

Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil.

Lilian Anne Krug¹
Mauricio Almeida Noernberg¹

¹Centro de Estudos do Mar - UFPR
Caixa Postal 50002 - 83255-000 – Pontal do Paraná, Brasil
licakrug@ufpr.br, m.noernberg@ufpr.br

Abstract. Satellite images offers, at low costs, bathymetric maps of areas that are difficult to cover for traditional hydrographic methods. In the north area of the Estuarine Complex of Paranaguá the last bathymetric update was made in the 50's, and in the inner part of the Guaratuba Bay there are no bathymetric data. A bathymetric mapping of these areas, even without the nautical chart's accuracy, will be useful for planning studies, environmental modeling and small boats navigation. In this work, different ranges of depth bathymetric data and different compositions of a Landsat 7 – ETM+ image were correlated. With this in hands, were selected the Normalized Differenced Water Index as the better model which obtained the highest correlation value with a range of 0,36 m to 4,5 m of depth. The application of this method is easy and could be very useful in regions where do not exist bathymetric data or need be up to date. The maps obtained here are very faithful to shallow areas, mainly considering that nearly 75% of the Estuarine Complex of Paranaguá and 30% of the Guaratuba Bay have depths smaller than 5 m.

Palavras-chave: Landsat, bathymetry, estuaries, Landsat, batimetria, estuários.

1. Introdução

Nos estuários ocorrem importantes processos de mistura da água continental e oceânica. Como zonas de transição entre ambientes marinhos e fluviais, terrestres e aquáticos estão sujeitos a transformações nas mais diversas escalas de tempo e espaço. A Baía de Guaratuba e o Complexo Estuarino de Paranaguá são os dois sistemas estuarinos do litoral do Paraná. De grande importância sócio-econômica e ambiental, neles situam-se as APAs de Guaraqueçaba e Guaratuba, o Parque Nacional de Superagui, a Estação Ecológica da Ilha do Mel, além das cidades de Guaratuba, Matinhos, Guaraqueçaba, Morretes, Antonina e Paranaguá com seu porto, o maior exportador de grãos da América Latina.

Levantamentos batimétricos são cruciais para a navegação em qualquer corpo aquoso, além de serem necessários para as modelagens hidrodinâmicas e acompanhamento de processos de erosão ou assoreamento. Os levantamentos batimétricos por ecobatímetro são lentos e de alto custo, uma vez que necessitam de embarcação e pessoal capacitado. Uma alternativa para a obtenção de batimetria em áreas rasas é a extração desta informação a partir de imagens obtidas por sensores remotos. Esse procedimento tem se mostrado eficaz, especialmente quando se utiliza imagens de satélites multiespectrais (Lyzenga, 1978; Philpot, 1989; Nordman et al., 1990).

Apesar de diversos trabalhos realizados em ambos os estuários, pouco se sabe a respeito da batimetria no setor norte do CEP e à montante da Baía de Guaratuba. Os últimos levantamentos batimétricos realizados nestes estuários não cobrem tais áreas devido a pouca profundidade. Um mapa batimétrico atualizado e completo destes locais, mesmo sem a acurácia das cartas náuticas será de utilidade tanto para o planejamento de estudos e modelagem ambiental, quanto para a navegação de embarcações de pequeno porte.

2. Extração de batimetria a partir de imagens de satélite

A capacidade preditiva das imagens de satélite no mapeamento de propriedades da água vem sendo demonstrada em diversos estudos, com vários graus de sucesso (Baban, 1997). Imagens

de satélites provêm, a baixos custos, mapas batimétricos de áreas que são difíceis de mapear por meios hidrográficos tradicionais devido à sua extensão ou seu relevo submerso complexo. Em geral, o uso de dados de imagem Landsat no mapeamento batimétrico apresenta algumas vantagens. As imagens dos satélites Landsat fornecem cobertura bidimensional contínua melhor que as séries de pontos de profundidade que geralmente são obtidas por medições feitas a bordo de barcos. A repetição da cobertura pode ser feita a cada 16 dias, permitindo a separação de feições permanentes de outras não permanentes, tais quais qualidade da água e variações atmosféricas. A repetitividade da cobertura também permite atualizações de profundidades em regiões arenosas, as quais podem mudar por processos de erosão e deposição ao longo do tempo ou depois de seguidas tempestades (Nordman et al., 1990).

