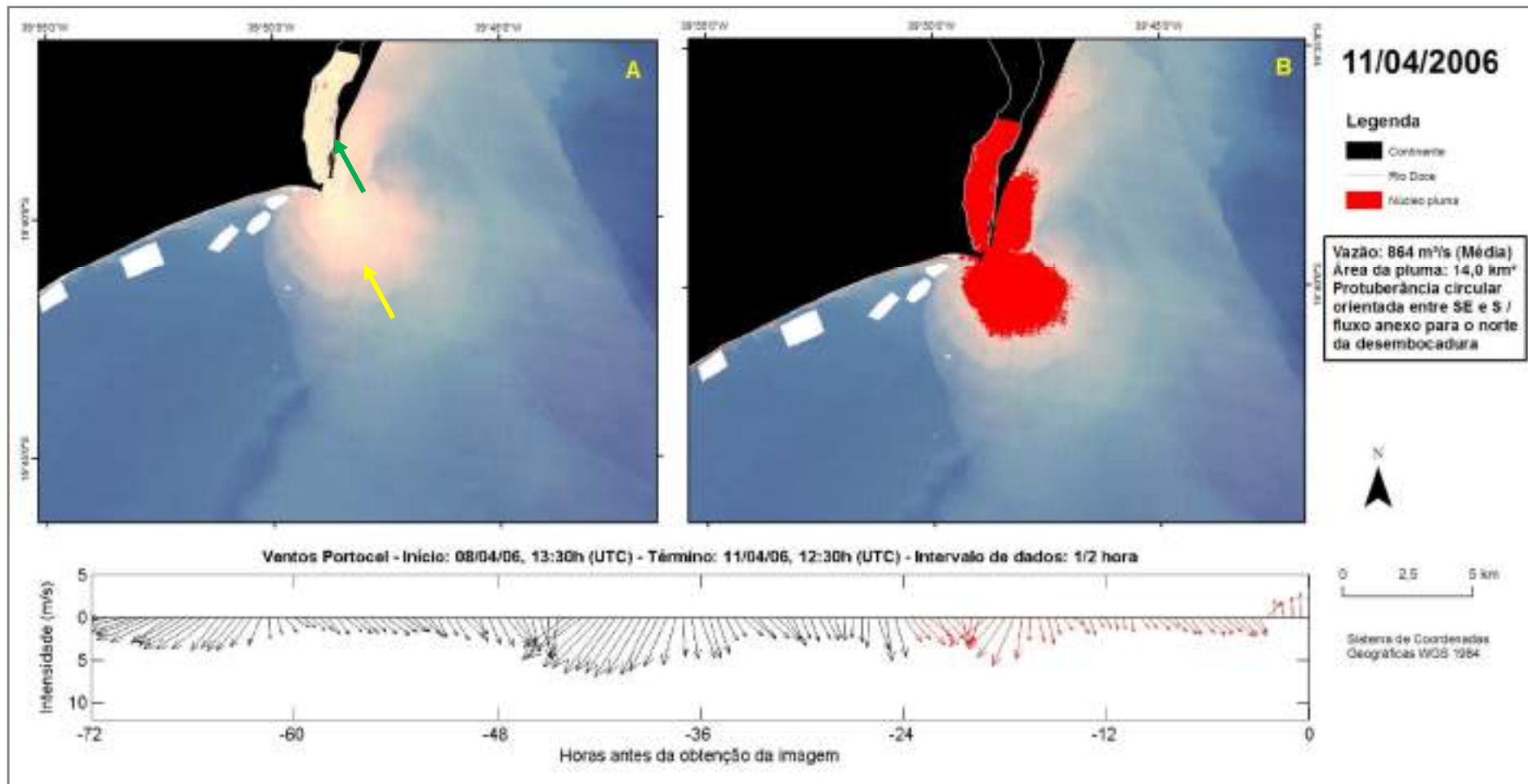


Figura 60: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 11/04/2006 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

