

# Aspectos da distribuição de padrões de temperatura superficial da água associados à topografia da plataforma continental do estado de São Paulo através da integração de Imagens LANDSAT e Modelos Digitais de Terreno.

Luis Américo Conti <sup>1,2</sup>  
Carlos Alberto Sampaio Araújo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escola de Artes Ciências e Humanidades - USP  
Av. Arlindo Bettio, 1000. São Paulo, SP - SP, Brasil  
lconti@usp.br

<sup>2</sup> Instituto Oceanográfico - USP  
Pça. Do Oceanográfico 191. São Paulo - SP, Brasil

## Abstract.

Landsat thermal data are employed to correlate the distribution of sea-surface temperatures and topographic configuration of internal and medium continental shelf of the São Paulo State, Brazil. Despite significant restrictions on use of landsat thermal data on the determination of sea temperatures, it showed advantages compared to oceanographic satellites data due to the historical series and spatial resolution. In this work a set of 25 images was analyzed aiming the detection of occurrence of patterns of anomalous cold waters. Most of them seem to have direct relationship with the presence of bathymetrical features associated to eustatic processes such as paleo valleys and terraces.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, Plataforma Continental, Landsat, Imagens Termiais, Oceanografia, geomorfologia.

## 1. Introdução

A presença de corpos de água com temperaturas anormalmente frias na plataforma continental da região sudeste do Brasil, especialmente do estado de São Paulo, apresentam causas bem conhecidas, entretanto, sua modelagem e monitoramento ainda apresentam um grande desafio dada a natureza sinótica dos fenômenos e da diversidade temporal e espacial que tendem a ocorrer. Nesse contexto, a utilização de imagens provenientes de sensores termiais pode auxiliar na compreensão da frequência e distribuição geográfica desses fenômenos.

Além da análise da configuração espacial e temporal de massas d'água a partir da utilização de imagens de satélite, buscou-se, nesse estudo, a integração das informações de temperatura superficial com aspectos da topografia submersa, possibilitando uma base de análise entre a expressão de fenômenos oceanográficos e a geomorfologia da plataforma continental.

A área de estudo limita-se a Plataforma continental do estado de São Paulo. Geomorfologicamente, tal área faz parte do compartimento do "Embaimento de São Paulo", feição condicionada pela região do Cabo de Santa Marta (SC) ao sul e Cabo Frio (RJ) ao Norte. De maneira geral, as características geológicas e geomorfológicas da região da Plataforma Continental foram condicionadas, principalmente, por dois eventos distintos: o processo tectônico Mesozóico-Cenozóico, ligado à reativação do escudo Sul Americano, responsável pelos falhamentos que condicionaram toda a escarpa da Serra do Mar e a sedimentação decorrente das sucessivas transgressões e regressões marinhas quaternárias, responsáveis pela maior parte de sua distribuição sedimentar.

Na região, segundo Castro e Miranda (1998), implementando as idéias de Emilsson (1961, apud Castro e Miranda, *op. cit.*), é identificado o domínio de massas d'água resultantes da mistura entre: Água Tropical (AT) ( $T > 20,0$  °C e  $S > 36,40$ ; Miranda, 1982), transportada para SW pela camada superior da Corrente do Brasil (0-200m), próximo à borda da plataforma continental. Água Central do Atlântico Sul (ACAS) ( $T < 20,0$  °C e  $S < 36,40$ ; Miranda, 1982), transportada para SW, ao longo do talude continental, pela camada inferior da Corrente do Brasil, próximo à borda da plataforma continental. Água Costeira (AC), que é uma mistura da água doce continental com a água salgada.

A plataforma continental interna é ocupada, principalmente, pela AC que tende a ser verticalmente homogênea devido à mistura causada pela tensão do vento e cisalhamento da maré. Uma frente termal profunda separa as águas das plataformas interna e média. A posição dessa frente muda sazonalmente, situando-se próxima a costa no verão (10 a 20km) e afastando-se (40 a 50km) no inverno. A frente termal é mais pronunciada no verão, quando há um decréscimo de 10°C através dela. As águas da Plataforma Continental Média mostram uma estrutura em duas camadas, especialmente no verão, quando uma fina e rasa termoclina, associada à frente da plataforma interna está presente. As águas da camada de fundo, nesta situação, são identificadas como pertencentes à ACAS. As águas da plataforma continental média são separadas da Plataforma Continental Externa por uma forte frente salina, próxima à superfície. As águas são identificadas, em superfície, como AT havendo, na camada de fundo, forte influência da ACAS.

