

# **ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADE A PARTIR DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO E DADOS IKONOS II MEDIANTE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

*An estimate of depth from a bathimetric survey and IKONOS II data by means of  
artificial neural network*

SELMA REGINA ARANHA RIBEIRO<sup>1</sup>  
JORGE ANTONIO SILVA CENTENO<sup>2</sup>  
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Dept. de Geociências  
Av. General Carlos Cavalcanti, n° 4748  
CEP 84.030-900 - Ponta Grossa - Paraná  
selmar\_12@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
Setor de Ciências da Terra - Depto. De Geomática  
Caixa Postal 19001 - Curitiba – Paraná - Brasil  
[centeno, ckrueger]@ufpr.br

## **RESUMO**

O presente trabalho propõe uma metodologia para estimar profundidades batimétricas a partir de imagens IKONOS II baseada no uso de redes neurais artificiais (RNA). Como variáveis de entrada foram adotados os valores digitais de duas bandas espectrais do sistema IKONOS II e a posição do *pixel*, dada pelas coordenadas (N, E). O modelo proposto consiste em uma RNA de duas camadas escondidas, do tipo *feed forward*. O estudo comprova que esta metodologia gera resultados que atendem as especificações técnicas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), responsável pelas publicações náuticas no Brasil, para levantamentos batimétricos de Ordem 1, sendo o erro máximo permitido, para esta Ordem , entre 0,25m a 0,50m. No entanto, verificou-se que esta metodologia atende uma faixa restrita de profundidade, entre 0,80m a 3,00m, na qual a resposta

espectral da coluna de água prevalece sobre o reflexo do fundo e não é fortemente afetada pela absorção.

**Palavras Chave:** Levantamentos Batimétricos; Redes Neurais Artificiais; Batimetria.

### ABSTRACT

In this article, we describe a methodology for the estimate of bathymetry using satellite imagery (IKONOS II) based on the neural network approach. The input variables of the model are the digital values of two spectral bands and the position of the pixel, given by its N, E coordinates. The proposed model consists of an artificial feed forward neural network with two hidden layers. The study reveals that the proposed methodology is able to produce results that reach technical specifications of Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN), in charge of for the bathimetric surveys in Brazil, for class 1 surveys, as the maximum error lies bellow 0,5m. However, it was also verified that the methodology is efficient only for restricted depths, from 0,80 to 3,00 meters, where the spectral response of the water column prevails on the spectral response of the bottom and it is not strongly affected by absorption.

**Keywords:** Bathimetric survey; Artificial Neural Network; Bathymetry.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grandes extensões, possui imenso litoral e grande quantidade de rios navegáveis, que são utilizados para o lazer, transporte de pessoas e cargas. A manutenção de uma cartografia náutica atualizada e confiável é uma necessidade para os usuários destes recursos. A execução e controle dos levantamentos hidrográficos, bem como a produção e edição das cartas náuticas, são atribuições da Marinha do Brasil, por meio da DHN. Este processo esbarra nos altos custos e extensas áreas a serem cobertas e à dinâmica destes corpos de água. Devido aos processos naturais de erosão e deposição em rios e em áreas costeiras, ocorrem alterações significativas no fundo, como a formação de bancos de areia e lodo.

Esta tarefa pode ser cumprida com medições precisas de profundidade usando equipamentos como ecobatímetros a bordo de barcos, mas tais métodos resultam caros e demorados, motivo este que justifica a busca de alternativas menos onerosas. A aplicação de SR (Sensoriamento Remoto) passivo, em função de sua visão panorâmica de uma região, é uma opção pertinente, principalmente na atualidade, com o aumento da resolução espacial das imagens comercialmente disponíveis.

Este estudo propõe uma metodologia baseada em dados de SR para a obtenção de profundidades no litoral paranaense, mais precisamente em um canal situado

entre as ilhas Sepultura e do Capinzal, na baía de Guaratuba - PR. Para isto, um modelo baseado em RNA é utilizado.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Levantamentos Hidrográficos

Dentre os principais propósitos, os Levantamentos Hidrográficos (LH) destinam-se à confecção ou atualização de cartas e publicações náuticas. Eles são realizados exclusivamente pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), através do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Os LH podem ser executados por entidades nacionais extra-Marinha, e são regulamentados pelo art. 37 do Decreto-lei 243 de 28 de fevereiro de 1967, o qual foi regulamentado pela Portaria Ministerial 53/MB de 01 de março de 2002 (BRASIL, 2002).