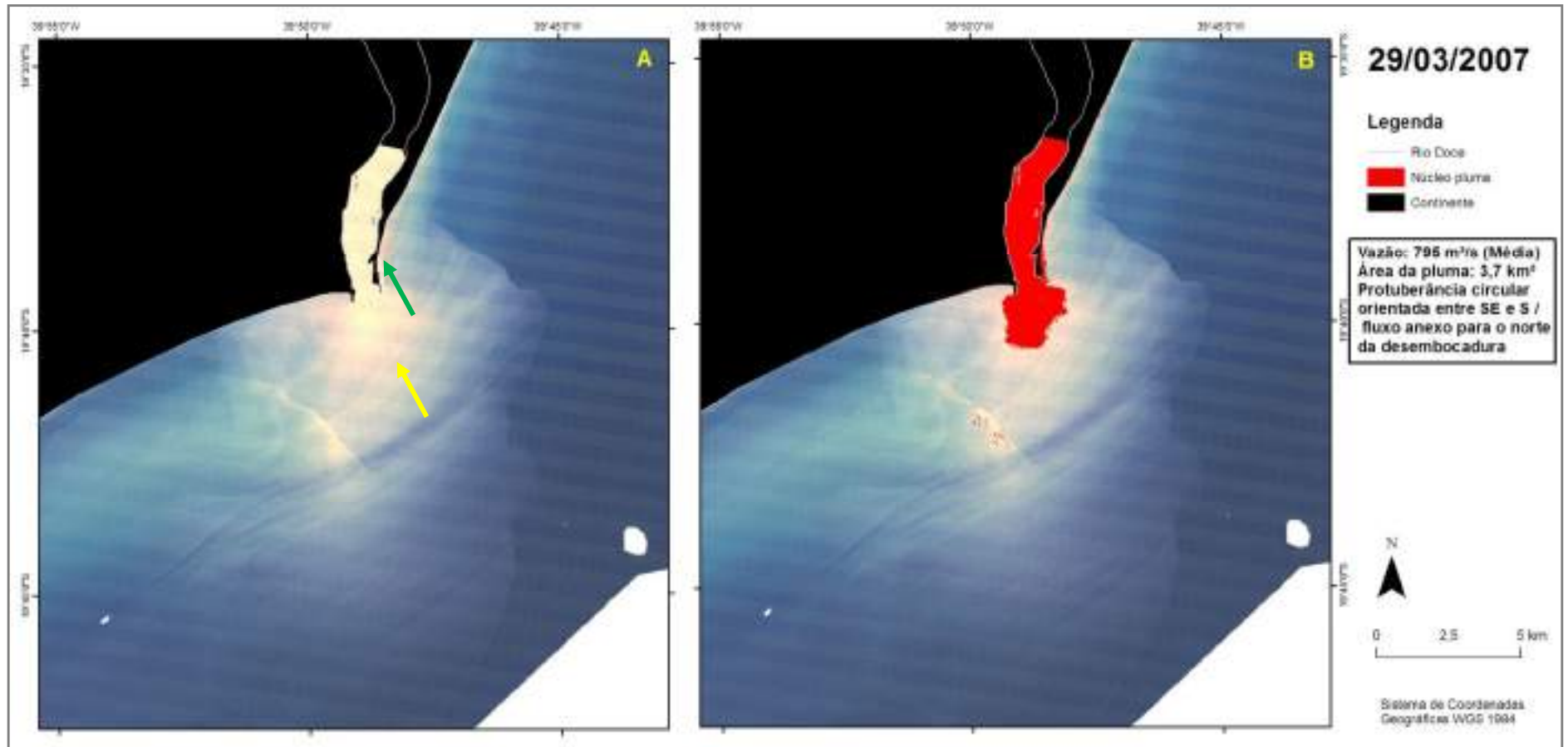


Figura 61: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 29/03/2007. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura com fraca magnitude. Áreas em branco são nuvens.

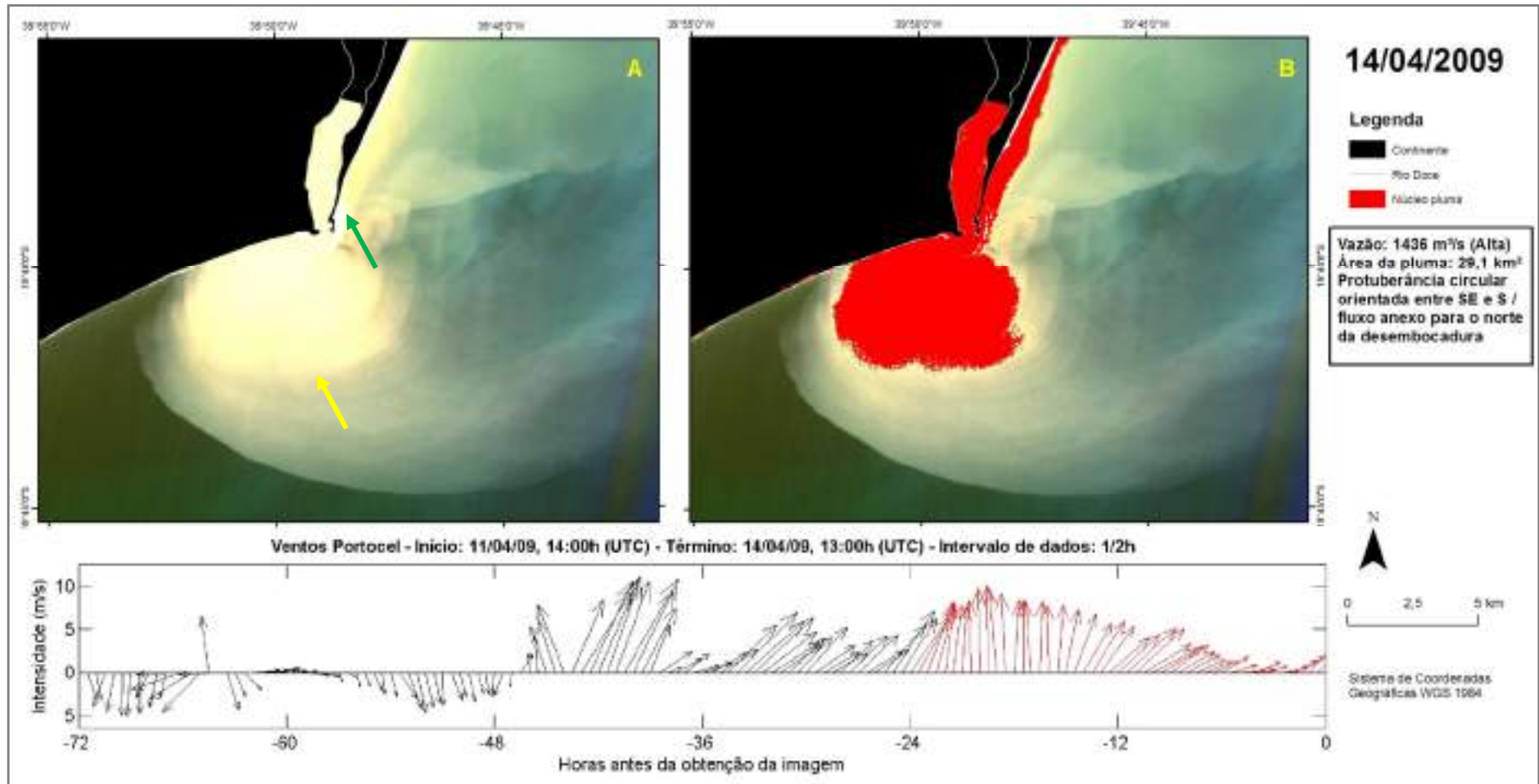


Figura 62: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 14/04/2009 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