Durante os meses de primavera e verão pode ocorrer a ingressão da ACAS, pelo fundo, nas porções mais rasas da plataforma interna. Este fato implica na saída da AC, em superfície, até a isóbata de 50m. Durante o inverno a ACAS situa-se em profundidades maiores, na plataforma externa, conferindo à plataforma interna uma característica homogênea, dominada pela AC (Castro Filho *et al.*, 1987).

Durante o inverno observa-se, na plataforma interna, atingindo até a plataforma média, a influência de massa de água mais fria, vinda do sul. Essas águas apresentam salinidade baixa, característica de águas costeiras. Campos (1998), Campos *et al.* (1999), Piola *et al.* 1999 e Pimenta (2001) atribuem a origem dessa água à contribuição do Rio da Prata e de outros sistemas costeiros ao sul.

Deste modo, para a região de plataforma continental interna/média do estado de São Paulo, dentro de um contexto dominante da presença de AC e AT, é possível identificar os principais padrões de águas mais frias associados, basicamente, a três fenômenos: A ingressão de ACAS; O aporte de águas continentais associadas a desembocaduras fluviais, lagunares e, ainda, a presença de águas costeiras vindas da região sul do Brasil. Neste trabalho uma série de imagens landsat TM e ETM+ foram analisadas visando a compreensão de aspectos da distribuição de anomalias de temperaturas na plataforma continental do estado de São Paulo.

## **2. Métodos**

### **2.1. Imagens LANDSAT**

Foram utilizadas uma série de imagens Landsat de três cenas (órbita 219 ponto 77, órbita 118 ponto 77 e órbita 218 ponto 76) em um total de 25 imagens analisadas. A partir do banco de imagens, as que apresentaram peculiaridades na distribuição dos padrões de temperatura na banda TM-6 foram processadas. Cabe ressaltar que a frequência na aquisição

de imagens Landsat na região sudeste do Brasil, principalmente junto a zona costeira, apresenta um certo vício climatológico, ou seja, imagens adequadas (*i.e.* com baixa cobertura de nuvens) tendem a ser adquiridas sob condições atmosféricas similares. Bonetti Filho (1995) abordou tal questão, concluindo que para a região do litoral sul do estado de São Paulo há uma média de apenas 1 ou 2 imagens adequadas geradas por ano e, destas, quase todas são adquiridas em situação de dominância de sistemas anti-ciclônicos pré frontais nos meses de junho, julho, agosto, e setembro. Deste modo, para qualquer tipo de análise sinótica, é necessário ter-se em mente tais limitações.

A banda termal do Landsat TM-6 aplicada à determinação de padrões de circulação em águas costeiras e oceânicas foi utilizada por diversos autores (Wukelic *et al.*, 1989; Schneider e Mauser, 1996; Gubbons *et al.* 1989; ; Souza e Silva, 2005 entre outros), sendo que a dificuldade inerente a tal método reside na não linearidade de redução entre dados adquiridos pelo satélite e a temperatura real dos alvos (SST – *Sea Surface Temperature*). Acrescenta-se a isso o fato de que a radiação eletromagnética emitida pela água é resultante apenas de apenas um filme de 10  $\mu\text{m}$  da superfície (Emery *et al.* 2001) tornando a resposta altamente suscetível a variações de ondulação da superfície e ângulo de aquisição do sensor.

As informações referentes às áreas emersas foram removidas a partir do mascaramento das bandas pela banda infravermelha TM-4, restringindo as áreas de análise apenas às regiões marinhas.

Foram aplicadas nas imagens correspondentes a banda termal TM-6 filtros gaussianos e uma paleta em pseudocor de modo a facilitar a visualização dos padrões de distribuição da temperatura de brilho.