Após a eliminação dos efeitos da atmosfera e de maré, a imagem contém informações a respeito do tipo de fundo (para regiões óticamente rasas), dos constituintes da água e da profundidade da coluna d'água.

A maior parte dos métodos encontrados na literatura para a extração de profundidade trabalha com valores de radiâncias recebidos pelo sensor. Uma forma de transformar o valor digital (digital number - DN) do pixel em valores de radiâncias é através da equação (Accioly et al., 2002):

$$L_{di} = L_{imin} + [(L_{imax} - L_{imin}) / 255] * DN \quad (1)$$

onde L_{di} é a radiância observada pelo sensor na banda i ; L_{imin} , a radiância mínima recebida pelo sensor, e L_{imax} , a radiância máxima observada pelo sensor, estimadas de acordo com a área de estudo para cada banda para imagens Landsat 7 – ETM+. Estes valores estão disponíveis no manual do usuário (NASA, 2004).

O modelo mais simples de extração de profundidade trabalha com transferência de radiâncias, segundo Philpot (1989), de forma geral:

$$L_d = L_b \exp(-gz) + L_w \quad (2)$$

onde L_d é a radiância observada pelo sensor; g o coeficiente de atenuação efetiva da água; z a profundidade da coluna d'água; L_b é a reflectância do fundo e L_w a radiância observada sobre água óticamente profunda.

Ao utilizar este modelo, assume-se que as propriedades óticas da água são verticalmente homogêneas, bem como, consideram-se constantes sobre a cena: a iluminação, a transmissão atmosférica, o trajeto da radiância, o estado do mar, a reflectância da água, a reflectância do fundo e a atenuação efetiva da água. Assim, presumindo-se que os parâmetros L_b , L_w e g são constantes sobre a cena, e conhecendo os valores de L_d para uma ou mais profundidades, pode-se encontrar os valores de L_b e g . Sempre que L_w é tomado como constante, o procedimento usual é linearizar a equação (2), definindo, desta forma, uma nova variável (X), a qual varia linearmente com a profundidade:

$$X = \ln(L_d - L_w) = \ln(L_b) - gz. \quad (3)$$

Outro método desenvolvido para delinear feições na água e realçá-las em uma imagem de satélite multispectral é o Índice de Diferença Normalizada da Água (Normalized Difference Water Index – NDWI). O NDWI faz uso do sinal refletido nas regiões do infra-vermelho próximo e do verde visível para realçar a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (McFeeters, 1996). O índice é calculado por:

$$(DN_2 - DN_4) / (DN_2 + DN_4), \quad (8)$$

onde DN_2 é o valor digital do pixel na banda 2, correspondente da faixa verde do espectro visível e DN_4 , valor digital na banda 4, região do infra-vermelho próximo.

De acordo com McFeeters (1996), a seleção destas bandas tem a intenção de: (1) maximizar a reflectância típica de feições na água nos comprimentos de onda relativos ao canal verde; (2) minimizar a baixa reflectância no infra-vermelho próximo de feições na água; e (3) utilizar a alta reflectância no infra-vermelho próximo por feições de vegetação terrestre e solo.

3. Área de Estudo

A costa paranaense, sul do Brasil, possui dois corpos d'água principais limitados pelo Oceano Atlântico e pelas escarpas da Serra do Mar. O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), situado ao Norte, com 551,8 km² de superfície líquida (Noernberg et al., 2004) e a Baía de Guaratuba ao Sul, com 50,19 km² (Angelotti et al., 2002) (**Figura 1**). Trata-se de ambientes de extrema importância, onde coexistem extensos manguezais preservados, atividades portuárias, concentrações urbanas, pesca artesanal e comercial, além de atividades de recreação e turismo. A cobertura vegetal integra uma das áreas mais preservadas da Mata Atlântica brasileira e as bacias de drenagem litorânea possuem um elevado poder erosivo, decorrente da alta instabilidade natural dessas regiões de serras e morros (Noernberg, 2001).

