

Análise histórica da pluma de sedimentos do rio Paraíba do Sul utilizando dados orbitais

Kelly Ferreira Esch¹
Ângelo Sartori Neto²

¹ Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro
Rua Afonso Cavalcanti, 455 – CEP 20211-110 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
kellyesch@hotmail.com

² Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.
Avenida Nilo Peçanha, 151 – CEP 20020-100 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
angelosartori@petrobras.com.br

Abstract. Suspended sediments are a major factor affecting water quality in aquatic ecosystems of the world; its monitoring is fundamental in the activities of the environmental management of the coastal areas. In that direction, the basic hypothesis of this work is that the spatial and temporal pattern of coastal plumes of sediments – associated to the hydrological regime of the river – may be characterized from orbital images of medium spatial resolution. The aim is to map qualitatively the sediments plume of Paraíba do Sul river from the images of Landsat 5 and CBERS-2, from the period between 1985 and 2007. A set of 50 historic images was evaluated. The processing consisted of radiometric correction, georeferencing, supervised classification and extraction of features. Environmental scenarios indicating the qualitative concentration of suspended sediment were generated based on the existence of a strong positive correlation between spectral reflectance in the red range and quantity of suspended particles in the water. The results were related to the historical data of river flow, indicating the strong differentiation between scenarios of high and low river flow. Spatial analysis of the plume river included the pattern of sediments, area, distance from the river mouth and preferred direction over the 23 years studied. Other results are available on the author's dissertation.

Palavras-chave: suspended sediments, sediment plume, Paraíba do Sul river, remote sensing, sedimentos em suspensão, pluma de sedimentos, rio Paraíba do Sul, sensoriamento remoto.

1. Introdução

Sedimentos em suspensão representam um dos principais fatores que afetam a qualidade dos sistemas aquáticos no mundo (Holyer, 1978; Tassan, 1997); influenciam os processos geomórficos de construção da paisagem e podem indicar problemas de erosão e perda de solo na bacia hidrográfica contribuinte. Os sistemas fluviais são integralizadores dos fenômenos que ocorrem ao longo da bacia de drenagem, sofrendo direta e indiretamente os impactos das atividades antrópicas nela desenvolvidas. Assim, a ausência de mecanismos de controle para evitar a entrada de diferentes tipos de poluentes contribui para a ocorrência de sérios problemas de degradação ambiental em sistemas aquáticos (Merten e Minella, 2002).

A concentração de sedimentos em suspensão é um parâmetro fundamental da qualidade da água, já que altera suas propriedades físico-químicas, gerando inúmeras consequências à vida neste meio e às diversas atividades humanas. Os sedimentos servem ainda como veículo da movimentação da poluição orgânica, química e industrial, pois os poluentes agregam-se ao material mais fino e são carregados ao longo do curso d'água. Em função disso, os efeitos dos lançamentos de efluentes podem ser verificados em locais muito distantes da fonte poluidora.

Em águas costeiras, a origem do material particulado em suspensão está relacionada à descarga de água doce pela rede de drenagem e à ressuspensão ou erosão do fundo (Miller e McKee, 2004). Os contínuos processos de troca que envolvem a região costeira e o oceano, regidos por forçantes atmosféricas, astronômicas e oceanográficas (Noernberg et al, 2001), fazem com que o fluxo, a concentração e a distribuição dos sedimentos em suspensão sejam altamente dinâmicos, espacial e temporalmente. Assim, seu monitoramento é fundamental nas atividades de gestão ambiental de áreas costeiras, com particular interesse na utilização de

dados de sensoriamento remoto orbital, já que estes fornecem uma visão sinótica do ambiente e são capazes de acompanhar a dinâmica espacial e temporal altamente variável dos materiais em suspensão, a baixo custo, comparativamente às tradicionais técnicas de amostragem de campo (Miller e McKee, 2004; Ritchie et al, 1987; Choubey e Subramanian, 1991).

