

EXTRAÇÃO DA BATIMETRIA ATRAVÉS DE DADOS TM-LANDSAT

Alexandre Pereira Cabral
Marcio Luiz Vianna

INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Ciências da Terra - C.P. 515
12201-970, São José dos Campos, SP, Brasil
alexcab@tid.inpe.br

Abstract. The present work describes and demonstrates a method of extraction of bathymetry and bottom classifications for continental shelves, based on single image data from the Landsat Thematic Mapper sensor, in one or two spectral bands, and on a single "in situ" bathymetric transect use for calibration (determination of single image attenuation coefficient of the water). The method is applicable for areas with horizontally homogeneous sea water. The study area corresponds to a larger sector (50Km x 50Km) of the continental shelf off the state of Rio Grande do Norte, NE Brazil, between the depths of 10-30m. Another method was tested: an application of Principal Components Transform. Results are compared with data from smooth sheets from the Brazilian Navy. Bathymetric transects tests, made to decide some discrepancies between different data, shows that the method is useful for correction of old charts.

1. Introdução

Nas últimas duas décadas estudos básicos sobre a interação macroscópica entre a radiação eletromagnética (REM) na faixa da luz visível e os constituintes das águas oceânicas, dominaram as atenções de vários autores devido, principalmente, às possibilidades oferecidas pelo lançamento de novos sensores orbitais cujos dados deveriam ser usados, pela primeira vez, para quantificar o conteúdo do fitoplâncton nas águas superficiais em escala global (Morel, 1974; Jerlov, 1976). A preocupação com a viabilidade de se utilizar sensores orbitais ópticos passivos para visualização e caracterização de fundos marinhos rasos foi na mesma manifestada, inicialmente, através dos trabalhos encomendados nos EUA pela Defense Mapping Agency (DMA), e executada pelo ERIM. Destacam-se entre estes, a recomendação do projeto de um novo sensor especializado na medida de radiancias no azul, centrado no comprimento de onda de máxima penetração na água, e os experimentos levados a cabo pela equipe mista ERIM / NASA / DMA / J. Cousteau no Banco da Bahamas (Polcyn et al, 1976). O novo sensor, que veio atender as reivindicações dos pesquisadores do ERIM, tornando-se parte do novo varredor multi-espectral chamado Thematic Mapper, que integra o Landsat 5.

Estudos mais recentes utilizando dados deste sensor, foram dirigidos para extração de batimetria (fotobatimetria passiva) e para o mapeamento temático do fundo oceânico (Spitzer e Dirks, 1987; Vianna et al., 1991, 1992; Polcyn e Rollin, 1969; Polcyn et al., 1970; Lyzenga, 1978, 1981, 1985; Polcyn e Lyzenga, 1979; Hallada, 1984; Tanis e Hallada, 1984; Kasischke e Tanis, 1986; Philpot, 1989; Van Hengel e Spitzer, 1991; Khan et al., 1992).

Neste trabalho é realizado um estudo fotobatimétrico de um setor da plataforma continental do Rio Grande do Norte. O método oferece a grande vantagem de poder se utilizar apenas uma imagem e de um transect batimétrico linear para calibração. São utilizados dois métodos de análise: (1) estimativa do coeficiente de atenuação da água, através de regressão entre níveis de cinza de duas bandas e os dados batimétricos de controle; (2) aplicação de uma Transformação por Componentes Principais. Os resultados obtidos por estes dois métodos são comparados e relacionados com dados batimétricos existentes, utilizando um Sistema de Informações Geográficas.

2. Base teórica

Vamos aqui reformular a teoria básica apresentada por Polcyn et al. (1970). Considerando-se uma região oceânica, a radiância que atinge um sensor numa dada banda i é expressa como sendo,

$$L_i(\omega) = L_{si} + c(\omega)R_{bi} \exp[-k_i f z(\omega)] \quad (1)$$

onde, L_i é a radiância observada na banda i , L_{si} é a radiância média observada sobre uma região profunda, $c(\omega)$ é a constante que é função da irradiância solar no topo da atmosfera, da transmitância da atmosfera, e da reflectância de fundo sobre o tipo de fundo observado no pixel ω , R_{bi} é a reflectância do fundo, k_i é o coeficiente de atenuação da água para a banda i , f é o fator geométrico relativo ao caminho óptico através da água $f = \sec \theta + \sec \phi$, e $z(\omega)$ é a profundidade no pixel. Assumindo-se $r_{bi} = c_1 R_{bi}$, como sendo a reflectância aparente do fundo, e empregando a notação de Lyzenga (1978), $X_i = \ln(L_i - L_{si})$, a Equação 1 para uma banda, pode ser expressa em função de $z(\omega)$:

$$X_i(\omega) = \ln[c(\omega)R_{bi}] - k_i f z(\omega) \quad (2)$$

Este modelo assume que: (1) a reflectância de fundo pode ser determinada para cada pixel; (2) o coeficiente de atenuação da água para cada banda é constante em toda a imagem, e independente da profundidade; (3) a atmosfera e o estado do mar são constantes em toda a cena; (4) os efeitos de espalhamento múltiplo entre a superfície da água e o fundo são ignorados, ou considerados como constantes em toda a imagem; (5) a distribuição angular da REM não varia com a profundidade; e (6) não há efeito de "glitter".