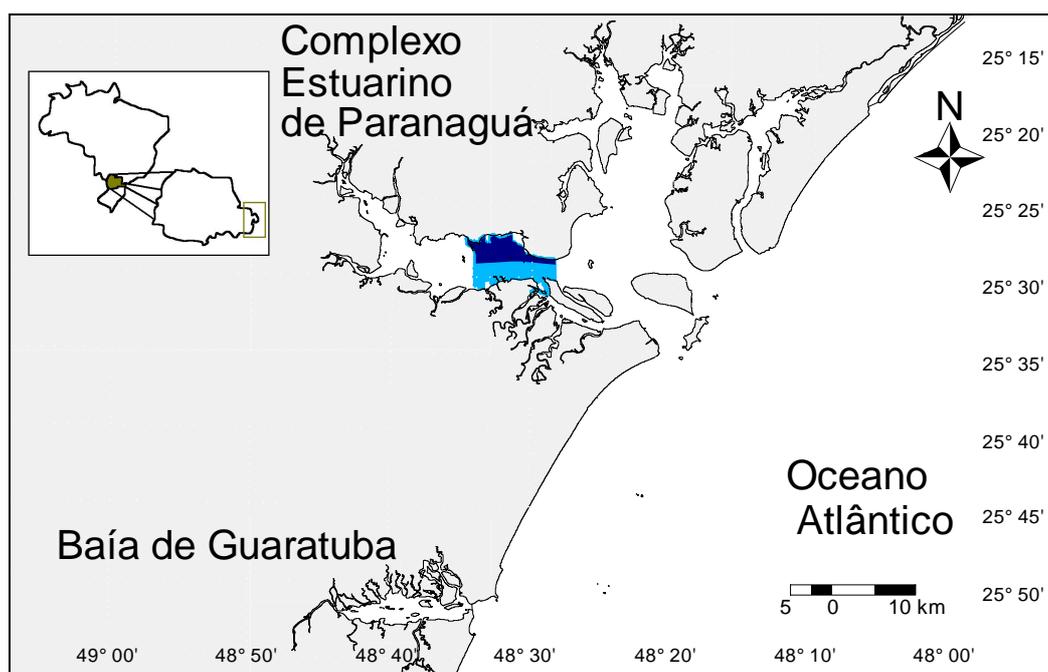


Figura 1 – Imagem em NDWI dos sistemas estuarinos do litoral paranaense. A área destacada em frente à Paranaguá foi utilizada na correlação entre os dados batimétricos e os valores digitais.

As feições deposicionais arenosas, submersas e semi-submersas, chamadas genericamente de baixios, interpretadas como deltas de maré e feições assemelhadas cobrem 75% da área do CEP com profundidade inferior a 5 m (Noernberg, 2001), enquanto na Baía de Guaratuba esse valor é de 30% (Angelotti et al., 2002).

4. Materiais e Métodos

4.1. Imagem Landsat 7

A imagem utilizada no presente trabalho foi uma Landsat 7- ETM+ de 26 de setembro de 1999. Antes de trabalhar com os valores digitais da imagem, foi necessário eliminar os efeitos da atmosfera sobre a imagem. Para isso, utilizou-se o método de regressão de bandas, o qual utiliza o termo independente da equação da reta, obtido a partir da regressão linear da banda 4 com as bandas 1, 2 e 3, como o valor a ser subtraído de cada banda, o qual corresponde ao efeito da atmosfera (Mather, 1987). No processamento da imagem foi utilizado o aplicativo ER-Mapper.

4.2. Levantamento batimétrico

Em agosto de 1998, a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) realizou um levantamento hidrográfico por ecobatímetro que cobriu o setor em frente ao porto de Paranaguá, com 10.345 pontos amostrais no total, e profundidades variando entre 0,3 e 28 m. Foram utilizados os valores batimétricos da área mais rasa desse setor (média de 5 m de profundidade). Esses pontos foram correlacionados com os valores digitais correspondentes extraídos da imagem Landsat.