Composições coloridas também foram utilizadas para a caracterização da área costeira adjacente às áreas de estudo para facilitar a visualização do quadro geomorfológico regional.

## **2.2. Modelo Digital de terreno.**

A entrada de dados da batimetria da região de plataforma continental foi feita a partir da digitalização de pontos cotados por via de uma mesa digitalizadora. Foram digitalizados 65.296 pontos cotados oriundos de 12 folhas de bordo publicadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. A partir de tais dados, foi gerada uma grade retangular seguindo um método de interpolação “Mínima Curvatura” com dimensões de 2331 linhas por 3696 colunas e células de 100 metros de toda a região de plataforma continental, desde a linha de costa, até a profundidade de 100 metros.

Considerando-se, deste modo, um MDT como uma superfície digital foi possível a extração de uma série de atributos topográficos chamados de superfícies derivadas (*derivatives surfaces*) dentre as quais destacam-se : declividade, aspecto, curvatura além de uma superfície de tendência polinomial (detalhes do procedimento matemático pode ser encontrado em Pike, 1998). Foi possível, também, a partir da manipulação matemática das células do MDT, a geração de fluxos de drenagem. Esta técnica permite a extração de sentido de fluxo a partir da posição altimétrica de cada célula em relação a direção do maior declive às suas células vizinhas (Gallant & Wilson, 2000).

A configuração geomorfológica da plataforma foi previamente discutida por Conti & Furtado (2007) sendo que as principais estruturas topográficas reconhecidas nas áreas de PI e PM associam-se a eixos de paleo vales escavados em períodos regressivos, associados a eventos glaciais e terraços associados à paleo linhas de costa (terraços de abrasão e construção).

### 3. Resultados e Discussão

Foram reconhecidos, a partir das análises das imagens termais, três padrões espaciais de distribuição de padrões anômalos de águas frias junto à plataforma interna e média do estado de São Paulo. O primeiro padrão foi observado em 4 imagens e representa o aporte de águas continentais mais frias junto a costa, principalmente em desembocaduras lagunares e fluviais associadas ao rio Ribeira de Iguape e ao Sistema Estuarino Lagunar de Cananéia Iguape.

O sistema apresenta duas desembocaduras: Uma a norte, junto à cidade de Iguape, é chamada de “Barra de Icapara”, e outra, aproximadamente a 80 km ao sul, conhecida como “Barra de Cananéia”. Na região da Barra de Icapara também desemboca o rio Ribeira de Iguape, maior curso fluvial da região costeira do estado de São Paulo. Nesta área foi notada a presença de plumas de águas mais frias em três imagens das 17 analisadas, sendo que, em comum, apresentam baixos níveis de pluviosidade nos 10 dias que antecederam o imageamento. A figura 1 mostra a imagem da região em níveis de pseudocor na banda TM-6 conjuntamente com uma composição colorida TM 432 na área emersa adquirida em 1º de Junho de 1991 em uma situação típica de pluma bastante delimitada dentro de um contexto de águas mais quentes, por mais de 20 km mar adentro, em regiões com profundidades de até 23 metros.

