

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS IKONOS PARA ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADES

Andrea Tedesco¹
Jorge A. S. Centeno²

Universidade Federal do Paraná – tedescodeda@pop.com.br

Universidade Federal do Paraná – centeno@cce.ufpr.br

RESUMO

As imagens de satélite vêm sendo amplamente utilizadas para as mais diversas finalidades. São empregadas, por exemplo, em estudos geológicos, na cartografia, no planejamento e desenvolvimento urbanístico, nas definições de projetos de engenharia, na agricultura e em hidrologia. Quanto às aplicações em hidrologia, pode-se citar o uso das imagens para mapeamento e delineamento de corpos d'água, verificação e controle da qualidade física da água, avaliação da quantidade de sedimentos em suspensão e verificação de turbidez. Além disso, estudos foram realizados com imagens Landsat TM, em 1992, e SPOT, em 2000, com o intuito de extrair profundidades a partir das mesmas, com base nos valores de reflectância. Para países como o Brasil, com extenso litoral e grande quantidade de rios navegáveis, que utilizam estes tanto para o transporte de pessoas e cargas quanto para o lazer e turismo, cartas de navegação confiáveis e constantemente atualizadas são requeridas. No entanto os sistemas hídricos são muito dinâmicos, sofrendo processos de erosão e deposição que provocam variações no relevo submarino, tornando as cartas náuticas desatualizadas rapidamente. Além disso, um levantamento hidrográfico demanda custos e tempo de execução elevados. Este trabalho visa a propor um método alternativo para estimativa de profundidades e, conseqüentemente, para atualização e complementação de mapas batimétricos, através da integração de imagens IKONOS e dados batimétricos. Experimentos foram realizados no canal localizado entre as ilhas Sepultura e do Capinzal, na Baía de Guaratuba, no litoral paranaense. Apresenta-se a metodologia utilizada e os resultados dela decorrentes.

Palavras-chave: IKONOS; Batimetria; Cartas Náuticas.

ABSTRACT

The satellite images have been used with many purposes, for example in geological studies, cartography, urban planning and development, engineering projects definitions, agriculture and hydrology. In hydrology, satellite images can be used in body water mapping and delineation, water physical quality verification and control, suspended sediment quantity evaluation and turbidity verification. Besides, investigations were performed with Landsat TM images in 1992 and with SPOT images in 2000 to extract depths from images based on reflectance values. For countries like Brazil that has an extensive coast and a lot of navigable rivers, which are used to transport cargo and people, for business, leisure and tourism, reliable and updated nautical charts are required. However, the aquatic systems are very dynamic, suffering erosion and deposition processes that cause variations on submarine relief, turning nautical charts quickly out of date. Besides, a hydrographic survey is expensive and delayed. This essay proposes an alternative method to estimate sub aquatic depths and consequently complementation and updating nautical charts, through IKONOS image and bathymetric data integration. Experiments were performed in the stream located between Sepultura and Capinzal islands, Guaratuba Bay, Paraná coast. It will be presented the methodology and the results of this essay.

Keywords: IKONOS; Bathymetry; Nautical Charts.

1. INTRODUÇÃO

Países como o Brasil, com extenso litoral e grande quantidade de rios navegáveis, utilizam estes tanto para o transporte de pessoas e cargas quanto para o lazer e turismo. Por esta razão, cartas de navegação confiáveis e constantemente atualizadas são requeridas. No entanto, devido à grande dinâmica dos sistemas hídricos, as cartas náuticas tornam-se desatualizadas rapidamente pois, processos de erosão e deposição provocam variações no relevo submarino e na localização da linha de costa. Além disso, devido às dificuldades de realização de levantamentos em áreas de baixa profundidade ou de fundo que apresente perigos à navegação, existem áreas não cartografadas nas cartas náuticas. Percebe-se, ainda, uma grande generalização das profundidades nas mesmas. No Brasil, o órgão responsável pela realização dos levantamentos hidrográficos e pela produção e atualização das cartas náuticas é a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.