Este modelo apresenta limitações, uma vez que é aplicável em áreas onde os parâmetros são horizontalmente invariantes na cena.

Expressando a Equação 2 para duas bandas podemos eliminar $c(\omega)$, obtendo:

$$X_1(\omega) - X_2(\omega) = \ln(R_{b1}/R_{b2}) - (k_1 - k_2) f z(\omega) \quad (3)$$

Podemos explicitar $z(\omega)$:

$$z(\omega) = \frac{\ln(R_{b2}/R_{b1}) + 1}{f(k_2 - k_1)} (X_1(\omega) - X_2(\omega)) \quad (4)$$

Note-se que $c(\omega)$ foi eliminado. A Equação 4 pode ser usada para gerar a batimetria, uma vez determinados os k_i , f , e $\ln(R_{b2}/R_{b1})$.

Os parâmetros da Equação 4 podem ser estimados através da regressão linear simples para locais com profundidades conhecidas através da equação:

$$z = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (5)$$

Nossa área de trabalho se apresenta (com base no conhecimento de campo) com regiões horizontalmente homogêneas quanto ao tipo de fundo. Portanto, pode-se usar diretamente a equação 1, se realizarmos um transecto batimétrico e registrá-lo com a imagem. Assim, para a obtenção do k_i , implementa-se uma regressão linear simples da variável $z(\omega)$ com as variáveis $X_i(\omega)$:

$$z(\omega) = A_i(\omega) + B_i X_i(\omega) \quad (6)$$

Obtida a declividade da reta, e aplicando na Equação 2, o valor de k_i , pode ser extraído da expressão,

$$A_i(\omega) = \frac{1}{k_i f} \ln c(\omega) R_{bi}; \quad k_i = -1/f b \quad (7)$$

O fato de que a determinação dos k_i só pode ser feita com $z(\omega)$ no intervalo limitado pela profundidade máxima não constitui uma limitação do modelo, uma vez que são usados como fatores de calibração (considerando-se o coeficiente de atenuação da água como constante na cena). No caso das bandas 1 e 2 do TM, Tanis e Hallada (1984) mencionam que profundidade máxima de penetração a ser empregada no modelo está em torno dos 24 m. Entretanto, a profundidade máxima de penetração de uma determinada banda de um sensor, é dependente das características da água da região de estudo. Vianna et al. (1991; 1992) empregam imagens do TM na caracterização de feições submersas na mesma área de enfoque deste trabalho, até a isóbata de 40m, de forma que, através da determinação de k_i , o modelo pode fornecer dados fotobatimétricos até 40-45m.

Um outro método de obtenção da batimetria via SR é o proposto por Van Hengel e Spitzer (1991) e Khan et al. (1992). Nos dois trabalhos é aplicada uma Transformação por Componentes Principais-TCP para a extração de batimetria através de dados do sensor TM. A TCP baseia-se na análise de correlação entre diferentes bandas e na rotação dos respecti-

vos eixos, produzindo um conjunto de bandas não correlacionadas. A TCP pode ser expressa pela equação $y = Gx$, onde y é o vetor referente ao pixel no novo sistema de coordenadas, G a matriz de transformação, e x é o vetor referente ao pixel no espaço original (Santisteban e Munoz, 1978).

Inicialmente assume-se que a principal variação na reflectância da água em uma região com baixa turbidez e com baixa concentração de material orgânico dissolvido é devida às variações da profundidade. As variações na reflectância devida as diferenças na natureza do fundo são consideradas variáveis secundárias. A aplicação da TCP resulta numa 1ª CP que contém uma variável que é dependente da profundidade ("profundidade relativa"). A 2ªTCP esta relacionada, principalmente, com a variação dos tipos de substrato.

3. Área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção nordeste do Rio Grande do Norte, na região frontal ao Cabo Calcanhar, correspondendo a uma área aproximada de 900 km², entre as latitudes 04°55' e 05°10' S e as longitudes 035°15' e 035°30' W (Figura 1). São predominantes os ventos de ESE na maior parte do ano, sendo o período de maior intensidade entre julho e outubro, e de janeiro a abril os menores valores.