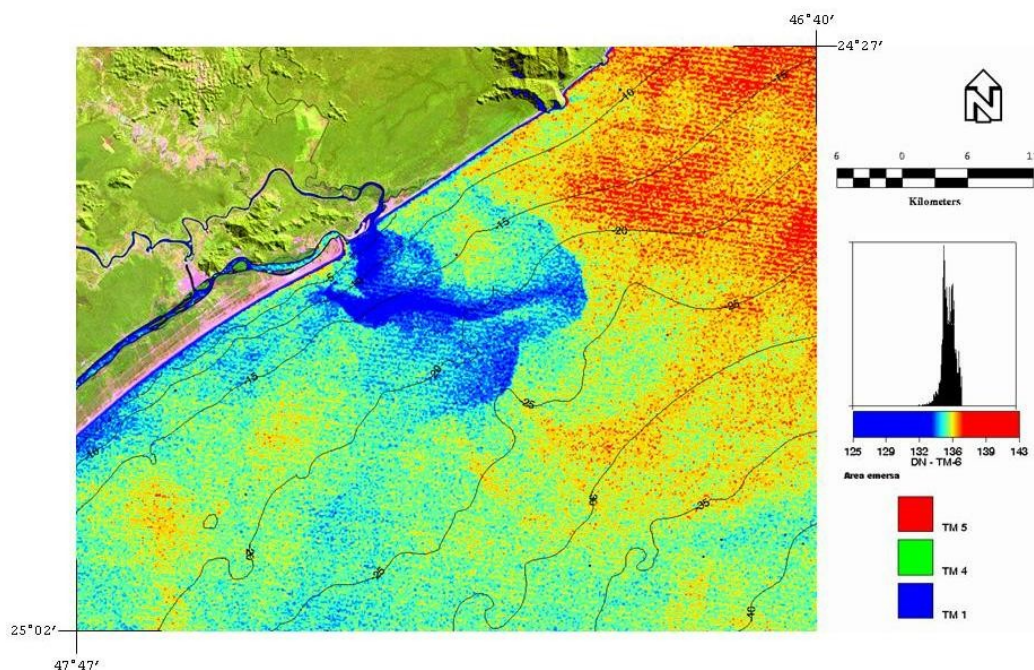


Figura 1 – Configuração da pluma de águas mais frias (tons de azul) da região da barra de Icapara e da desembocadura do Rio Ribeira de Iguape

Observa-se que os níveis de cinza (ou “*Digital Numbers*” DN) da pluma são compatíveis com os do Rio Ribeira de Iguape, sendo que dentro do sistema estuarino, os valores de resposta apontam para uma temperatura consideravelmente mais alta. O mesmo padrão aparece nas imagens adquiridas em 22/06 de 1993 e 17/07 de 2008. Foi constatado que em todas as imagens, além da pluma dissipada diretamente a frente da desembocadura do rio Ribeira de Iguape, há uma segunda frente de dissipação divergindo para sul, a aproximadamente 5 quilômetros do estuário. A partir da integração das imagens com o modelo digital de terreno, foi possível observar uma clara correlação entre esta feição e um conspicuo canal escavado em plataforma, associado ou a uma posição pretérita do Rio Ribeira

de Iguape ou a uma paleo desembocadura do sistema estuarino lagunar em uma situação de nível do mar ascendente. Na imagem de 2008 este condicionamento topográfico é ainda mais claro. A figura 2 apresenta um perfil paralelo a linha de costa junto à profundidade de aprox. 15 metros correlacionando a batimetria da plataforma e os DN's da banda TM6 em que é clara a correlação entre profundidade e temperatura superficial da água

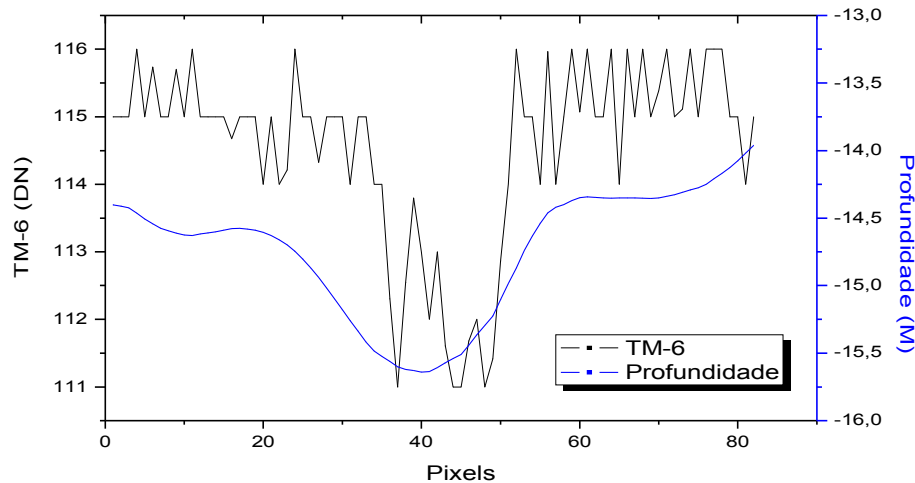


Figura 2 – Correlação entre a batimetria (linha azul) e DN da banda TM-6 (linha preta) da imagem de 2008 em um perfil paralelo a linha de costa junto a profundidade de aproximadamente 15 metros.