No intuito de se preencherem estas lacunas existentes nos levantamentos hidrográficos, ou a inexistência dos mesmos, propôs-se um método alternativo para

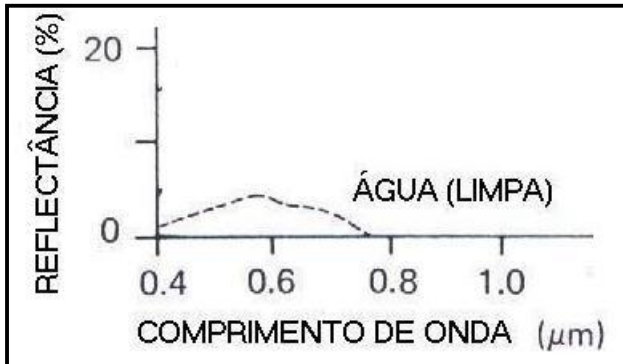
estimativa de profundidades e, conseqüentemente, para atualização e complementação de mapas batimétricos. O método consiste na integração de dados batimétricos com dados espectrais provenientes de imagens obtidas pelo sensor a bordo do satélite IKONOS II. Avaliando-se o comportamento dos dados (valores digitais e profundidades), encontrou-se um modelo matemático de correlação entre estes. Os dados batimétricos foram obtidos através de levantamento batimétrico realizado com auxílio de ecobatímetro de feixe único. Utilizando-se o modelo de correlação, foram determinados parâmetros de correlação entre os níveis digitais e as profundidades, para alguns pontos de apoio, e avaliou-se a precisão alcançada com o método.

Para o desenvolvimento deste estudo, experimentos foram realizados para uma área-teste, a qual abrange o canal localizado entre as ilhas do Capinzal e Sepultura, na Baía de Guaratuba, no litoral paranaense.

2. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA

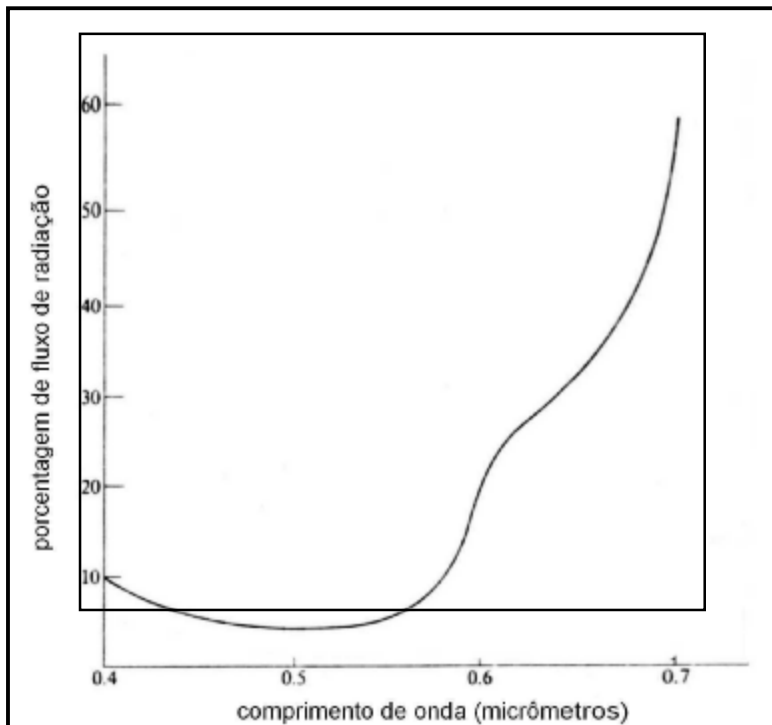
Da radiação que atinge a superfície da água, parte penetra e parte é refletida, voltando para a atmosfera. A quantidade de radiação refletida depende das condições da superfície da água (plana ou ondulada) e principalmente do ângulo de incidência da radiação sobre esta. Ao penetrar na coluna d'água, a radiação é submetida a profundas alterações, tanto na sua intensidade quanto na sua composição espectral. A primeira alteração sofrida é a mudança de direção devido à refração provocada pela redução da velocidade ao penetrar no meio líquido. Em seguida, parte da radiação é absorvida e transformada em outras formas de energia, por exemplo, química pela fotossíntese e calorífica pelo aquecimento da água. Outra parte da radiação sofre dispersão devido ao choque com partículas suspensas ou dissolvidas na água. Assim, a absorção e a dispersão são os dois principais fatores responsáveis pela atenuação da radiação com a profundidade nos ecossistemas aquáticos (DEBERDT, 2002). Entre as propriedades espectrais da água, pode-se citar a absortância, a transmitância, a reflectância e a emissividade. A figura 01 ilustra a curva típica de reflectância da água. Analisando-se a mesma, percebe-se que a água apresenta resposta espectral na faixa visível do espectro eletromagnético, sendo praticamente nula na faixa do infravermelho, isto porque a absortância é máxima nesta região do espectro, conforme pode verificar-se na figura 02. A figura 03 ilustra a curva de transmitância para quatro diferentes tipos de água, ara uma camada de 10m de profundidade. Observando-se esta curva, percebe-se que a água pura transmite muita radiação incidente nos comprimentos de onda inferiores a $0,6\mu\text{m}$. A transmitância diminui com o aumento da turbidez da água, enquanto que o comprimento de onda de máxima transmitância aumenta. A melhor região para as medidas espectrais da água é em torno de $0,48\mu\text{m}$, onde a transmitância é máxima (SWAIN & DAVIS, 1978, p.255).