À vista disso, o presente trabalho teve como objetivo mapear a pluma de sedimentos na região da foz do rio Paraíba do Sul, ao longo do período compreendido entre 1985 e 2007, a partir de dados espectrais provenientes de imagens Landsat 5/sensor TM e CBERS-2/sensor CCD. A escolha destes sensores foi determinada pela resolução espacial e existência de bandas espectrais adequadas ao fenômeno de interesse, aliada a disponibilização de imagens isentas de custo pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul abrange os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, ocupando uma área de 57.000 km², e tem sua foz em Atafona, município de Campos, no norte fluminense, após percorrer seus 1.137 km de extensão (Figura 1). Tem sua desembocadura na forma de delta, uma planície que se estende na direção sudoeste – nordeste e corresponde a um conjunto de ambientes sedimentares relacionados principalmente às fases de erosão costeira (Bizerril et al, 1998).

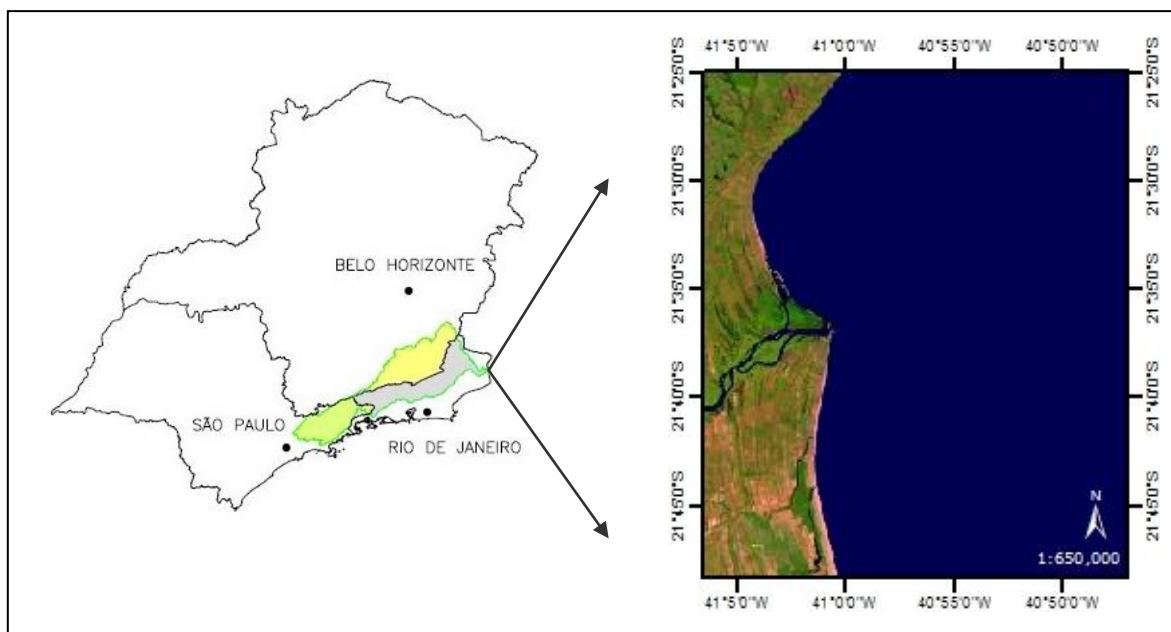


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (a), e sua foz, em Atafona (b).

2.2 Proposta Metodológica

A hipótese básica deste trabalho é que o padrão espaço-temporal de pluma de sedimentos costeiras, associado ao regime hidrológico do rio, pode ser caracterizado a partir de imagens de sensores orbitais de média resolução espacial. Para verificá-la, as datas das imagens foram criteriosamente definidas a partir de três estratégias de análise, e os resultados foram avaliados considerando-se dados históricos de nível de água do rio. A partir da análise do comportamento da hidrógrafa, foram definidos cinco anos, correspondentes aos valores médios anuais extremos da série histórica, no período entre 1985 e 2006, e para cada um deles selecionaram-se duas imagens representativas dos extremos sazonais. O segundo critério foi a seleção de todas as imagens nas quais a pluma estava visível na composição colorida

disponibilizada para visualização no banco de imagens da DGI/INPE. Finalmente, visando ampliar o número de amostras ao longo do ciclo hidrológico anual, definiram-se dois anos consecutivos cuja quantidade de imagens disponíveis fosse máxima, de acordo com o critério de cobertura de nuvens, selecionando-as para análise.