É constante a presença de uma corrente unidirecional no sentido sudeste-noroeste, representando um braço da Corrente Costeira Norte do Brasil atingindo seus valores máximos entre maio e agosto (Vianna et al. 1991). Uma das características da área é a alta transparência das águas. A rede hidrográfica é pobre, não havendo descarga significativa de material terrígeno, sendo baixa a concentração do material em suspensão (Vianna et al, 1991).

4. Metodologia

A imagem utilizada foi adquirida junto ao INPE em Cachoeira Paulista, com correções preliminares radiométrica e geométrica, sendo que para esta última correção foi utilizado o método de convolução cúbica (Schowengerdt, 1983), correspondendo à órbita/ponto 214/64, quadrante A, nas bandas 1, 2 e 4. Uma vez que a presença de ventos com grande intensidade promove um aumento da rugosidade na superfície da água, a imagem foi selecionada procur-

ando-se escolher uma data que apresentasse menor cobertura de nuvens, menor intensidade do vento e baixa amplitude de maré. Para a obtenção das informações de vento empregou-se os dados de Servain e Lukas (1990), e para a análise da amplitude de maré e dos períodos lunares foram empregadas tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN (1989).

Informações sobre a cobertura de nuvens foram obtidas através de consulta das listagens das passagens do TM Landsat 5, no setor de Atendimento ao Usuário do INPE. Foi selecionada a data de 31/01/89. Nesta data, na hora da passagem do satélite a maré prevista pela DHN (média) era de 1,7m, estando a lua no início do período minguante.

Do quadrante inteiro da imagem foi selecionada uma sub-cena de 1000 x 1000 pixels. Optou-se por se trabalhar com uma sub-cena e não com o quadrante, visando minimizar o tempo computacional.

4.1 - Tratamento digital das imagens

O processamento digital foi realizado utilizando-se o Sistema Interativo de Tratamento de Imagens (SITIM) desenvolvido no INPE, e o Sistema PC-SEAPAK, desenvolvido pela NASA/GSC.

Foi realizada uma filtragem visando minimizar o efeito do "striping", utilizando-se um filtro mediana recursivo, seguindo a metodologia de Cabral et al. (1990), empregando-se uma máscara 7x3, aplicando-o de cima para baixo e da esquerda para a direita, visando eliminar o escorregamento na imagem que decorre desta operação, procedendo-se nova aplicação nos sentidos de baixo para cima e da direita para a esquerda.

Em seguida realizou-se a geocodificação entre a Carta Topográfica da DSG n. SB-25-V-C-II, folha Natal, com a imagem TM. Foram selecionados 5 pontos de controle para a transformação geométrica um interpolador do tipo "vizinho-mais-próximo". O erro total obtido foi de 0,683 pixel.

Após o registro, gerou-se a imagem reflectância aparente para as bandas 1 e 2, empregando a rotina "reflete" implementada no SITIM.

4.2 - Aplicação do modelo para a extração da batimetria

Foi utilizado o modelo de duas bandas descrito no item anterior. Inicialmente foram realizados os seguintes procedimentos: (1) cálculo dos parâmetros estatísticos da imagem para as bandas; (2) cálculo da reflectância média de uma região profunda sem sinal do fundo para cada banda; (3) escolha de um valor de corte para cada banda acima do sinal médio da média da água profunda, visando eliminar os sinais da zona profunda da análise de regressão a ser efetivada, e para minimizar possíveis ruídos; (4) localização na cena de áreas com cobertura de fundo uniforme e de profundidade conhecida; (5) aplicação da correção de maré às medições de profundidade.

Os dados da profundidade de locais conhecidos foram extraídos a partir de transectos batimétricos obtidos por Vianna e Solewicz (1988), sendo realizadas correções de maré. Do total dos transectos foram escolhidos aqueles que localizavam-se em locais com cobertura de fundo uniforme. Para isso, a imagem foi realçada, e os locais escolhidos com base no conhecimento existente da área de estudo (Vianna e Solewicz, 1988; Solewicz et al. 1989; Vianna et al., 1989; Solewicz, 1990; Vianna et al., 1991; Vianna et al., 1992). A localização destes locais na imagem foi realizada através da rotina "navega" implementada no SITIM. Nesta rotina são fornecidas as coordenadas dos pontos para o sistema computacional e este assinala a localização na tela. Como a localização dos pontos estava expressa na forma de coordenadas geodésicas, e como a rotina "navega" trabalha com coordenadas planas, foi realizada uma conversão de coordenadas geodésicas para planas, através da rotina "conversão de projeções" implementada no SITIM. Em seguida, foram extraídos os valores de reflectância dos pontos selecionados através da rotina "leitura de pixel".

Para a estimativa dos coeficientes de atenuação da água para cada banda, foram realizadas plotagens da profundidade versus reflectância aparente para a banda 1, e da profundidade versus reflectância aparente para a banda 2, ajustando-se as retas pelo método dos mínimos quadrados.