FIGURA 01 - CURVA TÍPICA DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA



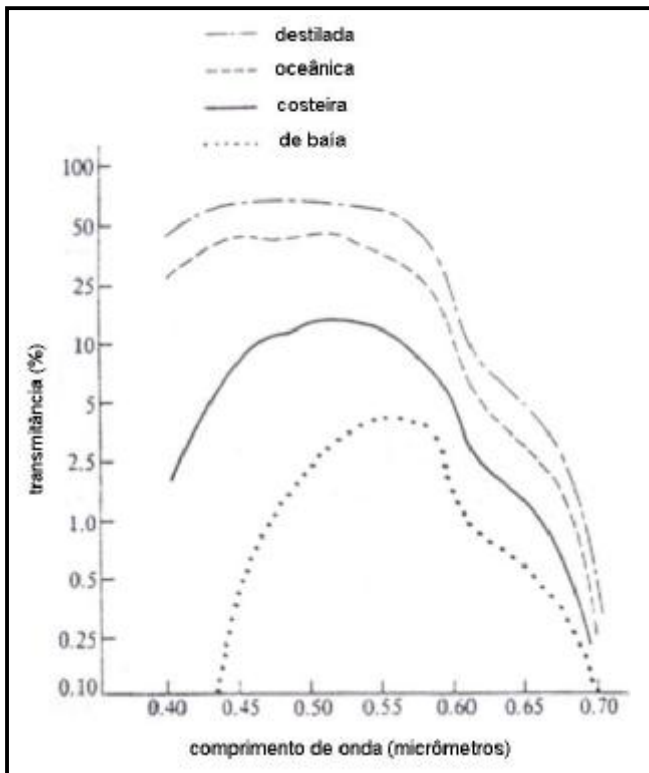
FONTE: ADAPTADO DE LILLESAND E KIEFER (1987, p.18)

FIGURA 02 - CURVA DE ABSORTÂNCIA DA ÁGUA



FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978, p.255)

FIGURA 03 - CURVA DE TRANSMITÂNCIA DA ÁGUA



FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978, p.256)

Na região visível do espectro as interações da energia são bastante complexas e dependem de uma série de fatores como a reflexão especular, materiais suspensos na água, fundo do corpo d'água e variáveis climatológicas. Características da água como profundidade, quantidade de materiais em suspensão (clorofila, argilas e nutrientes) e rugosidade da superfície, podem alterar o comportamento espectral da água (CHUVIECO, 1990, p.68).