2.3 Materiais e Métodos

Foram utilizadas 50 imagens ao longo do período compreendido entre 1985 e 2006, das quais 35 são do Landsat 5 / sensor TM, órbita - ponto 216/75; e 15 são do CBERS-2, sensor CCD, órbita - ponto 149/124. As imagens foram submetidas ao procedimento de correção radiométrica utilizando-se o modelo de transferência radiativa denominado 6S (Vermote et al, 1997), adaptado por Antunes (2003), e as etapas de processamento e análises espaciais foram realizadas no software ArcGis 9.2. Após o georreferenciamento das cenas, procedeu-se à geração da máscara na interface terra-água, a fim de promover o isolamento da região aquática e uniformizar o recorte da área selecionada para análise. O procedimento foi efetuado para uma única data, utilizando-se a banda 4, e a máscara resultante foi então editada em cada uma das imagens, em função de mudanças geomorfológicas na linha de costa e na foz do rio Paraíba do Sul. Ao final do processo, gerou-se uma máscara a partir da qual todas as imagens foram isoladas na área de interesse.

Como o verde e o vermelho são as duas bandas mais citadas na literatura para estudos sobre sedimentos em suspensão (Ritchie et al, 1987; Choubey e Subramanian, 1991; Kritikos et al, 1974; Novo et al, 1991; Miller e McKee, 2004; Chen et al, 1992; Tassan, 1997), avaliou-se e comparou-se a resposta espectral nestas referidas regiões do espectro-eletromagnético visando definir qual seria a banda utilizada no mapeamento. Nesse sentido, os seguintes procedimentos foram realizados individualmente, de forma exploratória, nas respectivas bandas, com as imagens devidamente recortadas na região de interesse: estatística básica para cada data; classificação não supervisionada; e geração de curvas de frequência espectral. As duas primeiras técnicas propiciaram uma comparação geral dos resultados obtidos em cada faixa espectral, mas foi a partir da análise da resposta do alvo através das curvas de frequência espacial que efetivamente definiu-se a utilização da banda do vermelho.

O reconhecimento do comportamento do alvo de interesse nesta faixa espectral consistiu na análise visual das cenas, das curvas de frequência espacial, e na realização de uma classificação exploratória utilizando-se a técnica Natural Breaks – uma implementação do método de Otimização *Jenks* (*Jenks Optimization*), também conhecido como Melhor Ajuste da Variância (GVF). A partir desta avaliação, aplicou-se uma classificação manual, na qual o número de classes, bem como seus intervalos, foram previamente definidos e aplicados a todas as imagens visando unificar a escala de valores e propiciar a comparação dos cenários referentes a cada data. Optou-se por apresentar os mapas temáticos em função de uma avaliação indicativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS), de forma qualitativa, baseada na existência de forte correlação positiva entre reflectância espectral e quantidade de partículas em suspensão na água. Na prática, sabe-se que este relacionamento tem uma forma assintota, mas vários pesquisadores encontraram melhores coeficientes de determinação a partir da hipótese simplificada de um relacionamento linear (Ritchie et al, 1987; Ritchie e Cooper, 1988; Miller e McKee, 2004; Rouse e Coleman, 1976; Novo, 1992). Com isso, este trabalho estabelece cinco classes qualitativas de concentração de sedimentos – muito alta, alta, média, baixa e não significativa – baseadas no relacionamento entre reflectância espectral na faixa do vermelho e concentração de sedimentos em suspensão. Por fim, as imagens temáticas foram submetidas a procedimentos pós-classificação, visando eliminar ruídos, como pequenas áreas mal definidas e fora de contexto.

Foi realizada ainda a extração da feição de interesse em todas as imagens onde o padrão dos sedimentos observado foi em forma de pluma com a presença marcante da frente de

sedimentos. As técnicas utilizadas integraram análise visual e procedimentos semi-automáticos para delimitação do alvo. Inicialmente, aplicou-se um filtro passa-baixa nas imagens, e a partir da análise da curva de frequência espacial de cada data, definiram-se os valores de reflectância espectral que poderiam representar o limite da frente de sedimentos, gerando-se as linhas de contorno correspondentes. As imagens foram então analisadas individualmente para seleção daquela que melhor representasse o alvo estudado, e as feições resultantes foram reunidas em banco de dados.