As cartas náuticas são documentos cartográficos que resultam de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos, lagoas, ou qualquer outro corpo de água navegável, e se destinam a servir de base à navegação. Representam os acidentes terrestres e submarinos, fornecendo informações sobre profundidades, perigos à navegação (bancos, pedras submersas, cascos soçobrados ou qualquer outro obstáculo à navegação), natureza do fundo, fundeadouros e áreas de fundeio, auxílios à navegação (faróis, faroletes, bóias, balizas, luzes de alinhamento, radiofaróis, etc.), altitudes e pontos notáveis aos navegantes, linha de costa e de contorno das ilhas, elementos de marés, correntes e magnetismo e outras indicações necessárias à segurança da navegação (MIGUENS, 2000).

De acordo com os diferentes requisitos de precisão, foram definidas quatro ordens de levantamento: Ordem Especial, Ordem 1, Ordem 2 e Ordem 3 (BRASIL, 2002). A ordem de levantamento descrita a seguir é a 1 e de interesse para este estudo.

**Ordem 1:** destinam-se às áreas portuárias, canais de acesso, rotas recomendadas, canais de navegação interior e áreas costeiras com grande densidade de tráfego mercante, onde a folga sob a quilha seja menos crítica e as propriedades geofísicas do fundo sejam menos perigosas à navegação (como fundo de lama ou arenoso). Os levantamentos desta ordem devem limitar-se às áreas com profundidades menores que 100 metros.

Conforme as especificações mínimas para LH, preconizadas pela DHN, as profundidades devem ter precisão entre 0,25m e 0,50m para Ordem 1, e entre 0,50m e 1,00m para Ordens 2 e 3, para níveis de confiança de 95% (DHN, 1998).

### 2.2. Levantamentos Usando Ecobatímetro

A medição de profundidade pode ser realizada de forma direta ou indireta. No segundo caso são utilizados, por exemplo, sensores acústicos, ou seja, ecobatímetro de feixe único ou multifeixe.

O princípio fundamental de um ecobatímetro consiste em que um feixe de ondas sonoras ou ultra-sonoras seja transmitido verticalmente por um emissor instalado na embarcação, atravessando o meio líquido até atingir o fundo submerso, sendo refletido e retornando à superfície, onde são detectados por um receptor. O tempo decorrido entre a emissão do sinal e a recepção do eco refletido do fundo submerso é convertido em profundidade, visto que a velocidade do som na água é conhecida. A Equação 1 mostra o cálculo da profundidade.

$$p = 0,5 * v * t \quad (1)$$

Sendo:

$p$  = profundidade;

$v$  = velocidade de propagação do som na água, e

$t$  = tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar

Este equipamento conta com um gravador gráfico de papel, que registra as profundidades em escala adequada, e que permite correções manuais em casos de dúvida sobre as profundidades registradas. Os dados podem ser visualizados também em forma digital para ecobatímetros que possuam o dispositivo adequado. Os dados podem ainda ser enviados em tempo real para um computador portátil acoplado ao ecobatímetro, utilizando um programa específico, e armazenados para posterior processamento (TEDESCO, 2003).

Enquanto o ecobatímetro determina a profundidade, é necessário também determinar a posição do ponto medido em termos planimétricos. Tradicionalmente, isto era realizado utilizando, por exemplo, teodolitos para marcar a trajetória da nave durante o levantamento, mas na última década o uso de sistemas de posicionamento por satélites, como NAVSTAR-GPS, passou a ser o método mais difundido.