3. OBTENÇÃO DE PROFUNDIDADES ATRAVÉS DE VALORES DE REFLECTÂNCIA

Em 1970, Polcyn *et al* desenvolveram um modelo para estimativa de profundidades de corpos d'água através de técnicas de sensoriamento remoto, baseados no modelo simples de reflectância da água. No entanto, este modelo

despreza os efeitos devidos à dispersão e à reflexão interna na superfície da água. De acordo com o modelo simples de reflectância da água, a radiância em uma dada banda de comprimento de onda (i) pode ser escrita como (POLCYN *et al*, 1970):

$$L_i = L_{si} + k_i r_{Bi} \exp(-K_i f z) \quad (01)$$

Onde:

- L_i = radiância na banda i ;
- L_{si} = radiância observada sobre água profunda (devida à reflexão externa da superfície da água e dispersão na atmosfera);
- k_i = constante que inclui irradiância solar, transmitância da atmosfera e da superfície de água, e redução da radiância devido à refração da superfície de água;
- r_{Bi} = reflectância do fundo;
- K_i = coeficiente de atenuação efetivo da água;
- f = fator geométrico para cálculo do comprimento do caminho através da água;
- z = profundidade da água.

O algoritmo desenvolvido por Polcyn *et al* assume que se pode encontrar um par de bandas para as quais a razão entre as reflectâncias do fundo é a mesma para todos os tipos de fundo numa certa cena. Considerando-se fundos do tipo A e B, tem-se:

$$\frac{r_{A1}}{r_{A2}} = \frac{r_{B1}}{r_{B2}} = R_b \quad (02)$$

Onde r_{A1} é a reflectância para o tipo de fundo A na banda 1, e assim sucessivamente. A profundidade pode então ser calculada através da equação:

$$z = \frac{1}{(K_1 - K_2) * f} \left[\ln \left(\frac{k_1}{k_2} \right) - \ln \left(\frac{R}{R_b} \right) \right] \quad (03)$$

Onde R é a razão entre os sinais refletidos do fundo nas duas bandas:

$$R = \frac{(L_1 - L_{S1})}{(L_2 - L_{S2})} \quad (04)$$

Se a relação expressa na equação 02 for verdadeira, a profundidade calculada por este método não é afetada pelas mudanças na composição do fundo presentes na cena. Está também livre das mudanças na qualidade da água se a diferença entre os coeficientes de atenuação ($K_1 - K_2$) resultar constante. Porém, é difícil encontrar um par de bandas que satisfaça a esta condição e à equação 2.

Em 1978, Lyzenga melhorou o modelo de Polcyn, adicionando os efeitos de dispersão e reflexão interna. Obtém-se a profundidade invertendo-se a equação 1. A profundidade pode ser obtida utilizando-se regressão linear. Ele testou ambos os

métodos chegando aos resultados expostos na tabela 01 (LYZENGA, 1978):

$$Z = a_{0i} + a_{1i} X_i \quad (05)$$

Sendo:

i = banda

$X_i = \ln(L_i - L_{si})$;

$a_{0i} = (1/k_i f) \ln(k_i r_{Bi})$; e

$a_{1i} = -1/K_i f$

TABELA 01 - ERROS NAS PROFUNDIDADES ESTIMADAS ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE POLCYN E LYZENGA

Profundidade (m)	Erro método Polcyn (m)	Erro método Lyzenega (m)
1	0,7	0,3
2	1,10	0,5
3	2,0	0,7
4	3,0	0,8
5	4,5	0,9
6	6,7	1,0