O comportamento do material em suspensão foi avaliado quanto a sua intensidade, padrão, área de abrangência, frequência de ocorrência, distância em relação à desembocadura e direção preferencial. Para as análises direcionais e de distância, definiu-se um ponto central na foz do rio, a partir do qual radiais de 22,5° foram traçadas, originando nove direções. As avaliações que consideraram todas as imagens foram realizadas em conjunto com dados históricos de vazão do rio, referentes à estação fluviométrica de Campos – Ponte Municipal, obtida junto à Agência Nacional de Águas. O regime hidrológico apresenta duas condições bem marcadas: as maiores vazões ocorrem de dezembro a março (média de 1102,4 m³/seg), e as menores, de julho a outubro (média de 391,7 m³/seg).

3. Resultados e Discussão

Foram avaliados 50 cenários ambientais, 30 no período chuvoso e 20 no seco, os quais subsidiaram a avaliação qualitativa da intensidade da concentração de sedimentos em cada data específica, e a investigação da existência ou não de padrões relacionados à dinâmica do nível de água do rio.

Como a concentração de material em suspensão varia amplamente no espaço e no tempo, as informações foram agrupadas de acordo com a classe de intensidade máxima observada em cada data, fornecendo uma visão geral do seu comportamento na área de estudo. A Figura 2 exemplifica estes cenários e indica o percentual de ocorrência de cada classe como intensidade máxima nas datas avaliadas. Verifica-se que 24% do total de imagens mapeadas têm concentração máxima “muito alta”; 26%, “alta”; em 44% dos casos a classe de intensidade máxima é “média”; e em 6%, baixa.

Estes resultados ficam bastante esclarecedores quando se verifica a época do ano em que tais categorias ocorreram como intensidade máxima. Analisando a Tabela 1, observa-se que as classes “muito alta” e “alta” ocorreram 25 vezes no total, das quais 24 foram no período chuvoso e apenas 1 no período seco. Em contrapartida, avaliando-se as classes “média” e “baixa” a situação se inverte: do total de ocorrências como intensidade de máxima concentração de sedimentos, 95% dos casos foram no período seco e 5% no período chuvoso. Dos 20 cenários existentes na época de menor vazão, 19 estão nas classes “média” e “baixa”.

Tais informações sugerem que a quantidade de sedimentos em suspensão na água está fortemente relacionada à sazonalidade: as maiores concentrações absolutas ocorrem nos meses onde é maior a vazão do rio; já no período seco, predominam valores medianos de concentração de sedimentos.

No que se refere ao padrão do material em suspensão, observa-se pluma com presença marcante da frente de sedimentos em 60% dos casos avaliados, enquanto nos outros 40% observa-se a pluma do rio, porém com padrão difuso. Examinando novamente a influência da sazonalidade, verifica-se que, no período chuvoso, apenas uma imagem não apresenta pluma, do total de 29, ao passo que no período seco, a situação se inverte: 19 imagens apresentam-se com padrão difuso, e somente uma possui frente de sedimentos, como se verifica na Tabela 2.

A análise dos dados de vazão pode efetivamente contribuir para a compreensão destes resultados e comprovação das tendências espaço-temporais observadas. Avaliando as particularidades encontradas, a única data em que se verifica um padrão difuso no período de