Na desembocadura sul do Sistema Estuarino, junto à Barra de Cananéia, em apenas em uma imagem, adquirida em setembro de 1986, um núcleo de águas mais frias se faz presente junto à região de desembocadura. Apresenta níveis de cinza consideravelmente mais baixos do que o entorno. Ao contrário da região de Icapara, não há a correspondência dos níveis de cinza da pluma de água fria com os níveis de brilho de dentro do Sistema Estuarino, indicando uma origem em maiores profundidades, provavelmente oceânica. A topografia desta região apresenta a predominância de bancos arenosos associados à dinâmica da desembocadura do sistema estuarino lagunar, destacando-se a presença de um delta de maré vazante descrito por Bonetti Filho *et al.*, 1995.

Situação semelhante ocorre na região da plataforma continental centro-norte do estado, junto à região da Ilha de São Sebastião (município de Ilhabela). Em uma das imagens, obtida em setembro de 1994, foi possível identificar uma frente de águas mais frias ingressando da região de Plataforma Continental Média para dentro do Canal de São Sebastião. Observa-se que tal padrão é bastante restrito às regiões próximas à costa de Ilha de São Sebastião. Na mesma cena imediatamente à norte, na região de Ubatuba em uma imagem adquirida na mesma data, há um claro núcleo de afloramento de águas frias junto a Ilha Anchieta.

Para ambas as regiões, a presença da infiltração de ACAS parece ser a explicação mais provável para a presença de água mais fria, uma vez que tais áreas não apresentam proximidades com desembocaduras fluviais relevantes como no caso do Rio Ribeira de Iguape. Diversos trabalhos descrevem a dinâmica de intrusão de ACAS junto ao canal de São Sebastião em situações típicas de primavera e verão (Miranda e Castro, 1995; Silva *et al.* 2001 e Silva *et al.* 2004) em conformidade com a distribuição de temperaturas mais baixas das imagens (Figura 3).

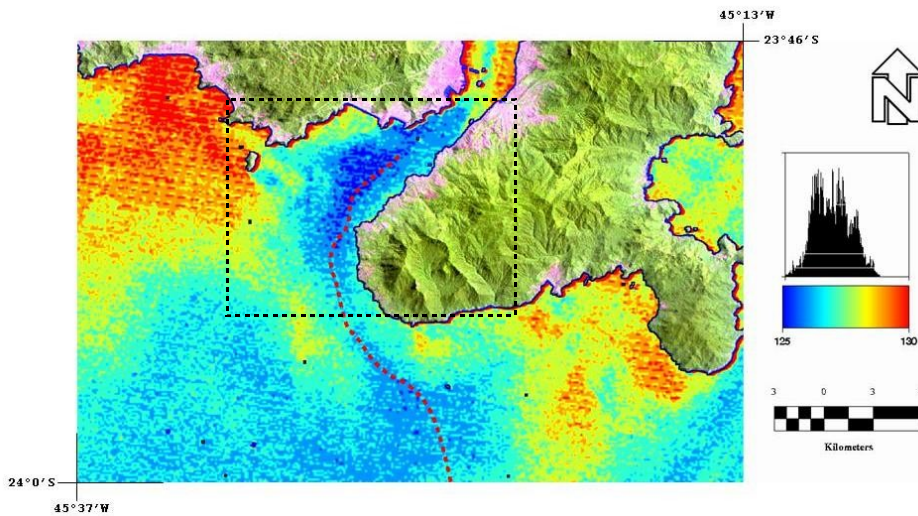


Figura 3 – Configuração da presença de águas mais frias (tons de azul) da região do Canal de São Sebastião e plataforma continental adjacente. O traço vermelho indica o eixo de um paleo vale derivado do MDT. A região mostrada dentro do quadro pontilhado é apresentada na figura 4.