PEREDES e SPERO (1983) adaptaram o modelo mostrado na equação 5 para um caso de várias bandas (n), resultando em:

$$z = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (06)$$

ABDULLAH, MATJAFRI e DIN (2000) realizaram estudos de atualização de mapas batimétricos através de imagens de sensoriamento remoto, para o Estreito de Penang na Malásia. A partir de dados obtidos em levantamento batimétrico utilizando ecobatímetro, e imagens dos sensores Landsat TM e SPOT de 1997, produziram mapas batimétricos com base no algoritmo derivado do exposto na eq. 06, para o caso de três bandas (eq. 07).

$$z = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1 X_2 + a_5 X_1 X_3 + a_6 X_2 X_3 + a_7 X_1 X_2 X_3 \quad (07)$$

Utilizando os dados batimétricos e os dados de reflectância obtidos das imagens, eles encontraram os melhores coeficientes para o algoritmo estudado. Alguns dados foram utilizados para calibração do modelo de regressão e outros para verificação. Os mapas batimétricos obtidos apresentaram-se bastante similares entre si e em comparação ao obtido com os dados do levantamento batimétrico. O principal erro detectado originou-se do efeito da turbidez da água. A tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

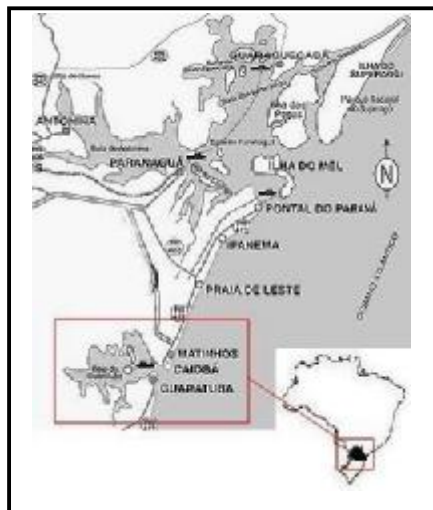
TABELA 02 - ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE REGRESSÃO

	Calibração		Validação	
	SPOT	LANDSAT	SPOT	LANDSAT
Erro Médio Quadrático (m)	4,7	4,6	6,5	5,12

4. ÁREA DE ESTUDO

Para a realização deste estudo selecionou-se uma área-teste no litoral paranaense (fig. 04), a qual abrange o canal de fundo arenoso localizado entre as ilhas Sepultura e do Capinzal, na baía de Guaratuba. A área de estudo está compreendida entre as latitudes 25°51'05" S e 25°51'50" S e entre as longitudes 48°36'10" W e 48°34'50" W. Escolheu-se esta área de estudo após análise da imagem IKONOS e da carta náutica da região. Na carta náutica percebe-se uma grande generalização das profundidades e, analisando-se a variação dos níveis digitais da imagem, pôde-se perceber uma grande variação dos mesmos, o que implica numa variação de profundidades, já que existe uma correlação entre a resposta espectral obtida pelo sensor e a profundidade da coluna d'água.

FIGURA 04 - LOCALIZAÇÃO DA BAÍA DE GUARATUBA NO LITORAL PARANAENSE



5. MATERIAIS

Os equipamentos utilizados na elaboração deste trabalho foram:

- 2 receptores GPS de dupla frequência, 12 canais, Ashtech ZXII;

- sistema de comunicação (par de rádios Pacific Crest, potências de 35W e 2W, e antenas);
- uma régua graduada com comprimento total de 5m para leituras de maré;
- um ecobatímetro de feixe único modelo SDH-13A da Odom Hydrographic Systems, Inc. com módulo Digitrace e um transdutor;
- um teodolito eletrônico T100 da Leica;
- imagem IKONOS, resultado da fusão da banda pancromática com resolução espacial de 1m com as bandas multiespectrais com resolução espacial de 4m, composição colorida R=infrared, G=red e B=green, resolução espacial de 1m, 11 Bits, nível de processamento *Standard Geometrically Corrected*, adquirida pelo sensor em 16/09/2001, ângulo de elevação solar=53,322° ;
- Software para planejamento, execução e processamento dos dados do levantamento hidrográfico (HYPACK);
- Software para processamento dos dados GPS (PRISM);
- Software para processamento de imagens de satélite (ENVI - *Environment for Visualizing Images*), e
- Software para geração do Modelo Digital do Terreno a partir dos dados batimétricos (SURFER).