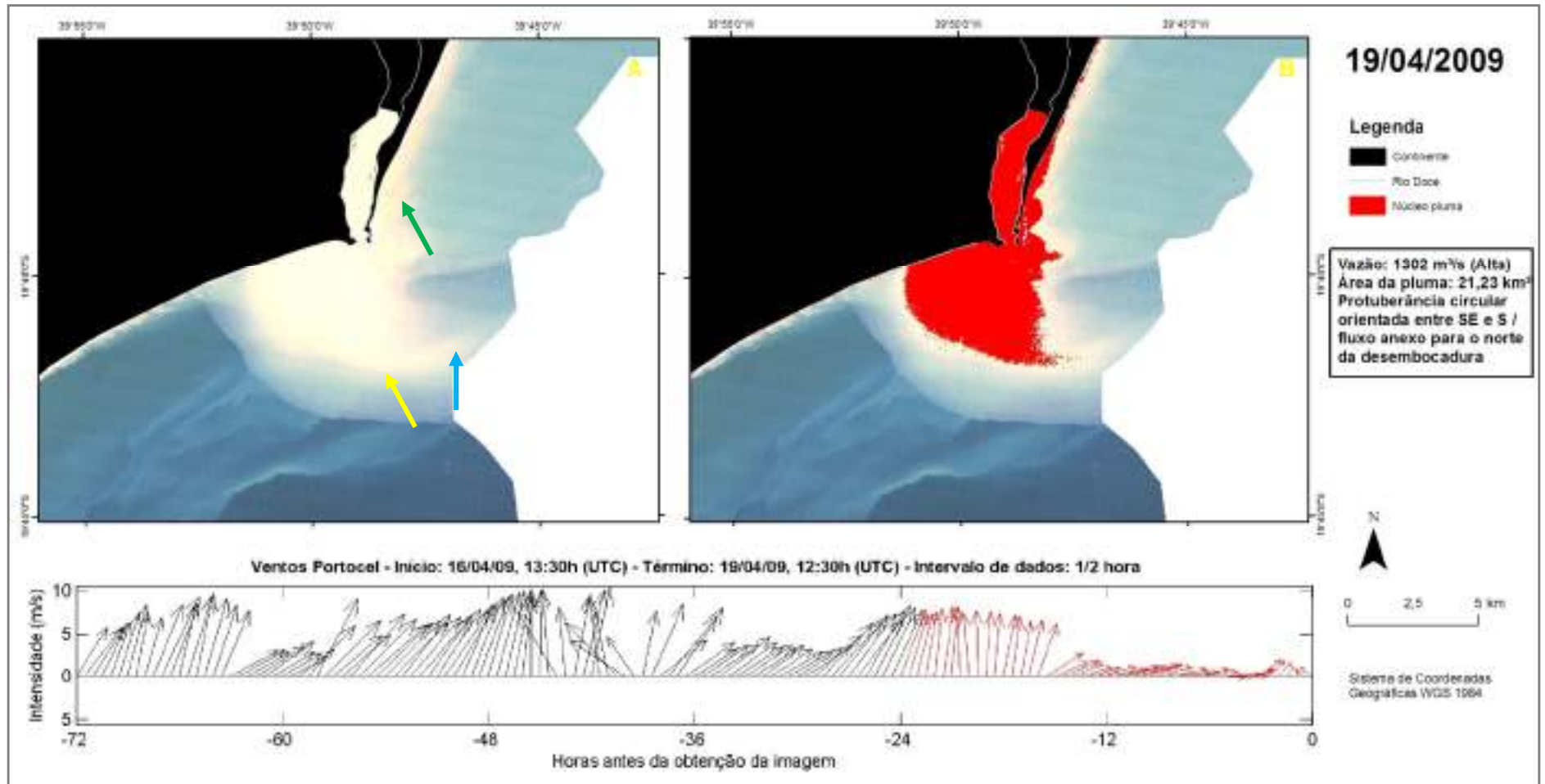


Figura 63: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat do dia 19/04/2009 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta azul: feição alongada indica influência dos ventos SO a L que estavam atuando. Seta amarela: protuberância circular orientada em SE. Seta verde: fluxo para o norte da desembocadura. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