No caso da Imagem da área de São Sebastião, o MDT mostra uma feição prolongada de um paleo vale, descrito em trabalhos como o de Furtado *et al.* 1996 e Conti 2008 como sendo um prolongamento da captação dos rios associados à Planície costeira de Caraguatatuba. Tal feição, aparentemente, exerce um controle físico sobre a dinâmica de infiltração desta água para dentro do Canal de São Sebastião (canal que separa a Ilha de S. Sebastião do Continente) por profundidades maiores, aflorando à superfície na porção sul do canal. A figura 4 mostra um modelo em 3D da região interna do canal mostrando a correlação com as áreas mais frias (em tons escuros) projetados sobre ao modelo batimétrico.

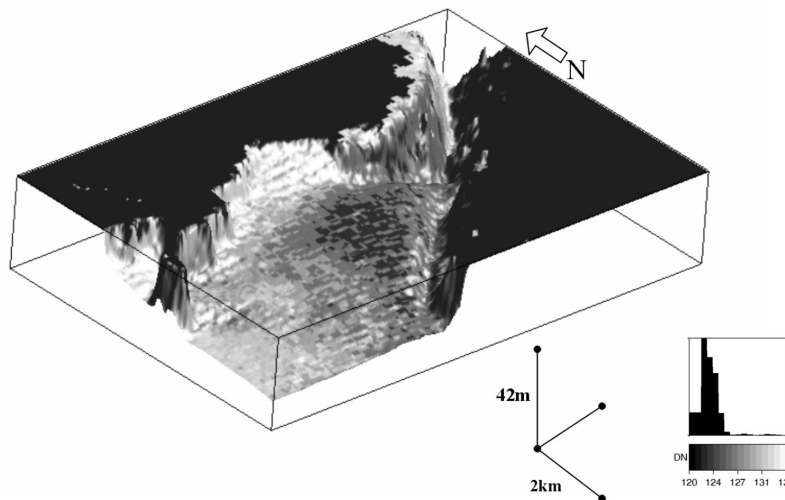


Figura 4 – Modelo em 3D da batimetria da porção sul do canal de São Sebastião (indicado na figura 3) com os valores de DN da banda TM-6 de 1994 projetados sobre o fundo.



Outro padrão de águas mais frias também aparecem de maneira bastante clara na imagem do litoral norte do estado, junto à plataforma continental média adquirida em 08 de Agosto de 2007. A distribuição deste padrão é mais esparso geograficamente e possui uma forma bastante característica de um giro anti-horário proveniente de sul. As condições atmosféricas próximas às datas de aquisições das imagens, analisadas a partir de cartas sinóticas, indicam uma forte influência de uma massa de ar polar, associada à passagem de uma frente fria 48 horas antes da passagem do sensor. Deste modo é possível aferir a relação desta água mais fria com fluxos gerados por ventos associados ao deslocamento deste sistema anti-ciclônico. Há, entretanto um sutil, porém visível condicionamento da presença desta feição por um sistema de “escarpamentos” associados a terraços de paleo níveis marinhos em profundidades de aproximadamente 25 metros que parece limitar a circulação para áreas mais costeiras.

### 3. Conclusões

Embora análises de imagens termais do sensor Thematic Mapper apresentem diversas limitações para estudos marinhos e costeiros, entre quais se destaca a impossibilidade de estabelecimento de correlação direta com SST devido à interferência atmosférica e à recorrência de aquisição de imagens sobre condições climatológicas “viciadas”, podem ser de grande valia para a compreensão de fenômenos oceanográficos principalmente devido a uma alta resolução espacial (em comparação a maior parte dos satélites oceanográficos) e uma vasta série histórica de imagens.

Foi possível observar, a partir dos registros das imagens analisadas, que a distribuição anômala de águas frias na plataforma continental do estado de São Paulo pode estar ligada à presença de águas costeiras, influências de ACAS ou mesmo transporte de massas de água vindo de sul. Tais padrões possuem diferentes regimes de recorrência e expressão geográfica o que pode ser aferido a partir da análise dos padrões de brilho da banda TM-6 do satélite Landsat.