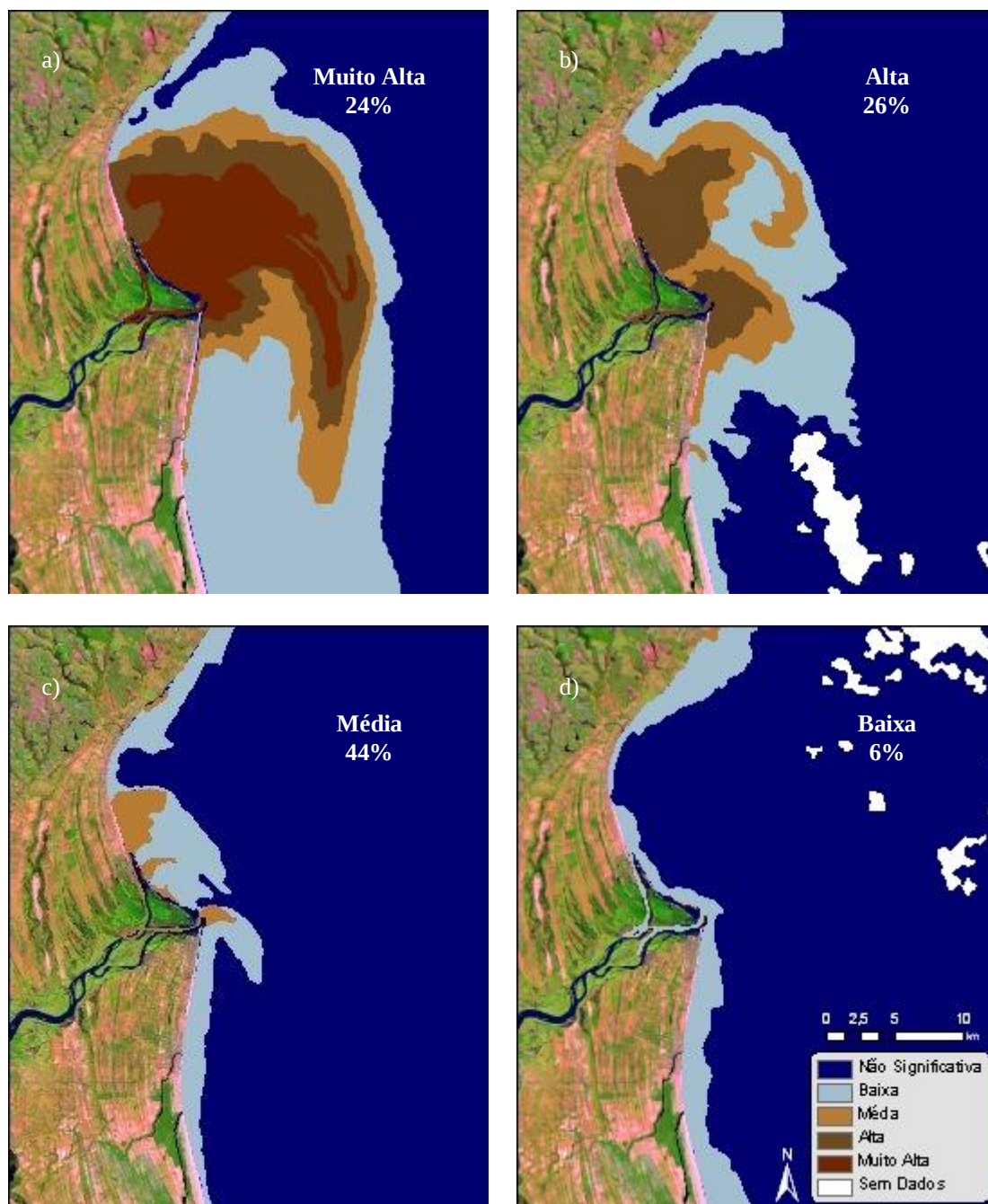


Figura 2. Mapas temáticos qualitativos da CSS na água. Cada imagem exemplifica um cenário segundo a classe de intensidade máxima observada na data. Cenas Landsat 5: a) 03/02/1985; b) 22/02/1986; c) 02/04/2005; d) 15/07/2005.

Tabela 1. Número de ocorrências de cada classe como intensidade máxima no conjunto de imagens, de acordo com os períodos chuvoso e seco.

Imagens	Nº de ocorrências nas classes de intensidade de máxima concentração				
	TOTAL	Muito Alta	Alta	Média	Baixa
TOTAL	50	12	13	22	3
Período de Cheia	30	12	12	5	1
Período de Seca	20	0	1	17	2

cheia ocorreu em 17/02/1990, que também é o único caso no qual a classe de máxima concentração de sedimentos é “baixa” no período chuvoso. Neste ano, a vazão média em fevereiro foi de 539 m³/s, muito abaixo da média deste mês (1180,6 m³/s) e de todo o período chuvoso (1102,4 m³/s). O ano de 1990 apresenta o segundo valor médio mais baixo de vazão (443,2 m³/s) ao longo do período 1985–2006, explicando este comportamento mais característico de cenários do período seco. A mesma constatação é encontrada ao se avaliar a vazão média dos 30 dias anteriores à passagem do satélite. Já considerando a época seca, o único cenário que se apresenta com pluma ocorreu em 02/05/2004. Os dados de vazão média mensal por ano indicam que em abril de 2004 o valor registrado foi 1092,5 m³/s, bem acima da média mensal do período, cujo valor é 747 m³/s, justificando a presença de pluma, característica de época chuvosa, nesta data.