As profundidades obtidas em levantamentos hidrográficos incluem a variação da maré no instante da medição. Esta variação da maré muda de local para local, de acordo com as condições locais. Para corrigir o efeito adota-se um plano de referência, denominado nível de redução, em relação ao qual todas as profundidades obtidas são referidas a uma maré mínima de sizígia. Desta forma, as profundidades utilizadas na confecção das cartas náuticas correspondem à menor maré de sizígia. Com isto, garante-se que a embarcação não encontrará profundidades menores que as representadas nas cartas náuticas.

O levantamento batimétrico utilizado foi devidamente corrigido em relação ao nível de referência da mínima maré. Posteriormente, foi adicionada a altura da maré no momento da aquisição da imagem, permitindo a comparação dos valores digitais da imagem com a profundidade real no momento da aquisição.

4.3 Processamento dos dados

Com os dados do levantamento batimétrico corrigidos, construiu-se um modelo digital do terreno (DEM), malha de 30 m x 30 m, para ser cruzado com a imagem com o objetivo de comparar com os valores digitais das 5 bandas.

Os valores de profundidades foram correlacionados com as bandas 1, 2, 3, 4 e 5 individualmente, com diferentes razões as bandas, com o Índice de Diferença Normalizada da Água e, ainda, com os valores de radiância das bandas 3 e 4. Os intervalos de profundidade foram selecionados na medida que aumentasse a correlação. Foram testados intervalos que continham limites de profundidades mínimos de 0,36 m, 0,50 m e 0,80 m e limites máximos de 3,9 m, 4,1 m, 4,5 m, 5 m, 6 m, 8 m, 10 m, 15 m e 28,8 m.

5. Resultados

Foram analisados os valores de correlação acima de 0,700, levando em conta ainda os coeficientes de determinação (R^2), os quais mostram o quanto os valores digitais (ou de radiância) podem ser explicados pelas tendências de regressão. Alguns coeficientes de correlação de Pearson (r) em diferentes intervalos de profundidade estão listados na **tabela 1**.

	Intervalo de profundidade (m)	r	R ²	Intervalo de profundidade (m)	r	R ²
banda 3	0,36-4,1	-0,755	0,647	0,36-4,5	-0,735	0,638
banda 4	0,36-4,1	-0,808	0,732	0,36-4,5	-0,795	0,734
b2/b4	0,36-4,1	0,863	0,743	0,36-4,5	0,844	0,744
b3/b4	0,36-4,1	0,845	0,726	0,36-4,5	0,824	0,725
NDWI	0,36-4,1	0,826	0,741	0,36-4,5	0,814	0,746
Radiância Banda 4	0,36-4,1	-0,864	0,746	0,36-4,5	-0,854	0,729

Tabela 1 – Valores de correlação e de coeficientes de determinação em algumas composições de bandas testadas.

Entre as composições avaliadas o NDWI apresentou o melhor coeficiente de determinação em um maior intervalo de profundidades. O NDWI apresentou uma tendência logarítmica em relação à variação da profundidade (**Figura 2**).