A qualidade da informação a respeito da posição do ecobatímetro, obtida com GPS, depende do método utilizado. O posicionamento de embarcações, tanto o posicionamento absoluto como o relativo, não satisfaz às necessidades. No posicionamento relativo tem-se a perda de sinal e é obrigatório o pós-processamento. Já o absoluto não proporciona a precisão necessária (SEEBER, 1993). Nestes casos, como no estudo presente, faz-se mister o uso do DGPS (Differential GPS). Ele consiste em utilizar simultaneamente dois receptores, um instalado em uma estação fixa de coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência, e um outro em uma estação itinerante, em permanente movimento, intitulada de estação móvel. A partir da estação de referência são calculadas correções (correções diferenciais), as quais são utilizadas pela estação móvel no processo de cálculo de sua posição. As correções são enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação e dentro de um formato apropriado, definido pela RTCM (*Radio Technical Committee for Marine Service*) (KRUEGER, 1996).

Este método de posicionamento atende à precisão horizontal com nível de confiança de 95% de acordo com as especificações para levantamentos geográficos.

O resultado do uso conjunto do GPS e ecobatímetro, após sua transformação para o sistema de referência adotado, é um conjunto de dados tridimensionais de coordenadas de pontos na superfície do fundo.

### 2.3. Sensoriamento Remoto e Batimetria

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 utilizam imagens de satélites multiespectrais (LYZENGA, 1985; PHILPOT, 1989; NORDMAN ET AL., 1990).

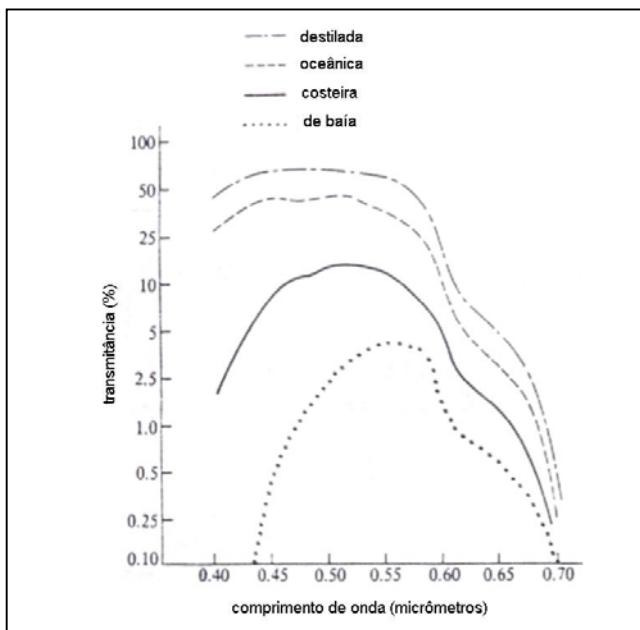
Na estimativa da profundidade de corpos de água mediante técnicas de SR, as imagens da área em questão são obtidas utilizando sensores instalados em satélites. Os dados são coletados em faixas específicas do espectro eletromagnético, sendo que em algumas delas é possível registrar a energia refletida pelo fundo de corpos de água.

Através de imagens de satélite é possível estabelecer a relação entre a resposta espectral, medida sob forma de valores do contador digital, e a profundidade, para produzir cartas batimétricas com base em todos os *pixels* representativos de áreas submersas da imagem. No entanto, fatores como turbidez da água, características do fundo, ângulo de iluminação, materiais em suspensão, profundidade, entre outros, alteram a resposta espectral da água. Por isso, são necessários cuidados na interpretação dos dados (TEDESCO, 2003; CHUVIECO, 1990).

Quanto à transmitância, a água pura transmite muita radiação incidente nos comprimentos de onda inferiores a 0,6 $\mu\text{m}$ . Este comportamento é semelhante ao dos oceanos e lagos limpos. A transmitância dos corpos d'água naturais diminui com o aumento da turbidez da água, enquanto que o comprimento de onda de máxima transmitância aumenta. A melhor região para as medidas espetrais da água é em torno de 0,48 $\mu\text{m}$ , onde a transmitância é máxima (SWAIN e DAVIS, 1978, p. 255).