4.3 - Extração da batimetria via TCP

A aplicação da TCP foi realizada com base em Khan et al. (1992) e Van Hengel e Spitzer (1991). Foi utilizada a imagem reflectância aparente, nas bandas 1 e 2 do TM, tendo o procedimento sido implementado no SITIM.

4.4 - Manipulação dos dados batimétricos da DHN no sistema de informações geográficas

Empregando-se o Sistema Geográfico de Informações do INPE (SGI-INPE) inseriu-se, via mesa digitalizadora, os dados batimétricos das seguintes Folhas de Bordo, na projeção UTM, adquiridas junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN): B-800-3/71 (escala 1:150000), B-800-2/71 E e B-800-2/71 W (ambas na escala 1:25000). Os pontos digitalizados foram organizados, gerando-se uma grade regular, com posterior refinamento. Em seguida realizou-se um fatiamento da batimetria em classes a partir da grade refinada. Foram criadas 4 classes: 10-15m, 15-20m, 20-25m, 25-30m.

O produto do fatiamento corresponde à uma imagem temática de 470 linhas por 500 colunas, com resolução horizontal de 52 pixels e resolução vertical de 61 pixels. A batimetria fatiada foi transferida para o sistema PC-SEAPAK.

5. Resultados

5.1 - Aplicação da TCP

A reflectância aparente média para as bandas 1 e 2 foram 31,06 e 18,51 respectivamente. Os autovaleores explicam o quanto da variância total está contida em cada CP. A 1ª CP contém 94,5% e a 2ª CP 5,5% da variância total. As equações de transformação foram:

$$\begin{aligned} 1^{\text{a}}\text{CP} &= 0,61R_2 + 0,79R_1 \\ 2^{\text{a}}\text{CP} &= -0,79R_2 + 0,61R_1 \end{aligned}$$

onde, R_1 e R_2 são os valores da reflectância aparente nas bandas 1 e 2, respectivamente.

Das duas imagens geradas, a primeira, referente à 1ª CP, mais relacionada à batimetria, foi fatiada em classes (Figura 2). A imagem foi colocada no formato compatível com o sistema PC-SEAPAK, sendo submetida à uma filtragem, utilizando um filtro passa-baixa. Esta filtragem foi realizada visando uma uniformização dos temas, ou seja, homogeneizar a classificação, eliminando pontos isolados.

5.2 - Aplicação do modelo de duas bandas

A reflectância aparente média para uma região profunda foi de 17,8 para a banda 1 e 12,2 para a

banda 2. Uma vez que são conhecidos os valores de reflectância aparente das duas bandas, empregou-se uma variante da relação $\ln(L_i - L_{si})$ proposta por Lyzenga (1978). Ao invés de utilizar a radiância, empregou-se a reflectância aparente. Com isto os parâmetros X_1 e X_2 ficaram:

$$\begin{aligned} X_1 &= \ln(R_1 - 17,8) \\ X_2 &= \ln(R_2 - 12,2) \end{aligned}$$

Foi utilizado um corte de um desvio-padrão acima da média do sinal da água profunda, sendo 1,8 para a banda 1 e 1,26 para a banda 2. Assim sendo, na aplicação do modelo de regressão foi utilizado apenas os valores de reflectância acima de 19,6 para a banda 1 e acima de 13,4 pra a banda 2.

As Figuras 3a e 3b apresentam as plotagens com a reta ajustada para as duas bandas. A Tabela 1 apresenta os pontos utilizados, e a Tabela 2 mostra o resultado da regressão linear. O erro médio foi de 0,912m para a banda 1 e de 1,02m para a banda 2. O coeficiente de atenuação da água foi estimado. O valor de f foi calculado, considerando-se os dados de efemérides do contidos na fita CCT, com ângulo solar zenital de $42^\circ 84'$, e o ângulo de visada 8° ($\sec 42^\circ 48' + \sec 8^\circ$), sendo igual a 2,37. Extraíndo-se da Tabela 2 os valores de b (-7,649 para a banda 1 e -6.31 para a banda 2), os valores de k foram: 0.055 para a banda 1 e 0.067 para a banda 2.

Utilizou-se a Equação 4 para a extração da batimetria. O resultado é apresentado na Figura 4, tendo sido fatiada no sistema PC-SEAPAK em 5 classes: 10-15m, 15-20m, 20-25m, 25-30m, e não-classificada. A imagem também foi submetida à uma filtragem para uniformizar os temas, a fim de melhorar a distinção das classes.

Utilizou-se este intervalo (10-30m) pelos seguintes motivos: (1) até 10m é grande a influência da ressuspensão do sedimento de fundo, assim excluiu-se esta faixa; (2) estes intervalos são os mesmos empregados nos outros fatiamentos batimétricos realizados neste trabalho.