Em fenômenos de expressão local, tal como a pluma de águas mais frias junto à desembocadura de sistemas fluvio lagunares, ou infiltração e afloramento de ACAS, a topografia da plataforma continental, determinada em grande parte por eventos eustáticos ao longo do Quaternário, parece estabelecer algum controle sobre a configuração e distribuição espacial de massas de água na região de plataforma continental.

### 4. Referências Bibliográficas

- Bonetti Filho, J. 1995 *Transporte de Sedimentos por Suspensão nas Proximidades da Barra de Cananéia -SP*. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico –USP.
- Bonetti Filho, J; Conti, L.A. ; Furtado, Valdenir Veronese. 1995 Tidal currents relations to suspended sediment transport in a microtidal estuarine system. *Anais da Acad. Bras. Ciencias*, Brasil, (68). 3, pp. 485-494.
- Campos, E.J.D. 1998. A circulação em meso e larga escalas na Bacia de Santos. In: FUNDESPA (ED.) *Características oceanográficas da região costeira do Estado de São Paulo*, S. Paulo, SP. Cap. II, p: II-1 – II-16.
- Campos, E.J.D.; Lentini, C.A.D.; Miller, J.L. & Piola, A.R. 1999 Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. *Geophysical Research Letters*, 26 (14): 2061-2064.
- Castro Filho, B.M. de ; Miranda, L.B. ; Myao, S.Y. –1987- Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e m média escala. *Bolm. Inst. Oceanogr. São Paulo*, 35(2):135-151.

- Castro Filho, B.M. de & Miranda, L.B. de -1998- Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S. Coastal segment
- Conti, L.A. & Furtado, V V 2007 Geomorfologia da Plataforma Continental do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, v. 32: 12-31
- Emery, W. J., Castro, Sandra, Wick, G. A., Schluessel, Peter and Donlon, Craig. 2001. Estimating Sea Surface Temperature from Infrared Satellite and *In Situ* Temperature Data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 2773-2785
- Furtado, V.V.; Bonetti Filho, J. & Conti, L.A. 1996. Paleo River Valley Morphology and Sea Level Changes at Southeastern Brazilian Continental Shelf. *An. Ac. Bras. Ci.* 68 (supl. 1): 163-169, Rio de Janeiro, RJ
- Gallant, J. C. & Wilson J. P. 2000. Primary Topographic Attributes. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. J. P. Wilson, Gallant, J. C. New York, John Wiley and Sons: 51-85
- Gibbons, D.E. Wukelic, G.E. Leighton, J.P., and Doyle, M.J., 1989. Application of Landsat Thematic Mapper Data for Coastal Thermal Plume Analysis at Diablo Canyon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol. 55 (6). 903-909
- Miranda LB & Castro BM. 1995. Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP). *Publção esp. Inst. Oceanogr., S. Paulo*, 11(1-9).
- Pimenta, F.M. –2001- Estudo numérico da influência da descarga fluvial e dos ventos sobre a dinâmica da pluma do Rio da Prata. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 127p.
- Pike, R.J. 1988: The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology* 20, 491–511
- Piola, A.R.; Campos, E.J.D. Möller Jr, O.; Charo, M. & Martinez, C. 1999 Continental shelf water masses off eastern South America –20° to 40° S. 10th Symposium on Global Changes Studies, Dallas, TX p:9-12.
- Schneider, K., and Mauser, W., 1996, Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement: *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 2027–2041.
- Silva L dos S, Miranda LB de & Castro BM. 2001. Relatório do Projeto "Oceanografia da Plataforma Interna de São Sebastião" (OPISS). *Rel. Téc. Inst. Oceanogr.*, (47): 1-31.
- Silva L dos S, Miranda LB de & Castro BM. 2004 Estudo numérico da circulação e da estrutura termohalina na região adjacente à ilha de São Sebastião (SP). *Rev. Bras. Geof.* vol.22 no.3 São Paulo
- Souza, J.D. e Silva, B.B. 2005. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM – Landsat-5. *Revista Brasileira de Geofísica*. 23(4): 349-358
- Thomas, A., Byrne, D., & Weatherbee, R. (2002). Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 81, 262– 272.
- Wukelic GE, Gibbons DE, Martucci LM & Foote HP. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. *Remote Sensing of Environment*, 28: 339–347.