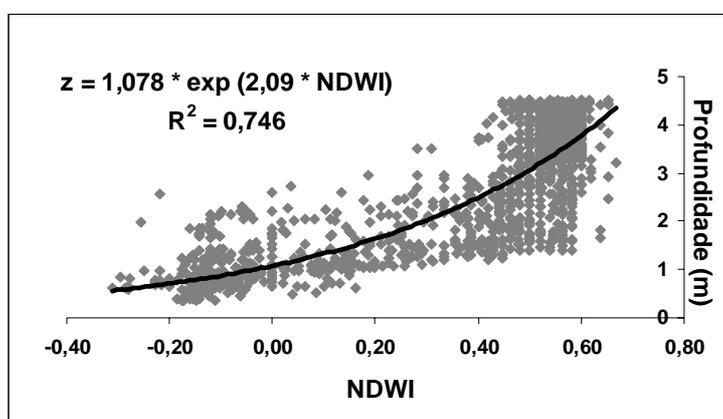
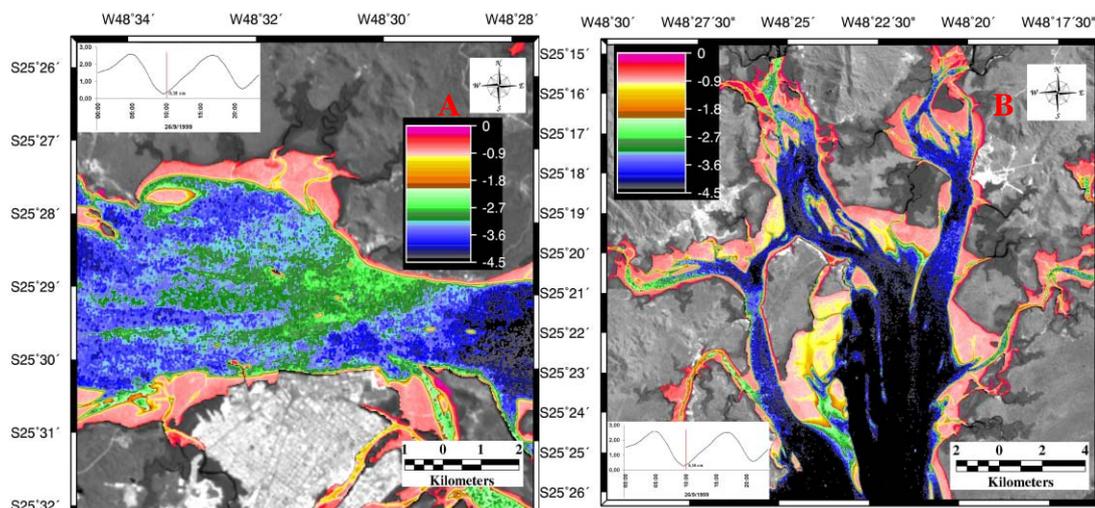


Figura 2 - Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação à variação de profundidade.

O modelo obtido foi aplicado tanto para a região de batimetria conhecida, em frente ao porto de Paranaguá, como para o setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá e na Baía de Guaratuba (**Figura 3**).



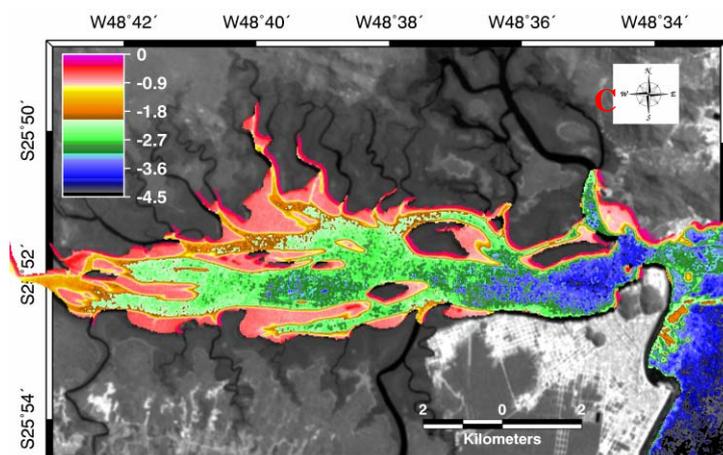


Figura 3 – Mapas batimétricos gerados a partir do modelo utilizando o Índice de Diferença Normalizada da Água para o setor em frente ao porto de Paranaguá (A), o setor norte do CEP (B) e para a Baía de Guaratuba (C).

A variação da resposta do modelo com o aumento da profundidade foi avaliada pela análise dos erros médios para diferentes faixas de profundidade (**Tabela 2**). A análise do padrão de erros (**Figura 4**) mostra que no primeiro metro a diferença entre a profundidade verdadeira e a estimada são pequenas, isso porque até essa profundidade a resposta que o sensor recebe é principalmente do sedimento de fundo. No intervalo de profundidade entre 1 e 3 metros os erros apresentam uma variação maior. Nesse intervalo, a resposta recebida pelo sensor tem a influência tanto da coluna d'água quanto do fundo. A partir dos 3 metros de profundidade a influência do fundo diminui consideravelmente, ressaltando a influência da coluna d'água. A partir daí o erro aumenta à medida em que a profundidade cresce, pois a tendência do modelo é linearizar a partir do momento em que a reflectância do fundo não é mais significativa.