6. Discussão

Uma comparação das Figuras 2 (batimetria via TCP) e 4 (batimetria via modelo) revela diferenças entre resultados obtidos por estas duas técnicas. Na Figura 2 percebe-se uma homogeneidade entre as 2 classes. Na Figura 4, entretanto, são encontrados

pontos da classe 15-20m distribuindo-se ao longo da classe 10-15m. Da mesma forma, na região profunda (não classificada), alguns pontos da classe 15-20m podem ser notados. Estes pontos não representam a presença destas profundidades nesta área, sendo provavelmente proveniente de ruído gerado na uniformização dos temas (via filtragem).

Ainda na Figura 4, dentro da classe 15-20m há a presença de pontos "não-classificados". Estes pontos localizam-se em áreas de fundo vegetado. Lyzenga (1978) e Hallada (1984), mencionam que a estimativa da profundidade em áreas com cobertura vegetal é prejudicada, gerando erros. Hallada (1984) comparou a performance de um modelo de duas bandas em fundo vegetado e sem vegetação. Em regiões com fundo vegetado os erros do modelo na estimativa da profundidade aumentavam cerca de 30%. Entretanto, é viável o aperfeiçoamento do método para essas áreas.

Na Figura 2 (TCP) as classes 20-25m e 25-30m apresentam um alargamento, quando comparada à Figura 4. Comparando-se as Figuras 2 e 4 com a Figura 5 (batimetria via SGI), percebe-se que a batimetria gerada pelo modelo (Figura 4), em termos visuais, apresenta maior similaridade com a batimetria da DHN. Para verificar esta similaridade, foram realizadas no PC-SEAPAK correlações cruzadas entre os dados: batimetria via TCP versus batimetria via modelo, batimetria via TCP com batimetria via DHN, batimetria via modelo versus batimetria via DHN. As Figuras 6a, 6b e 6c apresentam as plotagens com os coeficientes de correlação.

Pela análise destas figuras e dos coeficientes obtidos, fica comprovada a maior correlação entre os resultados do modelo e os dados da DHN. Algumas discrepâncias ocorrem nas áreas mais profundas. Entretanto, uma comparação do resultado obtido via modelo com alguns dados de campo (transectos batimétricos), mostra que o produto gerado pelo modelo apresenta maior fidelidade do que os dados da DHN, principalmente na isóbata de 20m.

As principais fontes de erro oriundas da imagem são: (a) ruídos gerados pelo sensor; (b) flutuações no sinal que é refletido na superfície da água; (c) variações na reflectância de fundo; (d) erros provenientes do registro imagem-mapa.

Além dos erros que podem ser gerados através de problemas na imagem, as fontes de erro das me-

didadas de profundidade usadas na calibração (os pontos com profundidade conhecida), devem ser considerados: erro no próprio cálculo dos valores de posicionamento do navio durante a realização da amostragem (mudanças de velocidade, etc); erro nas localizações destes pontos na imagem.

O modelo de 2 bandas é, teoricamente, independente das variações de fundo, é possível que erros residuais possam existir, devido à erros na calibração.

Para verificar a precisão do modelo e estimar os erros em relação aos tipos de fundo, selecionou-se 4 pontos para três tipos de substrato: areia, misto, vegetado. Para a localização foi utilizada a rotina "navega", comparando-se as profundidades de campo com as estimadas. A Tabela 3 apresenta os erros para cada tipo de substrato nos pontos selecionados. Percebe-se claramente que os maiores erros ocorrem no fundo vegetado, sendo mínimos no fundo areia. Isto vem ao encontro dos resultados encontrados por Lyzenga (1981) e Hallada (1984).

Um ponto importante a ser mencionado refere-se aos valores de k obtidos, 0.055 e 0.067, para as bandas 1 e 2 respectivamente. Segundo a classificação de Jerlov (1976), estes coeficientes enquadram a água da região entre o Tipo IB e II, considerando os comprimentos de onda das duas bandas utilizadas. Estes valores são similares aos encontrados por Sorokina (1984) e pelo próprio Jerlov (1978), obtidos em regiões adjacentes à plataforma continental da área de estudo.

7. Conclusões e considerações finais

As conclusões extraídas deste trabalho são: (1) as imagens TM-Landsat fornecem uma boa fonte de dados para a extração de informações referentes à batimetria e aos tipos de substrato em áreas oceânicas rasas; (2) a técnica de aplicação da Transformação por Componentes Principais na imagem da área de estudo, apresentou-se como deficiente na caracterização das variações da profundidade; (3) em comparação com os dados batimétricos das Folhas de Bordo, o modelo empregado pode ser apresentado como uma alternativa para a atualização de cartas náuticas, desde que seja aperfeiçoada a sua implementação; (4) o aumento da precisão na localização dos pontos de controle usados no registro e na obtenção do coeficiente de atenuação da água é um ponto importante a ser considerado, visando minimizar os erros na estimativa da pro-

fundidade. A utilização de sistemas de posicionamento GPS terá um impacto positivo neste tipo de trabalho.