A Figura 1 ilustra as curvas de transmitância de quatro diferentes tipos de água, para uma camada de 10 metros de profundidade. Observa-se que a curva de transmitância de águas costeiras decresce em todos os comprimentos de onda em relação à água destilada ou oceânica. O fato é justificado pelo aumento do espalhamento devido à maior concentração de partículas em suspensão, muitas vezes causadas pela ação das ondas (SWAIN e DAVIS, 1978, p. 256).

Figura 1 - Curva de transmitância da água.



FONTE: SWAIN e DAVIS, 1978.

Métodos para a estimativa de profundidade que usam dados de SR foram propostos por autores como LYZENGA e AHRENS (1978), SPITZER e DIRKS (1987) e ABDULLAH, et al. (1991). Estes autores realizaram estudos visando a atualização de mapas batimétricos a partir de imagens dos sensores Landsat TM e SPOT, usando dados obtidos em levantamentos batimétricos para estabelecer o modelo mais apropriado, baseado em análise de regressão. Os mapas gerados foram considerados satisfatórios pois eram similares aos dados obtidos pelo levantamento batimétrico, mas erros foram detectados, como por exemplo aqueles causados pela interferência da turbidez da água. Uma abordagem similar foi recentemente aplicada utilizando dados de sensores de alta resolução espacial, como o IKONOS II em TEDESCO, 2003.

As experiências utilizando imagens de média resolução, como SPOT e Landsat TM, apontam a viabilidade do uso de SR na estimativa de profundidades. A aplicação de SR passivo, no entanto, é restrinida a áreas de águas rasas e límpida, com mudanças pequenas em tipos de fundo e em regiões livres de contaminação

atmosférica (ABDUALLAH et al. 1991). Os recentes avanços em termos de novos sensores, com melhor resolução espacial e espectral, abriram espaço para a pesquisa de novos métodos, justificada pelo fato de que as regiões mais rasas, onde a estimativa usando imagens de média resolução era viável, não se encontram mais representadas por uma estreita faixa de *pixels*, pois com o aumento da resolução espacial a região em questão é representada com maior detalhe. Por exemplo, a área coberta por um *pixel* do Landsat TM pode atualmente ser representada por 900 *pixels*, no caso do sistema IKONOS II.

O satélite IKONOS II está operacional desde o início de janeiro de 2000. É um satélite comercial capaz de coletar dados pancromáticos e multiespectrais com resolução espacial de 1m e de 4m, respectivamente e tem resolução radiométrica das bandas espectrais em 11 bits (CENTENO, 2004). As bandas podem estar separadas ou combinadas em três bandas em um único arquivo (RGB=321 ou 432) ou mediante a fusão da imagem pancromática com a multiespectral, processamento que gera uma imagem denominada de híbrida. A desvantagem, na utilização da imagem fundida, é que no processo de fusão a imagem tem seus níveis de cinza modificados.

Devido às deformações geométricas resultantes do imageamento por satélite, as imagens são previamente georreferenciadas e passam por um processo de reamostragem no qual os valores digitais são interpolados. Outra desvantagem, além da alteração dos valores digitais, devido aos processos de fusão e georreferenciamento, é que dificilmente as imagens são obtidas com visada nadir. No que diz respeito à determinação de profundidades em corpos d'água, isto implica que a resposta espectral da água, obtida pela observação da reflectância, corresponde a um feixe de incidência inclinado.

## 2.5. Redes Neurais Artificiais (RNA)

As RNA são um ramo da inteligência artificial que se baseia no princípio de simular parte do funcionamento do cérebro humano usando computadores eletrônicos. Neste modelo, o cérebro é constituído por neurônios interligados, formando uma complexa rede, onde a informação flui sob forma de impulsos. Vários impulsos podem chegar simultaneamente a um neurônio através da rede e ao recebê-los, o neurônio os processa, pondera e avalia no seu corpo ou soma. A intensidade dos impulsos recebidos, devidamente modelada é repassada com maior ou menor intensidade em função do sinal ter maior ou menor intensidade. Quando a intensidade do sinal é menor o estímulo repassado será mais tênue e vice-versa.