Profundidade (m)	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
0,36 - 1 m	0,28	0,38
1 - 2 m	0,81	0,56
2 - 3 m	0,77	0,50
3 - 4 m	0,41	0,42
4 - 4,5 m	0,94	0,51

Tabela 2 – Erros médios para os métodos de Índice de Diferença Normalizada da Água.

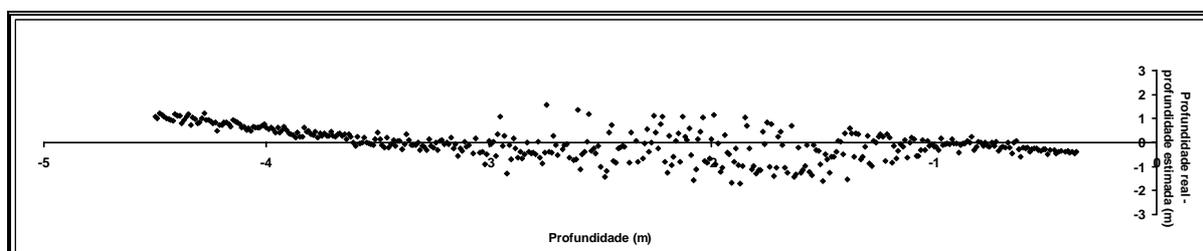


Figura 4 – Padrão dos erros para modelo do Índice de Diferença Normalizada da Água com intervalo de profundidades entre 0,36 e 4,5 m.

6. Discussão e Conclusões

A condição de maré baixa no momento de aquisição da imagem pode ter contribuído para o resultado, aumentando os valores de correlação do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), o qual toma como vantagem as diferenças entre as reflectâncias de comprimentos de ondas dos canais verde e infra-vermelho próximo.

Nos mapas gerados pelo NDWI, especialmente na Baía de Guaratuba, nota-se a interferência do material em suspensão nas partes mais profundas, o que dificulta a análise batimétrica, entretanto as regiões de baixios encontram-se bastante definidas. McFeeters (1996) já destacava que o método pode ser utilizado para quantificar a turbidez na água. Distinguir diferentes variações causadas por alterações na profundidade da água, pelo tipo de fundo e pelo espalhamento e absorção na coluna d'água por material em suspensão é o grande desafio quando se trata de extração de batimetria por imagens de satélite em áreas costeiras e estuarinas. O ideal é que essas influências possam ser identificadas e quantificadas e desta forma, consideradas no modelo. Islam et al. (2004) utilizam diferentes camadas de profundidade de penetração da radiação eletromagnética para quantificar parâmetros como a qualidade da água. Tal método pode ser uma alternativa para identificar e separar os diferentes variáveis que influenciam na resposta recebida pelo sensor.

Embora estas variáveis sejam significativas no interior dos estuários analisados, as variações mais relevantes são as causadas por alterações devido à profundidade, tipo de fundo e material em suspensão na água. Em estuários, as correntes de maré são potenciais causadores de processos de ressuspensão de sedimentos de fundo, gerando aumento de materiais em suspensão na coluna d'água, sendo estes provavelmente o fator limitante do intervalo de profundidades possíveis de serem determinados. Diferentemente de regiões de águas com menor concentração de sólidos em suspensão onde a extração da batimetria pode chegar a profundidades de 20 metros (Green et al., 2000).

O tipo de sedimento do fundo foi um parâmetro considerado como constante no modelo. Contudo, sabe-se que a composição do fundo na área utilizada como base, em frente ao porto de Paranaguá, consiste basicamente de silte médio enquanto que no setor norte do CEP e na Baía de Guaratuba, predominam a areia muito fina e areia fina, respectivamente. Esta variação na composição do fundo certamente é um aspecto que contribui na variabilidade dos resultados e que necessita ser estudado com maior detalhamento. A aplicação de modelos de análise da granulometria a partir de imagens (Ryu et al., 2004) pode ser uma alternativa, embora a aplicação desses modelos necessite uma boa malha de pontos com dados dos sedimentos.