A técnica utilizada é passível de ser aplicada em boa parte da plataforma continental do Brasil. Obviamente, a faixa de profundidade útil será dependente de fatores como a transparência da água, a concentração do material em suspensão e fitoplânctônico. Entretanto, o uso criterioso dos procedimentos de calibração e de processamento da imagem, garantem resultados satisfatórios. Esperamos, no final deste projeto, oferecer a comunidade de oceanografia e de geologia um software adequado para a rápida obtenção de batimetria de alta resolução e de classificação de tipos de fundo, através de dados de satélite. Uma descrição detalhada da fundamentação teórica, da metodologia, dos resultados, bem como as imagens temáticas em cor, podem ser obtidas em Cabral (1993).

O presente trabalho é parte integrante do Projeto Topsub, da Divisão de Ciências da Terra do INPE.

Referências bibliográficas

- Cabral, A.P. Extração da batimetria e dos tipos de substrato em um setor da plataforma continental do Rio Grande do Norte utilizando imagens TM-Landsat. Dissertação de Mestrado. INPE. 1993 (no prelo)
- Cabral, A.P.; Mantovani, J.E.; Costa, M.P.F.; Lima, R.A.F. Redução do "striping" de imagens TM-LANDSAT de ambientes aquáticos através de técnicas de filtragem espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., Manaus, 24-29 jun., 1990. Anais, 4, p. 833-839.
- Hallada, W.A. Mapping bathymetry with Landsat 4 TM, preliminary findings. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 9., Newfoundland, Canada, Aug 14-17, 1984. Proceedings. Ottawa, Canadian Aeronautics and Space Institute, 1984, p. 277-285.
- Jerlov, N.G. Marine Optics. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 241 p.
- Kasischke, E.S.; Tanis, F.J. Detection of bottom-related surface patterns in visible spectrum imagery. In: IGARSS'86 SYMPOSIUM, Zurich, Switzerland, Sep 8-12, 1986. Proceedings, p. 1301-1306.

- Khan, M.A.; Fadlallah, Y.H.; Al-Hinai, K.G. Thematic mapping of subtidal coastal habitats in the western Arabian Gulf using Landsat TM data-Abu Ali Bay, Saudi Arabia. *International Journal of Remote Sensing*, 13(40): 625-614, 1992.
- Lyzenga, D.R. Passive Remote Sensing techniques for mapping water-depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3): 379-383, 1978.
- Lyzenga, D.R. Remote Sensing of bottom reflectance and water attenuate parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1): 71-82, 1981.
- Lyzenga, D.R. Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1): 115-125, 1985.
- Morel, A. Optical properties of pure sea water. In: Jerlov, N.G. e Nielsen, E.S., eds. *Optical Aspects of Oceanography*, London, Academic Press, 1974, 494 p.
- Philpot, W.D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, 28(8): 1569-1579, 1989.
- Polcyn, F.C. NASA/Cousteau Ocean Bathymetry Experiment - remote bathymetry using high gain Landsat data. In: ERIM- 118500-1-F, Ann Arbor, 1976. 131 p.
- Polcyn, F.C.; Brown, W.L.; Sattinger, F.J. The measurement of water depth by Remote Sensing techniques. In: NASA - WRL-8973-26-F, Ann Arbor, 1970. 37 p.
- Polcyn, F.C.; Lyzenga, D.R. Landsat bathymetric mapping by multi-temporal processes. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 13., Ann Arbor, USA, Apr 23-27, 1979. Proceedings, 3. p. 1269-1276.
- Polcyn, F.C.; Rollin, R.A. Remote Sensing techniques for the location and measurement of shallow-water features. In: NASA-WRL-8973-10-P, Ann Arbor, 1969. 66 p.
- Santisteban, A.; Munoz, L. Principal Components of a multispectral image: application to a geological problem. *IBM Journal of Research and Development*, 22(5):444-454, 1978.
- Schowengerdt, R.A. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. London, Academic Press, 1983. 249 p.
- Servain, J.; Lukas, S. *Climatic Atlas of the Tropical Atlantic - wind stress and sea surface temperature (1985-1989)*. Brest, IFREMER, 1990. 133 p.
- Solewicz, R. Feições fisiográficas submarinas da plataforma continental do Rio Grande do Norte visíveis por imagens de satélite. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, jan. 1989. 154 p. (INPE-4964-TDL/392)
- Solewicz, R.; Cabral, A.P.; Vianna, M.L. Associação do sistema de informações geográficas com imagens TM-Landsat para classificação de unidades geo-ecológicas da plataforma continental nordeste do Brasil. In: *SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 4. Bariloche, nov. 1989. Anais, 3. 1989. p. 1188-1197.
- Sorokina, N.A. Distribution of the transparency of water in the Tropical Atlantic. *Oceanology*, 24(1): 58-60, 1984.
- Spitzer, D.; Dirks, R.W.J. Bottom influence on the reflection of the sea. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3): 279-290, 1987.
- Tanis, F.J.; Hallada, W.A. Evaluation of Landsat Thematic Mapper data for shallow water bathymetry. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 18. Paris, France, 1984. Proceedings, 2. 1984. P. 629-643.
- Van Hengel, W.; Spitzer, D. Multitemporal water depth mapping by means of Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 12(4): 703-712, 1991.
- Vianna, M.L.; Solewicz, R. Feições fisiográficas submarinas visíveis por imagens de satélite. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 5. Natal, Brasil, 11-15 out., 1988. Anais, 3, 1988. p. 581-587.
- Vianna, M.L.; Solewicz, R.; Cabral, A.P. Early Holocene stillstands in the Brazilian northeast mapped by satellite. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGES IN SOUTH AMERICA DURING THE QUATERNARY: PAST-PRESENT-FUTURE*, São Paulo, Brasil, May 8-12, 1989. Proceedings, 1989. p. 250-254.
- Vianna, M.L.; Solewicz, R.; Cabral, A.P.; Testa, V. Sandstream on the Northeast Brazilian Shelf. *Continental Shelf Research*, 11(6):509-524, 1991.
- Vianna, M.L.; Cabral, A.P.; Gherardi, D.F.M. TM-Landsat imagery applied to the study of the impact of global climate change on a tropical coastal environment during the last deglaciation. *International Journal of Remote Sensing*, 1993. (no prelo)