4) Dispersão radial a partir da desembocadura

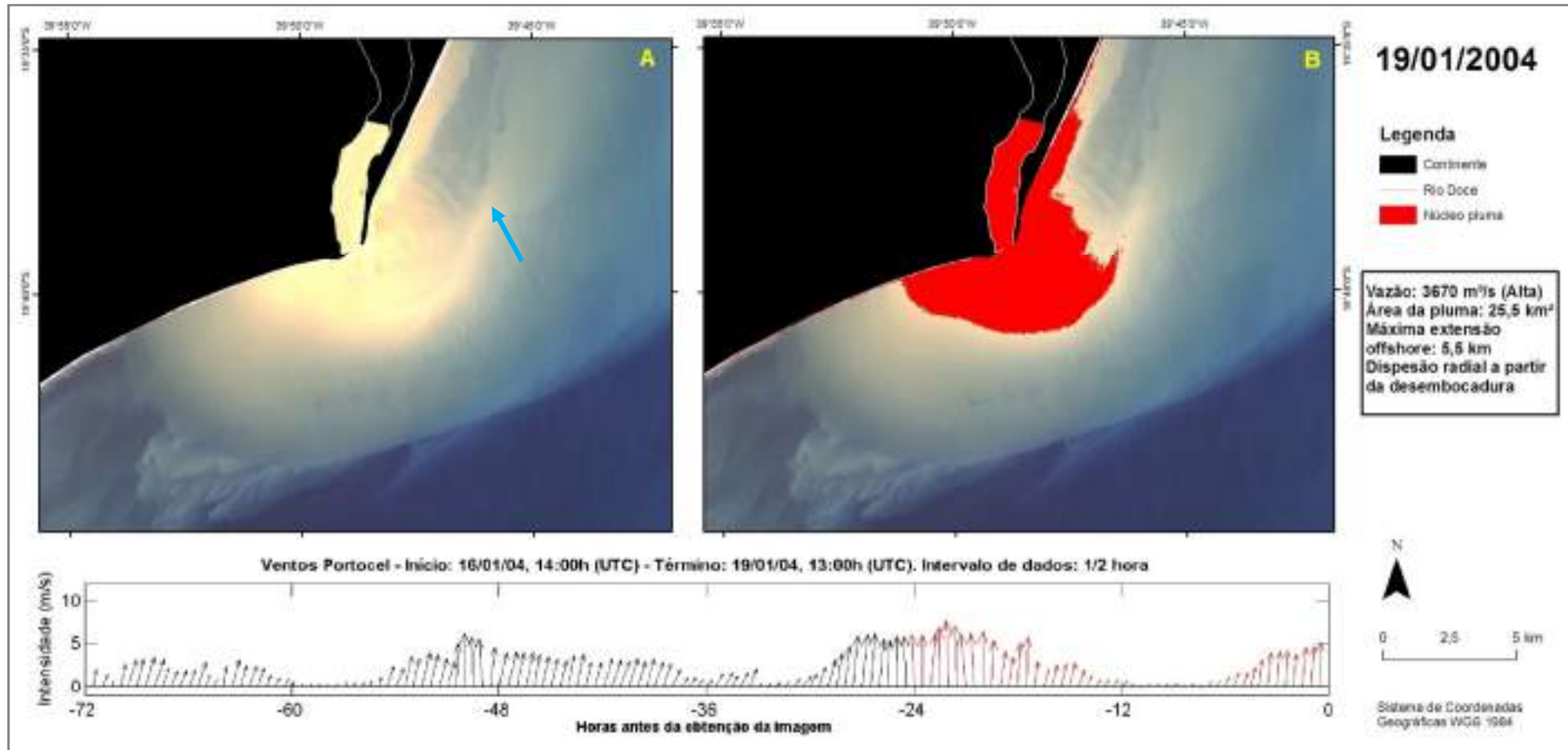


Figura 64: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 19/01/2004 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta azul: feição alongada indica influência dos ventos Sul que estavam atuando. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

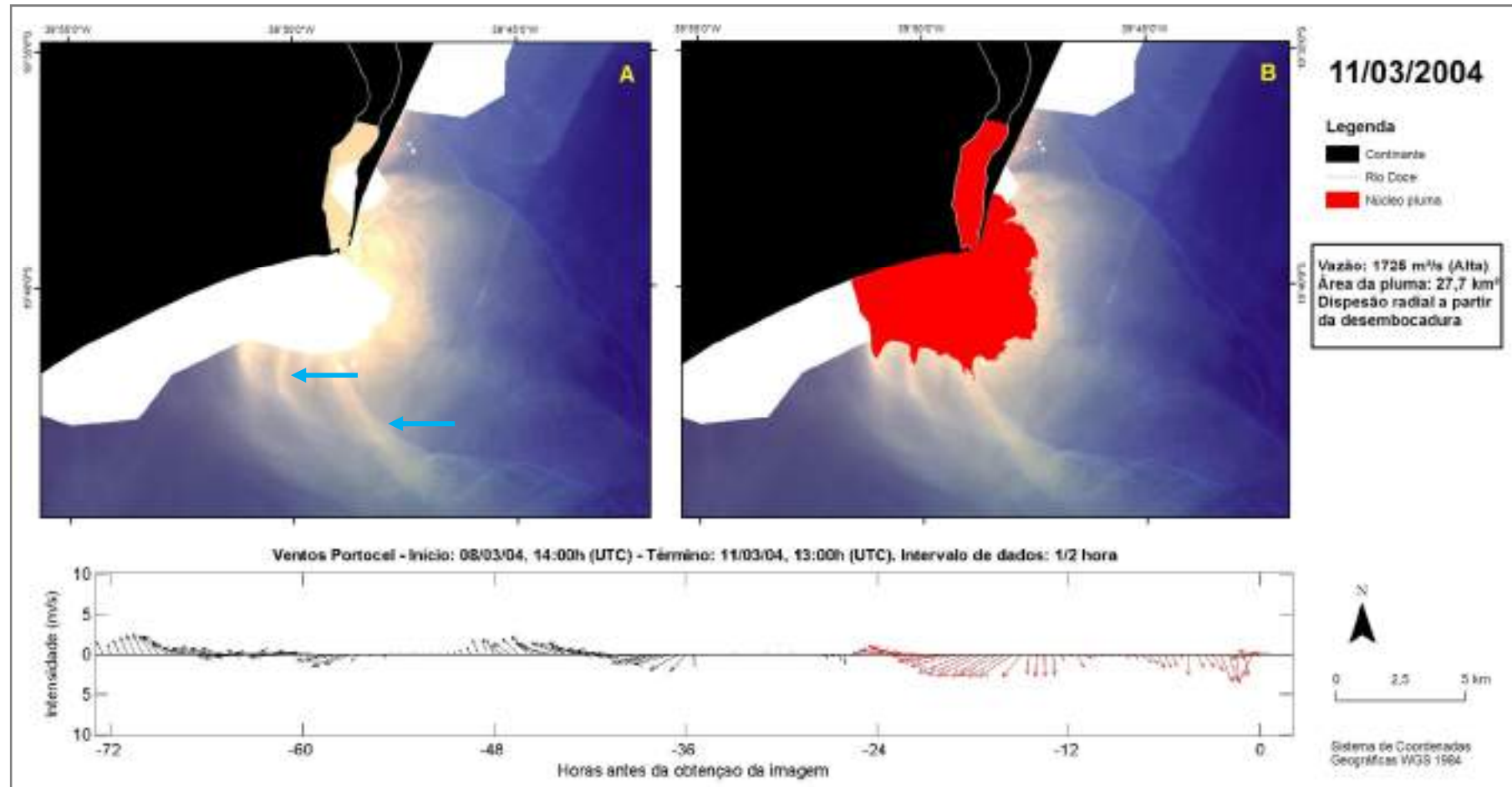


Figura 65: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 11/03/2004 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Setas azuis: feições alongadas indicam influência dos ventos do quadrante Norte que estavam atuando. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