6. METODOLOGIA E RESULTADOS

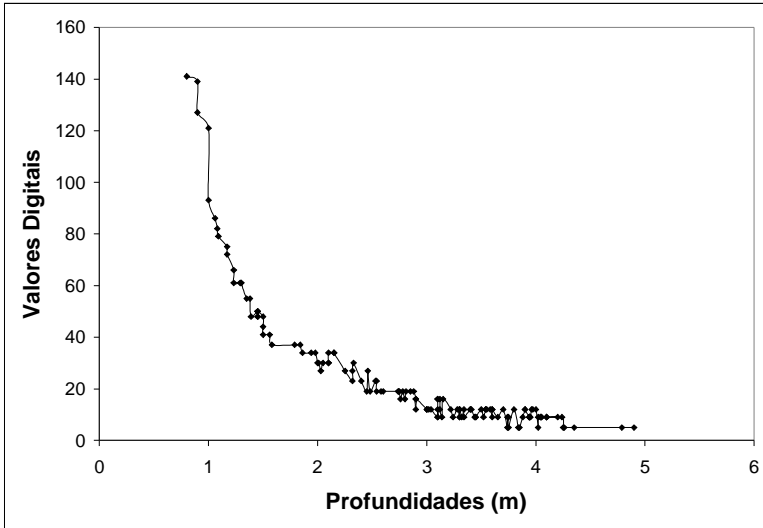
A elaboração do estudo englobou as seguintes etapas:

1. Escolha da área de estudo;
2. Planejamento e execução dos levantamentos de campo:
 - Escolha e implantação de uma estação de referência;
 - Seleção e determinação das coordenadas precisas de pontos de apoio terrestres para georreferenciamento da imagem;
 - Cálculo da escala do levantamento batimétrico, densidade e espaçamento entre as linhas de sondagem e execução do levantamento batimétrico, e
 - Implantação de uma régua maregráfica para determinação das variações da maré ao longo do levantamento batimétrico.
3. Processamento dos dados oriundos dos levantamentos de campo;
4. Determinação do modelo matemático a ser utilizado;
5. Processamento da imagem de satélite, e
6. Análise dos resultados obtidos.

O método proposto neste estudo, para fins de estimativa de profundidades através de imagens de satélite de alta resolução, consiste na determinação de parâmetros de correlação entre profundidades e valores de níveis digitais. A partir de alguns dados de profundidade obtidos em levantamento batimétrico, dispensando

um levantamento completo em campo, diminuindo custos e tempo de execução, foram determinadas profundidades de alguns pontos, ao longo de linhas de sondagem, que foram relacionados com seus pixels homólogos na imagem georreferenciada. Os dados foram então plotados para uma análise do comportamento dos mesmos (profundidades versus níveis digitais), conforme ilustrado na figura 05. Percebe-se o comportamento exponencial dos dados.