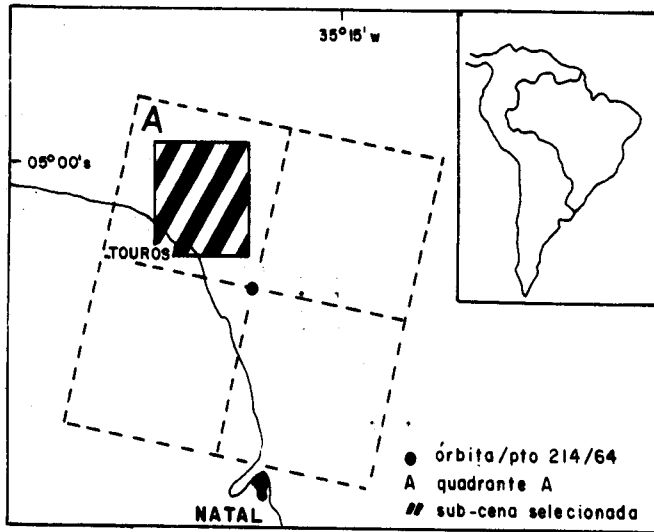


Figura 1 - Área de estudo .

Ponto	Latitude (S)	Longitude (W)	Profundidade (m)	Reflectancia aparente	
				Banda1	Banda 2
1	04 59.4'	035 22.5'	11.5	39	29
2	04 59.1'	035 25.8'	11.7	41	31
3	05 11.1'	035 17.1'	14.6	40	31
4	05 10.1'	035 17.0'	15.0	38	29
5	05 09.1'	035 16.9'	15.4	39	30
6	04 58.4'	035 25.2'	15.9	38	29
7	05 09.0'	035 16.8'	16.4	38	30
8	05 08.6'	035 16.8'	17.3	36	27
9	04 57.7'	035 24.5'	17.3	37	26
10	05 05.2'	035 16.2'	18.5	35	26
11	05 07.7'	035 16.6'	19.3	32	24
12	05 04.3'	035 16.0'	19.9	30	21
13	05 06.7'	035 16.4'	21.1	29	20
14	05 03.3'	035 15.8'	24.3	26	19
15	05 02.9'	035 15.8'	26.8	24	18
16	05 02.2'	035 15.6'	27.8	22	17
17	04 55.5'	035 23.3'	28.6	21	16
18	05 02.6'	035 15.7'	30.8	20	15

Tabela 1 - Pontos selecionados para a regressão linear.

Banda	a	b	Erro(m)	R ²	n ^o pontos	k
1	38,673	-7,649	0,912	0,933	18	0,055
2	27,531	-6,310	1,020	0,921	18	0,067

Tabela 2 - Resultados da regressão linear.



Figura 2 - Batimetria via TCP: (10-15) amarelo; (15-20) verde; (20-25) azul claro; (25-30) azul marinho; (n~ao-classificado) vermelho.