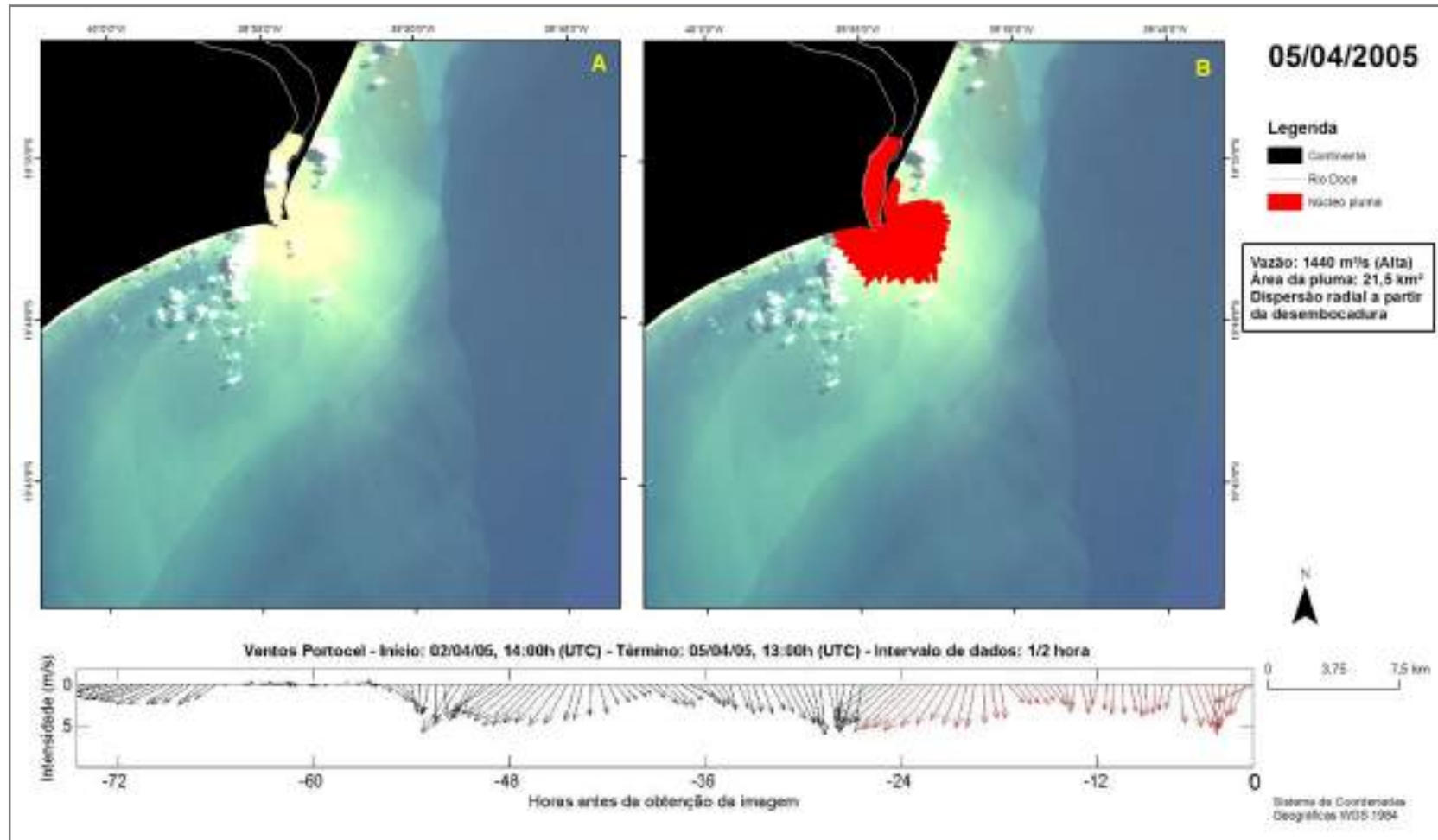


Figura 66: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem CBERS CCD do dia 05/04/2005 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