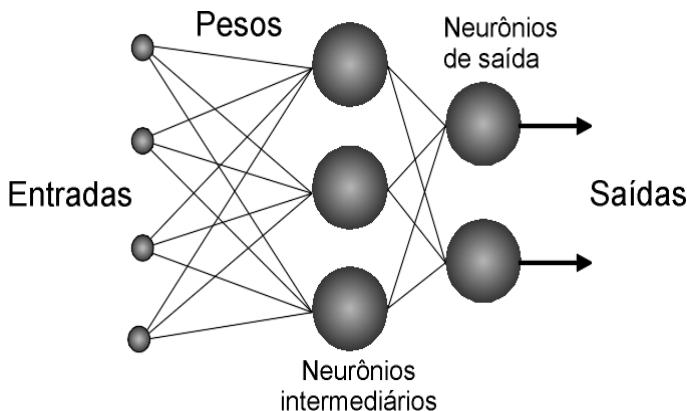
Nas RNAs, a idéia é simular o funcionamento de um neurônio usando equações matemáticas e compor uma rede de neurônios artificiais, na qual informações lógicas ou valores numéricos possam ser processados para gerar uma saída. No neurônio artificial, as entradas são valores numéricos ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), os quais são ponderados e somados para compor um único sinal de entrada (Equação 2) (HAYKIN, 1999).

$$S = b + \sum x_i * w_i \quad (2)$$

onde  $b$  é um valor constante próprio do neurônio, conhecido como “bias” e  $w_i$  representa o fator de ponderação, peso, de cada entrada. A soma ponderada é então modelada usando uma função de transferência. Para isto existem diferentes opções, como funções binárias, lineares ou exponenciais.

As RNAs são usualmente organizadas em camadas, compostas de unidades de processamento (neurônios), conectadas por canais de comunicação que fazem fluir dados numéricos. Os dados são apresentados à rede por meio de uma camada de entrada, a qual se comunica a uma ou mais camadas escondidas (ocultas), Figura 2, onde ocorre o processamento por meio de um sistema de conexões ponderadas. A camada de saída apresenta o resultado do processamento (GERMAN e GAHEGAN, 1996).

Figura 2- Rede neural artificial com entrada camada intermediária (oculta ou escondida) e saídas.



FONTE: modificado Haykin, 1999.

A chave do uso de uma RNA, para a solução de um determinado problema, consiste na definição do tipo da rede, da arquitetura da rede e no ajuste de seus pesos, o que é feito numa primeira fase de treinamento. Treinar uma rede significa ajustar a sua matriz de pesos ( $W$ ) de forma que o vetor de saída coincida com um certo valor desejado para cada vetor de entrada. Também se pode fazer um paralelo com o neurônio biológico e dizer que o aprendizado (treinamento) é um ajuste sináptico (HAYKIN, 1999). Como o treinamento supervisionado necessita de pares de entrada e saída, esses são chamados de conjunto de treinamento. No treinamento, o

vetor de entrada é aplicado e a saída da rede calculada. Comparando a resposta da rede com o vetor de saída esperado o erro é calculado. Com base neste erro, os pesos são ajustados a fim de minimizar essa diferença. O processo de treinamento é repetido, até que o erro para o conjunto de treinamento alcance um valor mínimo ou limite previamente determinado.

O algoritmo para treinamento de RNA mais conhecido é o *Backpropagation* ou da retropropagação do erro. Ele utiliza o conceito de minimização do gradiente descendente e o limiar de uma função, considerado uma generalização da Regra Delta para RNA *feed forward*. A Regra Delta ou do erro quadrático mínimo consultar (GERMAN e GAHEGAN, 1996).

A RNA pode ser treinada para diferentes finalidades. No SR, as RNA têm comprovada utilidade para resolver problemas de classificação multiespectral, considerando dados de diferentes origens e escalas (RIBEIRO e CENTENO, 2002). Porém, seu uso não se restringe a este problema, sendo aplicável também na estimativa de modelos, como é descrito neste estudo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

#### 3.1. Área de Estudo

Para a realização deste estudo, selecionou-se uma área no litoral paranaense que abrange o canal de fundo arenoso, localizado entre as ilhas Sepultura e do Capinzal, na baía de Guaratuba, 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.