FIGURA 05 - COMPORTAMENTO DOS DADOS ESPECTRAIS EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE PROFUNDIDADE



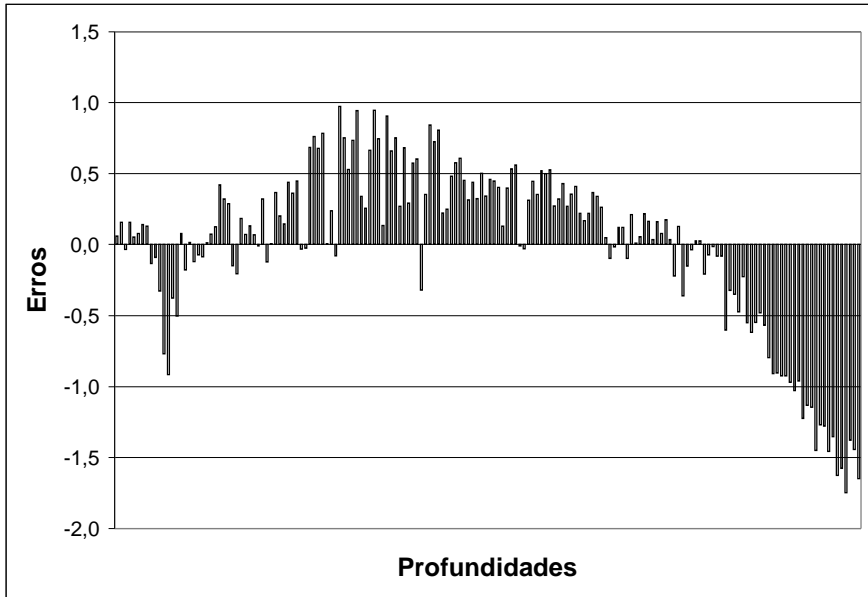
A partir desta análise e, com base nos modelos investigados por outros pesquisadores anteriormente, chegou-se a um modelo para correlação dos dados. Linearizando-se a relação entre os dados, pode-se obter profundidades (Z) a partir dos valores digitais da imagem (NC). A equação de correlação resultante é dada por:

$$Z = a_1 * \ln NC + b_1 \quad (08)$$

Os parâmetros a_1 e b_1 que correlacionam os dados são os coeficientes da reta obtida plotando-se profundidades versus o logaritmo neperiano dos níveis de cinza (a_1 = inclinação da reta, b_1 = intercepção da reta no eixo y).

Utilizando-se todos os dados, percebeu-se que o modelo apresenta maior confusão nas profundidades estimadas acima de 3,50m, isto porque a partir desta profundidade os valores digitais tornam-se muito parecidos, pois a resposta obtida pelo sensor não é distinta devido à absorção da radiação pela água (fig. 06).

FIGURA 06 - ERROS OBTIDOS COM O MODELO DE REGRESSÃO PARA TODOS OS DADOS



Os dados foram então divididos em faixas de profundidades e foram então calculados os parâmetros de regressão. Utilizando-se estes parâmetros foram estimadas as profundidades e comparadas com as profundidades obtidas em campo. Calcularam-se então as diferenças entre as profundidades estimadas e verdadeiras (erros absolutos) para avaliação da precisão do método. A tabela 03 apresenta as faixas de profundidade verificadas, a média dos erros absolutos obtidos bem como seus desvios padrões e o máximo erro verificado em cada faixa.

TABELA 03 - ERROS OBTIDOS

EXTREMOS (m)	MÉDIA ERROS ABS (m)	DESVIO PADRÃO (m)	ERRO MÁX (m)
0,3 - 1,00	0,23071836	0,26162638	-0,44308
0,3 - 1,53	0,15171851	0,194322541	-0,45985
0,3 - 2,03	0,15098107	0,191844773	-0,4714
0,3 - 2,51	0,18303241	0,225122401	-0,58213
0,3 - 3,01	0,21157054	0,270625265	-0,71629
0,3 - 3,48	0,25901799	0,334607099	-0,89465
0,3 - 4,00	0,32433741	0,436039969	-1,38142
0,3 - 4,50	0,43575496	0,589504461	-1,74593
0,3 - 4,97	0,5241625	0,696818045	-2,16666

0,6 - 1,00	0,10236278	0,125578582	0,229894
0,6 - 1,53	0,08179185	0,111190784	-0,27819
0,6 - 2,03	0,11427353	0,142944077	-0,34563
0,6 - 2,51	0,17258229	0,212748334	-0,52131
0,6 - 3,01	0,21225044	0,272365834	-0,71742
0,6 - 3,48	0,26399077	0,341000816	-0,89891
0,6 - 4,00	0,33421921	0,445938673	-1,3829
0,6 - 4,50	0,45157149	0,603000017	-1,7447
0,6 - 4,97	0,54441037	0,712398533	-2,16642