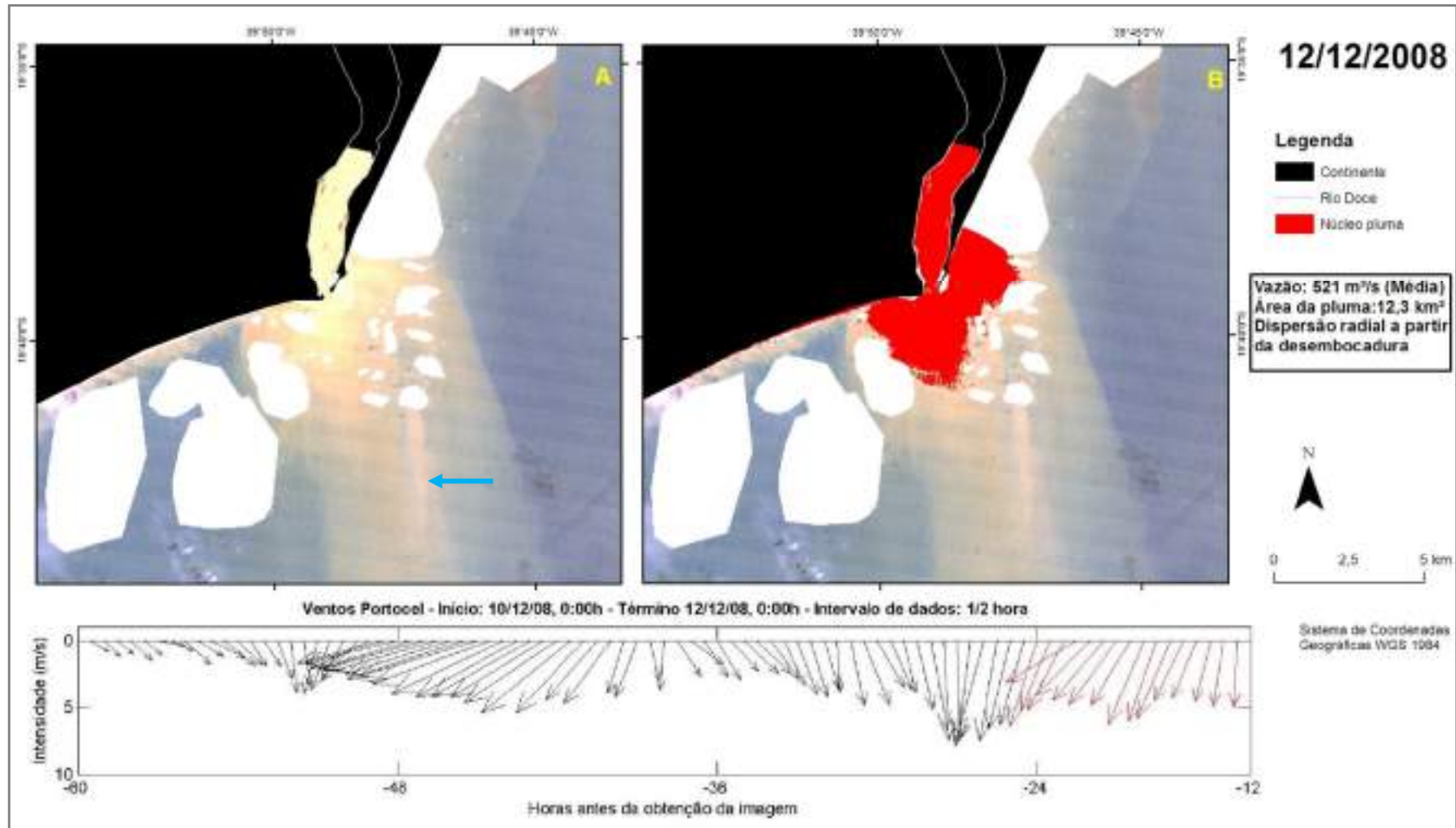


Figura 67: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 12/12/2008 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta azul: feições alongadas indicam influência dos ventos do quadrante Norte que estavam atuando. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

5) Deslocada para o norte com pequena ou nenhuma dispersão para o sul da desembocadura

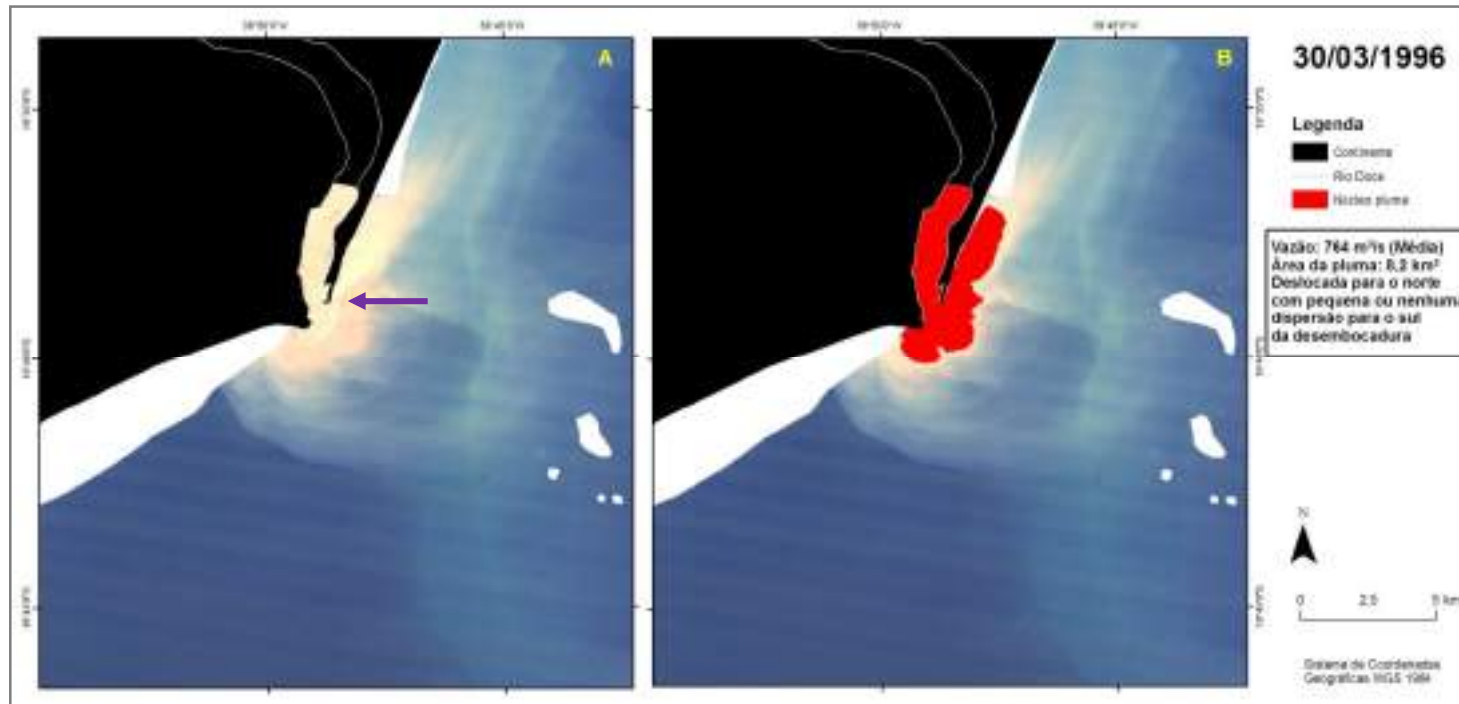


Figura 68: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 30/03/1996. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Seta roxa: observa-se grande variação morfológica na largura e orientação da desembocadura. Áreas em branco são nuvens.