Tabela 2. Informações sobre padrão de sedimentos observado no conjunto de imagens.

Imagens	Padrão de sedimentos		
	TOTAL	Com Frente	Difuso
TOTAL	50	30	20
Período de Cheia	30	29	1
Período de Seca	20	1	19

De forma geral, as análises das imagens e dos mapas temáticos mostram que as maiores concentrações de sedimentos em suspensão são encontradas na região da desembocadura, e a dimensão e a forma da área ocupada são bem variáveis, mas acompanham a forma geral da pluma. Da foz em direção às extremidades da pluma encontram-se concentrações decrescentes de material em suspensão, e após a frente de sedimentos bem delineada existe uma espécie de área de espalhamento, na qual a concentração é menor do que na região da frente, mas ainda mantém a forma da pluma. Esta área também apresenta tamanho variado e foi considerada na definição das feições. Após esta área de espalhamento, observou-se ainda uma espécie de área de mistura até alcançar a água oceânica.

As análises de área de abrangência, frequência, distância em relação à foz e direção predominante foram realizadas apenas para o conjunto de imagens com padrão de sedimentos na forma de pluma. Das 30 imagens que se enquadram neste padrão, 29 foram avaliadas, porque uma delas encontra-se parcialmente sem dados na área de interesse, impossibilitando a correta extração da feição e todas as análises subsequentes.

Assim, no que se refere à área das plumas mapeadas, utilizou-se inicialmente a estatística descritiva para fornecer um indicativo geral do comportamento dos dados. A maior e a menor pluma ocupam uma área de 329,7 km² e 106,9 km², respectivamente, e a área média de todas as ocorrências é de 190,3 km². O conjunto de dados possui variabilidade relativamente alta e não está distribuído de forma simétrica em torno do valor médio; há predomínio de valores inferiores à média no conjunto de dados. Quanto às suas características, a pluma se desenvolve mais no eixo norte-sul, mas alcança significativa expressão *offshore*. A extensão máxima de sua frente de sedimentos ocorre na direção sudeste (SE2), onde alcança aproximadamente 27 km de distância do ponto central da foz. As direções ao sul, principalmente S1 e SE2, apresentam os maiores valores médios de área, e também nelas as feições alcançam suas maiores distâncias, como indica a Figura 3. Ao norte, normalmente uma direção se destaca, conferindo a expressão alongada no sentido norte-sul. Tais informações permitem inferir até quais distâncias da foz, e em que direções, podem-se encontrar sedimentos no padrão de pluma, tomando como base o comportamento observado ao longo de 23 anos.

Estas análises indicam que a forma da pluma na região costeira é bastante influenciada pela geografia do delta do rio Paraíba do Sul, que deságua no oceano através de dois canais principais, e pelas características do transporte litorâneo existente nesta região. O canal superior está sujeito ao transporte no sentido norte, enquanto o inferior, na direção sul, conforme apresentado por Muehe e Valentini, 1998.