0,8 - 1,00	0,01511667	0,019121478	-0,02461
0,8 - 1,53	0,06963887	0,094446396	-0,27336
0,8 - 2,03	0,10654695	0,136209008	-0,33671
0,8 - 2,51	0,16779589	0,208127211	-0,57045
0,8 - 3,01	0,20602879	0,26409369	-0,71241
0,8 - 3,48	0,26001844	0,333152242	-0,88295
0,8 - 4,00	0,33278024	0,441752299	-1,37329
0,8 - 4,50	0,45516988	0,603623265	-1,74959
0,8 - 4,97	0,54996951	0,715399498	-2,16507

7. CONCLUSÕES

Observando-se os resultados obtidos, através da tabela 03, percebe-se que o método mostrou-se eficiente, permitindo estimativas de profundidades até em torno de 5m, com erros inferiores a 1,00m. De acordo com as normas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), o método poderia ser utilizado como auxílio na confecção de cartas inclusive de Ordem 1, que são as que exigem maior rigor de precisão. O método torna-se viável pois reduz a quantidade de dados a serem levantados em campo, diminuindo tempo de execução e custos. Para áreas de baixa profundidade, onde não é possível a realização de levantamento com embarcações, pode-se então utilizar este método para estimativa das profundidades, auxiliando na confecção, edição ou atualização de cartas náuticas.

8. REFERÊNCIAS

ABDULAH, K., MATJAFRI, M. Z., DIN, Z. B. **Contribution form remote sensing in updating bathymetric chart.** Disponível em <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps311pf.htm>> Acesso em: 15 mar. 2002.

BIERWIRTH, P. N., LEE, T. e BURNE, R. V. **Shallow water mapping via the separation of depth and substrate components from multiespectral data: an example from useless inlet, Shark Bay, WA.** Apresentado em First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, New Orleans, Louisiana. Junho, 1992. Disponível em <www.agarss.com.au/Papers/ShallowH2O/ShallowH2O.htm> Acesso em: 25 mar. 2002.

BRASIL. Portaria n. 53 / MB, de 1º de março de 2002. Aprova as "Instruções para Controle dos Levantamentos Hidrográficos pela Marinha do Brasil". Disponível em <<http://www.dhn.mar.mil.br/chm/Levantamento/>> Acesso em: 16 set. 2002.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial.** Ediciones Rialp, S.A. Madrid, 1990.

DEBERDT. A. J. **Qualidade da Água.** Disponível em <<http://educar.sc.usp.br/biologia/prociencias/qagua.htm>> Acesso em: 13 mai. 2002.

DHN. **Baía de Guaratuba.** Rio de Janeiro, 1996. 1 carta náutica: color.; 60 x 40cm. Escala 1:25.000.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br>> Acesso em: 10 mar. 2002.

FELIX, L. A. **Algumas considerações sobre levantamento hidrográfico em grande escala.** Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

IKONOS. Curitiba: EngeSat Imagens de Satélite, 2001. Imagem de satélite. Composição colorida R=red, G= green e B= infravermelho próximo.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** Editora John Wiley & Sons, Inc. 3ª edição. New York, 1994.

LYZENGA, D. R. **Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features.** Applied Optics, vol. 17 nº 3, p.379-383. Fevereiro, 1978.

PEREDES, J. M., SPERO, R. R. **Water depth mapping from passive remote sensing under a generalized ratio assumption.** Applied Optics, vol. 22, p.1134-1135. Abril, 1983.

POLCYN, F. C.; BROWN, W. L.; SATTINGER, I. J. **The Measurement of Water Depth by Remote Sensing Techniques.** Report 8973-26-F, Willow Run Laboratories, The University of Michigan, Ann Arbor, 1970.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote Sensing.** The Quantitative Approach. Editora McGraw-Hill Book Company. United States of America, 1978.

10. AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo contou com o apoio financeiro da CAPES e do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Agradeço ainda a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na realização deste trabalho.