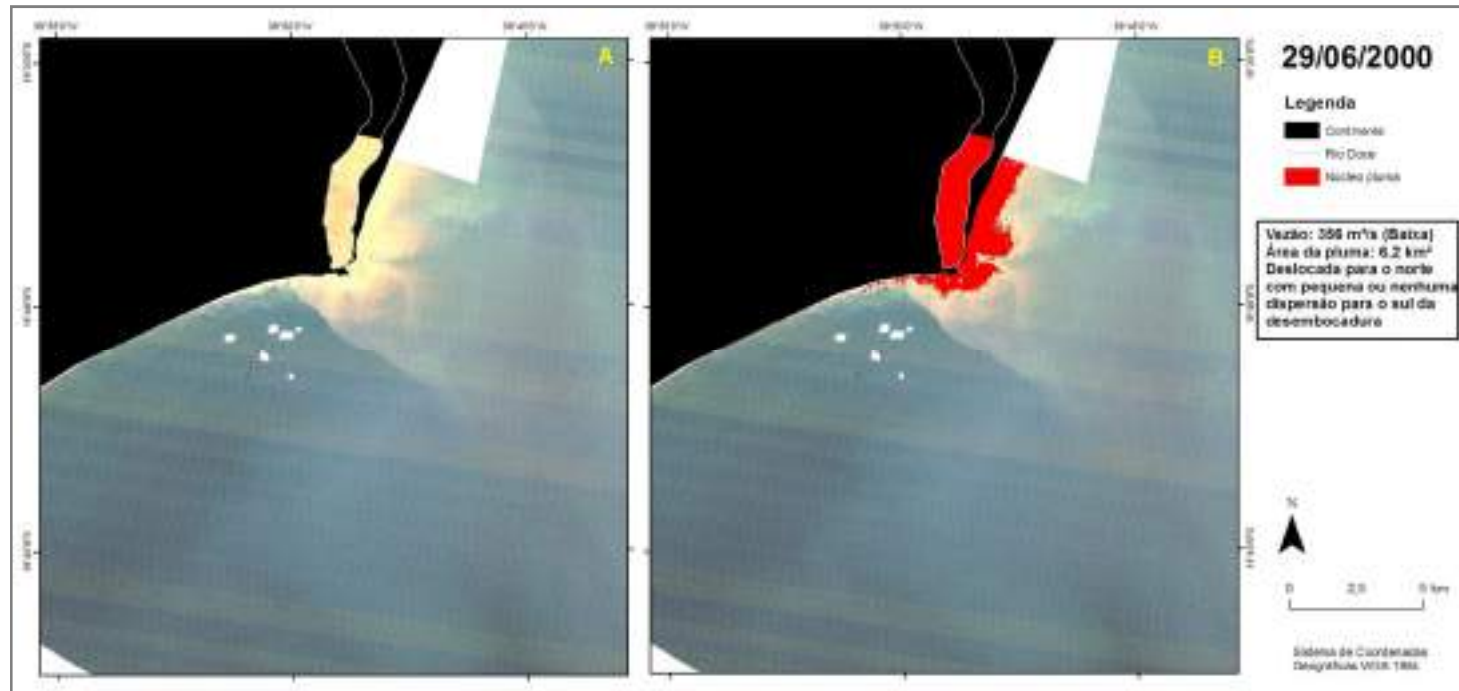


Figura 69: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 29/06/2000. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens.

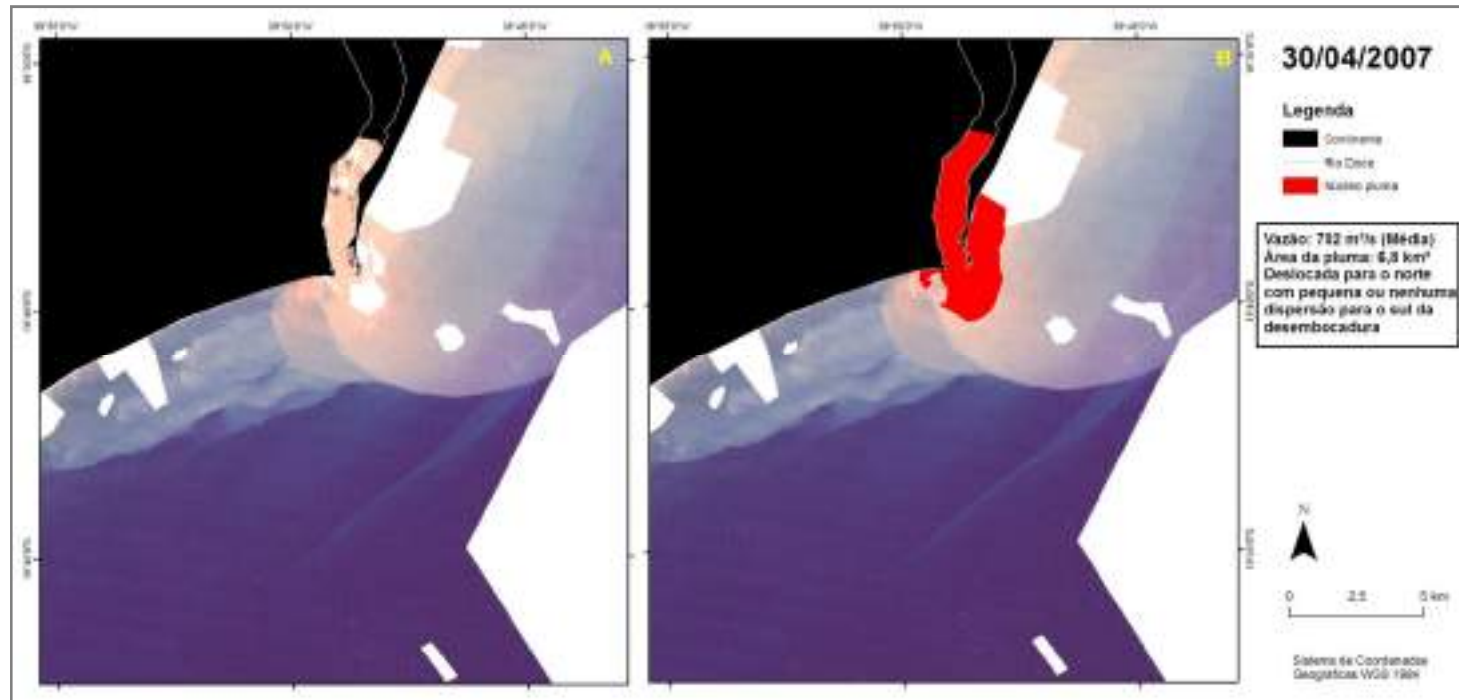


Figura 70: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 30/04/2007. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens.