O valor de correlação de Pearson entre os valores de profundidade estimados pelo modelo e as profundidades verdadeiras foi de 0,83. Green et al. (2000) encontraram valores entre 0,52 e 0,91 em quatro métodos testados em ambiente de recifes de coral onde a água possui menor turbidez. Isto pode ser considerado um bom resultado dado às características ópticas das águas estuarinas.

A aplicação deste método, de fácil execução, pode ser de grande valia para regiões onde não existam dados batimétricos ou estes estejam desatualizados, como locais onde ocorrem variações morfológicas subaquáticas. Os mapas resultantes são bastante fiéis dentro do range de 0,36 m a 4,5 m de profundidade. Isto é bastante significativo visto que aproximadamente 75% da área do CEP e 30 % da Baía de Guaratuba apresentam profundidade inferior a 5 m.

Dados de sensoriamento remoto podem prover uma contribuição valorosa na batimetria em áreas estuarinas. Entretanto, as condições ambientais podem ter uma maior influência na acurácia da técnica e necessitam ser consideradas quando da aplicação de modelos. Mesmo sem a acurácia das cartas náuticas, mapas como os gerados neste trabalho são de utilidade tanto para o planejamento de estudos e para a modelagem ambiental, quanto para a segurança da navegação de embarcações de pequeno porte.

7.Referências Bibliográficas

- Angelotti, R.; Noernberg, M.A.; Araújo, A.D.; Lautert, L.F.C. Elaboração de um banco de dados georreferenciado como subsídio à análise da evolução e dinâmica da costa paranaense. **Anais do X Evento de Iniciação Científica - EVINCI**. 2002. p. 39.
- Accioly, L. J. De O.; Costa, T. C. e C. da; Oliveira, M. A. J. de; Silva, F. H. B. B. da; Burgos, N. **O papel do Sensoriamento Remoto na avaliação e no monitoramento dos processos de desertificação do semi-árido brasileiro**. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/download/pa_ma_01.PDF>. Acesso em: 03 maio 2004.
- Baban, S. M. J. Environmental Monitoring of Estuaries; Estimating and Mapping Various Environmental Indicators in Breydon Water Estuary, U. K., Using Landsat TM Imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 44. 1997. p. 589-598.
- Green, E.P.; Mumby, P.J.; Edwards, A.J.; Clark, C.D. **Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management**. Coastal Management Sourcebooks 3. UNESCO, Paris. 2000. 316 pp.
- Islam, A.; Gao, J.; Ahmad, W.; Neil, D.; Bell, P. A composite DOP approach to excluding bottom reflectance in mapping water parameters of shallow coastal zones from TM imagery. **Remote Sensing Environment**. 92. 2004. p. 40-51.
- Lyzenga, D. R. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. **Applied Optics**, Vol. 17, 3, 1978. p. 379-383.
- Mather, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Nova York: Willey. 1987. 352 pp.
- McFeeters, S. K. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". **Int. Journal of Remote Sensing**, 17 (7). 1996. p. 1425-1432.
- NASA, Landsat 7 – ETM+: **Science data users handbook**. Disponível em: <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/FAS/handbook/handbook_toc.html>. Acesso em: 03 maio 2004.
- Noernberg, M.A. Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados in situ e Landsat-TM. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2001. 179 pp.
- Noernberg, M. A.; Lautert, L. F. C.; Araújo, A. D.; Marone, E.; Angelotti, R.; Netto Jr., J. P. B.; Krug, L. A. Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex –Brazil. **Journal of Coastal Research**. Special Issue 39. 2004.
- Nordman, M. E.; Wood, L.; Michalek.; J. L.; Christy, J. J. Water depth extraction from Landsat- 5 imagery. **Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 1990, p. 1129-1139.
- Philpot, W. D. Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. **Applied Optics**, 28 (8). 1989. p. 1569-1578.
- Ryu, J.; Na, Y.; Won, J.; Doerffer, R. A critical grain size for Landsat ETM+ investigations into intertidal sediments: a case study of the Gomso tidal flats, Korea. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 60. 2004. p. 491-502.