Uma imagem IKONOS II da região foi obtida em 16/09/2001. Este sistema possibilita obter imagens com resolução radiométrica de 11 bits. Suas bandas multiespectrais abrangem as faixas de Banda 1: 0,45 a 0,52 ( $\mu\text{m}$ ); Banda 2: 0,51 a 0,60 ( $\mu\text{m}$ ); Banda 3: 0,63 a 0,70 ( $\mu\text{m}$ ) e Banda 4: 0,76 a 0,85 ( $\mu\text{m}$ ), com resolução espacial de 4m (nominal a 26° nadir) e a banda pancromática (0,76 – 0,90  $\mu\text{m}$ ) tem resolução espacial de 1m

#### 3.2. Métodos

Neste estudo, uma RNA supervisionada multicamadas com algoritmo de treinamento *backpropagation* foi proposta para obter um modelo que estimasse profundidades a partir dos dados espectrais. Para isto, as variáveis de entrada foram inicialmente definidas. Elas são: a posição do *pixel*, dada pelas coordenadas planimétricas (N, E), e as leituras digitais em duas bandas espectrais, a banda 2 (verde) e a 3 (vermelho) da imagem IKONOS II. A justificativa para a adoção das duas bandas espectrais é devido ao fato que nesta faixa do espectroelectromagnético ocorre a maior transmitância de águas oceânicas, como ilustrado na Figura 1. Salienta-se ainda que para a banda 4, o comprimento de onda do espectroelectromagnético é maior que 0,6 $\mu\text{m}$  (baixa transmitância em corpos d'água) e a banda pancromática. As variáveis N e E (coordenadas planimétricas) são obtidas

por DGPS e têm-se a necessidade de com junto à localização planimétrica se ter as medidas de profundidade, as quais são adquiridas com ecobatímetro. Têm-se, portanto um conjunto de dados tridimensionais de coordenadas de pontos (N, E e h) do fundo oceânico.

Para obter um conjunto de treinamento confiável, foram escolhidos pontos onde, além das variáveis de entrada, a profundidade medida pelo ecobatímetro era conhecida, como já mencionado quando da justificativa das variáveis de posição (N, E). Para isto, são selecionadas algumas linhas transversais do levantamento batimétrico. A quantidade de amostras de treinamento coletadas é de 68 pontos (contendo os valores digitais das duas bandas espectrais e as coordenadas planimétricas) na faixa de 0,80 a 3,00m de profundidade dos perfis levantados. Estas amostras são intercaladas para que o “aprendizado” da RNA não se torne tendencioso.

A utilização da faixa de 0,80 a 3,00m de profundidade dos perfis levantados foi a selecionada, pois testes preliminares foram realizados sendo que tanto para menores como para maiores profundidades obteve-se resultados de profundidade fora da precisão esperada, de 0,50m, Ordem 1 como preconizado pela DHN. A estimativa da profundidade usando imagens não é eficiente em regiões muito rasas, onde a resposta espectral do fundo predomina, nem em locais muito profundos, onde o feixe incidente é absorvido e não ocorre reflexão. Para avaliar a faixa de profundidade na qual os resultados são coerentes, o experimento foi repetido para diferentes faixas. Destes experimentos concluiu-se que a faixa de profundidade mais apropriada é entre 0,80 a 3,00m.

O segundo estágio é encontrar a melhor arquitetura da rede, ou seja, o número de camadas escondidas e o número de neurônios por camada, para a rede supervisionada multicamadas com algoritmo de treinamento *backpropagation*. A quantidade de neurônios da primeira camada é igual ao número de variáveis de entrada, no caso quatro (duas bandas espectrais da imagem IKONOS II e as coordenadas planimétricas, N e E). O número de nós da camada de saída é definido em função da quantidade de variáveis de saída, neste caso apenas uma, a profundidade. As camadas escondidas, bem como o número de nós em cada camada escondida, são definidos experimentalmente, ou seja, em função da complexidade do problema. Testes foram realizados, variando a arquitetura, sendo que os melhores resultados foram obtidos utilizando duas camadas escondidas com 9 e 3 neurônios na primeira e segunda camadas escondidas, respectivamente. Sendo que nesta melhor arquitetura as diferenças entre as profundidades geradas pela RNA e as profundidades dos pontos de verificação (30% do total) são menores que 0,50m.