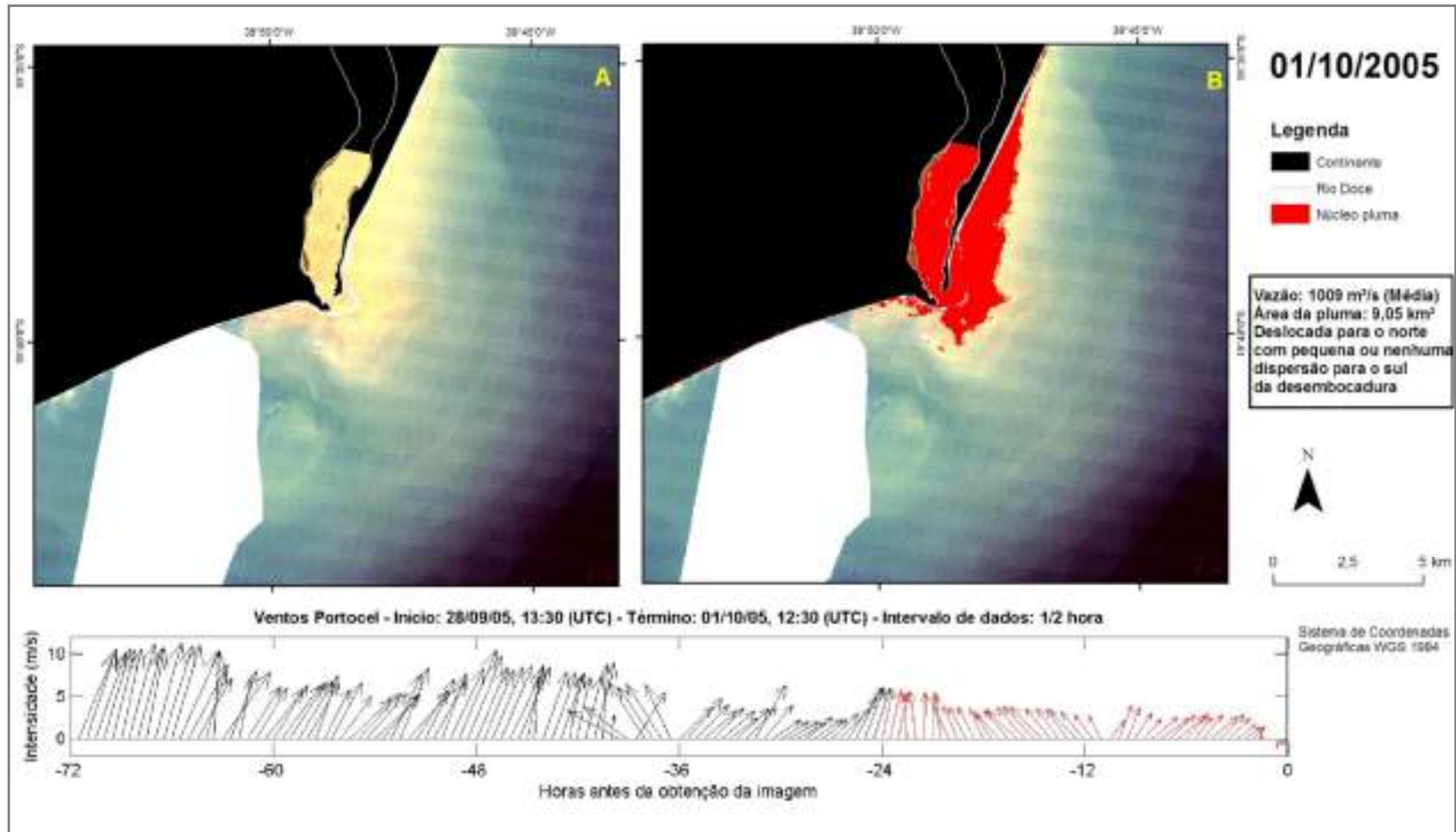


Figura 71: Resultado obtido com a classificação supervisionada da imagem Landsat TM do dia 01/10/2005 e diagrama *stick plot* de ventos medidos na estação meteorológica de Portocel entre 0 e 72 horas antes da obtenção da imagem pelo satélite. A: imagem antes da classificação (Composição RGB bandas 3, 2, 1). B: imagem classificada, destacando a água do núcleo da pluma. Áreas em branco são nuvens. A direção dos ventos segue a convenção oceanográfica (vetores apontam para onde o vento vai).

ANEXO II – CÁLCULOS

Segundo Yankovsky & Chapman (1997):

- Profundidade de equilíbrio: $h_b = (2Lv_i h_0 f / g')^{1/2}$.

Onde:

L = largura da desembocadura (390 m, obtida a partir de imagem de satélite de fevereiro de 2002);

v_i = velocidade do fluxo fluvial (0,69 m/s, obtido a partir da vazão relacionada à área do perfil da desembocadura);

h_0 = profundidade da desembocadura (3,5 m, batimetria apresentada na Figura 9);

f = parâmetro de coriolis (0,0000489);

g' = gravidade potencial (0,277);

Foram utilizados os dados do perfil de salinidade obtidos por ASA (2003).

$$h_b = 0,577 \text{ m}$$

Ou seja, h_b é menor que h_0 , demonstrando que a dinâmica do transporte na camada limite de fundo não tem influência significativa e uma pluma com espalhamento superficial é desenvolvida, segundo Yankovsky & Chapman (1997).