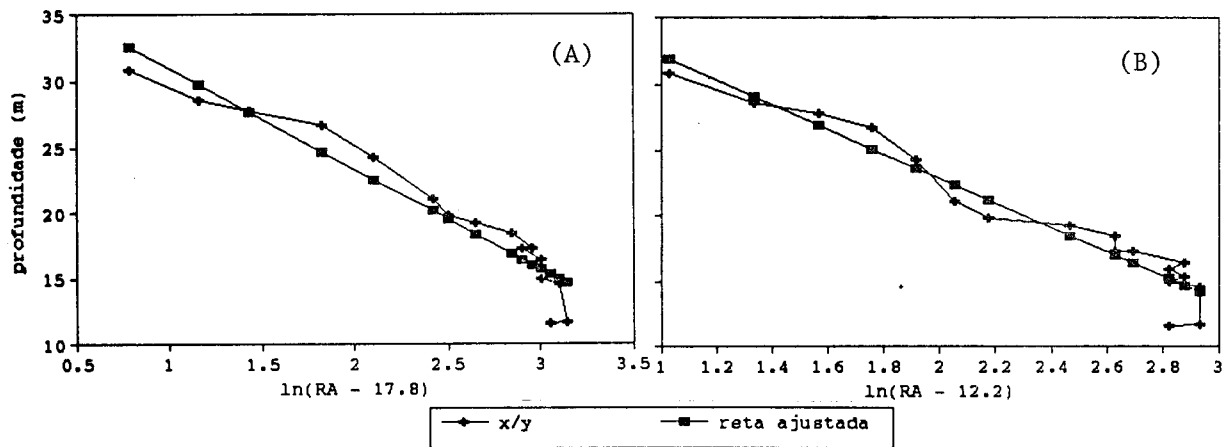


Figura 3 - Plotagens profundidade x reflect~ancia aparente: (a) Banda 1; (b) Banda 2.



Figura 4 - Batimetria via modelo: (10-15) amarelo; (15-20) verde; (20-25) azul claro; (25-30) azul escuro; (não-classificado) vermelho.

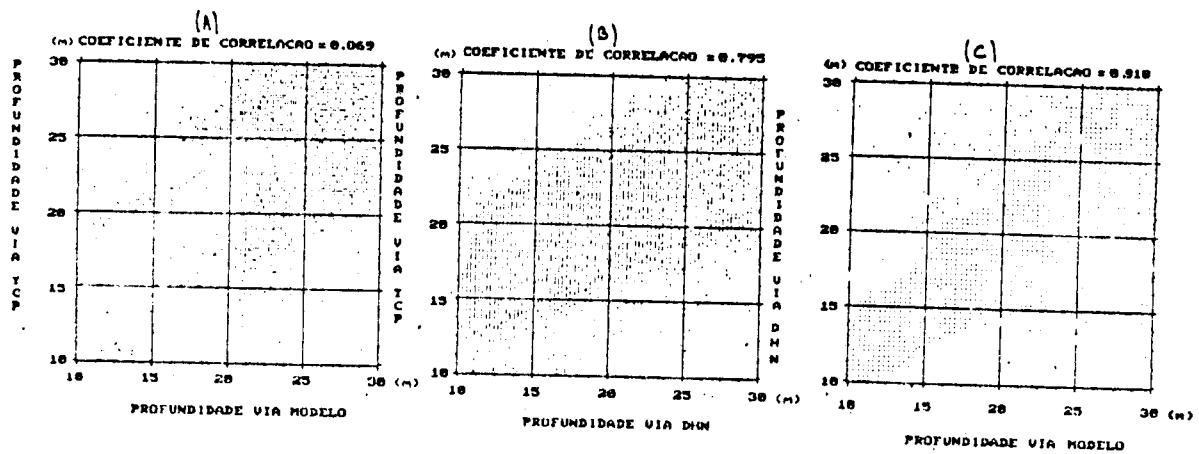


Figura 6 - Resultado da correlação cruzada: (A) batimetria TCP x modelo; (B) batimetria TCP x DNH; (C) batimetria DNH x modelo.



Figura 5 - Batimetria via SGI: (10-15) amarelo; (15-20) verde; (20-25) azul claro; (25-30) azul escuro; (não-classificado) vermelho.

Ponto	Substrato	Prof. campo (m)	Prof. estimada (m)	Diferença (m)
1	vegetado	18,40	16,66	1,34
2	vegetado	22,70	20,95	1,75
3	vegetado	21,60	19,98	1,62
4	vegetado	15,20	13,95	1,25
5	misto	14,60	13,55	1,05
6	misto	20,10	18,92	1,18
7	misto	23,40	22,00	1,20
8	misto	25,60	24,35	1,25
9	areia	14,10	13,38	0,72
10	areia	19,70	18,91	0,79
11	areia	21,80	20,98	0,82
12	areia	24,20	23,22	0,98

Tabela 3 - Comparação entre prof.campo e estimada para 3 substratos .