Testou-se ainda, uma arquitetura mais simples com somente uma camada escondida, porém o tempo de convergência foi alto e encontrava-se um mínimo local de valor numérico distante do erro máximo estipulado.

Após a definição das variáveis de entrada, da escolha das amostras de treinamento e da arquitetura da rede fixada, a RNA é treinada (aprendizado) pelo

método supervisionado utilizando o treinamento *Backpropagation* e a variação RPROP (*Resilient*), presentes em uma ferramenta de redes neurais (*tools box neural network*) do Laboratório Matemático - Matlab 5. Durante o treinamento definiu-se como critério, para o processo de aprendizado, o erro máximo (erro médio quadrático máximo) limitado, em função das normas preconizadas pela DHN, para levantamentos de Ordem 1, e compatível com a precisão do ecobatímetro de feixe único utilizado no levantamento, precisão centimétrica. Iniciou-se o treinamento considerando a precisão do levantamento (Ordem 1) e o resultado das profundidades tinham muita diferença do valor das medidas “*in loco*” (comparação mediante as amostras de verificação). Portanto passou-se a realizar testes diminuindo o erro médio quadrático máximo com o intuito que se obter, após o treinamento, a diferença de profundidades entre a saída da RNA e pontos de verificação que atendam a precisão de Ordem 1.

Cabe ressaltar que a RNA é treinada, portanto “aprende”, o que faz com que os processamentos, após a definição arquitetura, sejam diferentes e tendam a melhorar. Quando foi atingida a precisão desejada, segundo as normas da DHN, fixou o valor do erro médio quadrático máximo em 0,001 e se passou a fazer treinamento para que a RNA “aprendesse. Destaca-se aqui que quando se usaram os valores de erro superiores a 0,001 a rede não teve “embasamento para apreender”, na realidade, o conjunto de treinamento não era suficiente para tal tarefa. Ainda comenta-se que se diminuindo-se o valor do erro médio quadrático máximo para valores menores que 0,001, os valores das profundidades extrapolam ficando distantes da realidade.

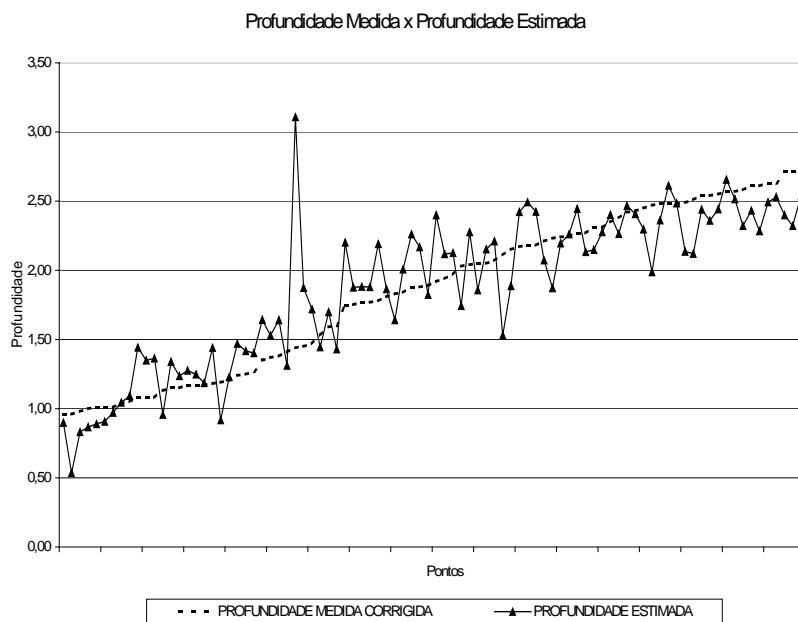
Uma vez treinada, a RNA pode ser usada para simular profundidades em função de um vetor de entrada contendo as leituras digitais das imagens e a posição planimétrica do local. Com o objetivo de verificar a capacidade da RNA de simular corretamente profundidades para pontos diferentes dos usados no treinamento, um novo conjunto, de verificação, composto por quatro linhas/perfis (com 16, 20, 20 e 15 pontos em cada perfil) do levantamento batimétrico, perfazendo um total de 71 pontos, foi selecionado. Estes dados foram utilizados para a verificação e fornecem o erro cometido, ou seja, a diferença entre as profundidades fornecidas pela RNA e as lidas no ecobatímetro quando do levantamento.