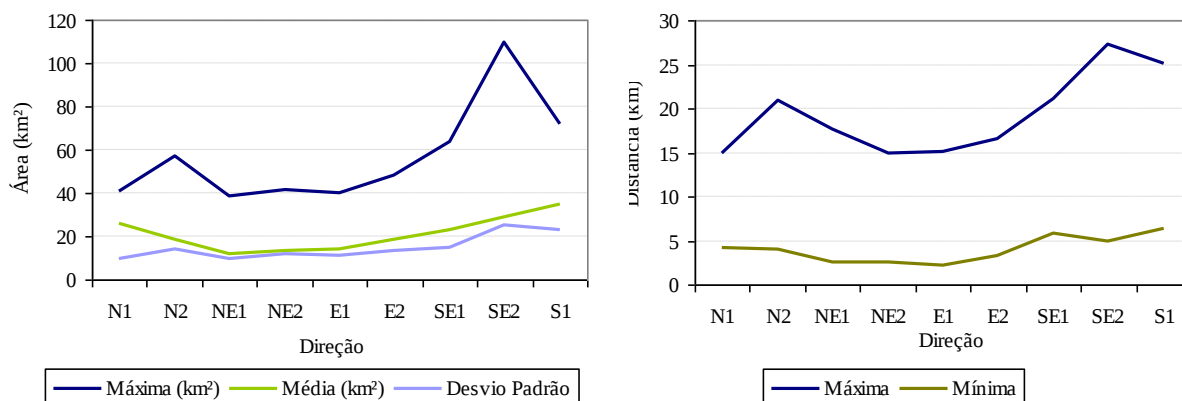


Figura 3. Gráficos de área de abrangência (à esquerda) e distância máxima (à direita) das plumas por direção.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo comprovam a viabilidade de se mapear o comportamento espaço-temporal de plumas de sedimentos costeiras associado à dinâmica hidrológica do rio através de imagens Landsat 5 e CBERS-2. O padrão e a concentração de sedimentos em suspensão na região da foz do rio Paraíba do Sul está fortemente relacionado aos dados de vazão. Já a configuração espacial da pluma é bastante influenciada por outros fatores ambientais, não analisados nesta pesquisa. Assim, uma sugestão para trabalhos futuros é analisar a influência de parâmetros meteorológicos e oceanográficos, sobretudo vento e corrente, no desenvolvimento da pluma costeira deste rio.

Referências Bibliográficas

- Antunes, M. A. H. *Adaptação do modelo de correção atmosférica 6 S – Second simulation of satellite signal in the solar spectrum*. 2003. Programa computacional.
- Bizerril, C. R. S. F.; Tosin, P. C.; Araújo, L. M. N. *Contribuição ao conhecimento da bacia do rio Paraíba do Sul – coletânea de estudos*. Rio de Janeiro: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 1998. 113 p.
- Chen, Z.; Curran, P. J.; Hansom, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. *Remote Sensing of Environment*, v. 40, p. 67-77, 1992.
- Choubey, V. K.; Subramanian, V. Spectral response of suspended sediments in water under controlled conditions. *Journal of Hydrology*, 122: 301-308, 1991.
- Esch, K. F. *Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos por sensoriamento remoto: um estudo de caso na foz do rio Paraíba do Sul*. 2010. 171 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- Holyer, R. J. Towards universal multispectral suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, v. 7, p. 323-338, 1978.
- Kritikos, H.; Yorinks, L.; Smith, H. Suspended solids analysis using ERTS-A data. *Remote Sensing of Environment*, v. 3, p. 69-78, 1974.

- Merten, G.H.; Minella, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, Porto Alegre, v. 3, n. 4, 2002.
- Miller, R. L.; McKee, B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 259-266, 2004.
- Muehe, D.; Valentini, E. *O litoral do estado do Rio de Janeiro - uma caracterização físico-ambiental*. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar, v. 1, 1998. 93 p.
- Noernberg, M. A.; Marone, E.; Angulo, R. J. Detecção de processos costeiros associados a transporte de sedimentos em um evento pós-frontal na costa do Paraná utilizando Landsat7/ETM+. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2001. p. 831-834.
- Novo, E. M. L. M.; Steffen, C. A.; Braga, C. Z. F. Results of a laboratory experiment on relating spectral reflectance to total suspended solids. *Remote Sensing of Environment*, v. 36, p. 67-72, 1991.
- Novo, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.
- Ritchie, J. C.; Cooper, C. M.; Yongqing, J. Using Landsat Multispectral Scanner Data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, v. 23, p. 65-81, 1987.
- Ritchie, J. C.; Cooper, C. M. Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediments concentration estimated from Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, v.9, n. 3, p. 379-387, 1988.
- Rouse, L. J.; Coleman, J. M. Circulation observations in the Louisiana Bight using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 5, p. 55-66, 1976.
- Tassan, S. A numerical model for the detection of sediment concentration in stratified river plumes using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 12, p. 2699-2705, 1997.
- Vermote, E.; Tanre, D.; Deuze, J. L.; Herman, M.; Morcrette, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.