## 4. RESULTADOS

A Figura 3 mostra o resultado, gráfico, da comparação entre as profundidades medidas “*in loco*” e a estimada usando a RNA, para uma linha/perfil de verificação. O eixo “x” corresponde à posição do ponto, medida em termos de distância ao longo do perfil, e no eixo “y” a respectiva profundidade. As profundidades medidas pelo ecobatímetro no levantamento “*in loco*” são representadas por uma linha pontilhada e as profundidades modeladas (RNA) por uma linha contínua contendo triângulos.

Comparando-se as duas linhas, nota-se que a gerada mediante o processo com RNA oscila em relação à do levantamento batimétrico, mas esta variação não ultrapassa o limite estipulado para a maioria dos dados comparados, considerando-se um levantamento de Ordem 1 (0,25 a 0,50 m); somente para dois pontos a variação ultrapassa o valor determinado. Pode-se destacar que os resultados de profundidade com a técnica de RNA, seguem a mesma “tendência” do levantamento de profundidades com o ecobatímetro.

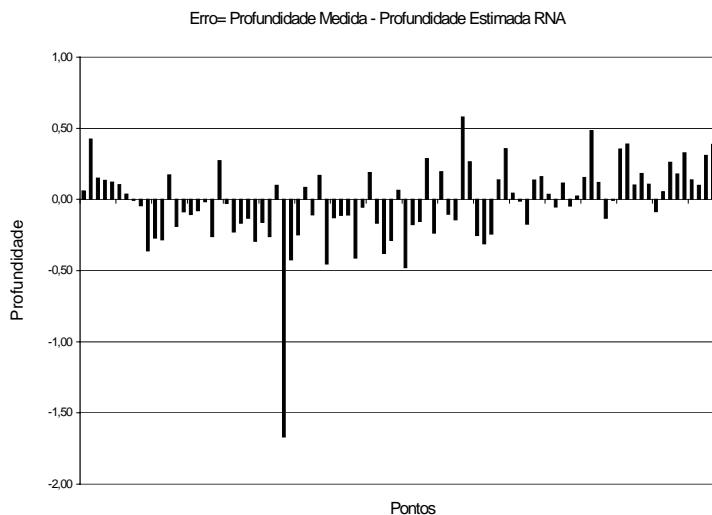
Figura 2 - Profundidades medidas (ecobatímetro) e estimadas (mediante RNA).



As diferenças entre os valores observados (ecobatímetro) e os modelados (RNA), para estes pontos, são melhor analisadas com ajuda da Figura 4. No gráfico da Figura 4, as diferenças entre as profundidades observadas “in loco” e modeladas (RNA) são representadas em função da posição do ponto. Nota-se que esta diferença, em valor absoluto, não ultrapassa, para a maioria dos pontos, 0,50m com exceção para os dois pontos, fato já mencionados, com erro de 1,67m e 0,58m. Para os demais pontos temos: dois com erro igual a 0,48m, um com 0,45m, três com erro na faixa de 0,40m a 0,44m e os demais no intervalo de 0,30m a 0,39m, sendo estes valores inferiores ao erro máximo estipulado para levantamentos de Ordem 1,

segundo a DHN, que é de 0,50m. Salienta-se que 91% do grupo amostral, os erros tiveram valores inferiores a 0,50m.

Figura 3 - Diferença entre as profundidades medidas e estimadas.



## 5. CONCLUSÕES

O intuito do estudo comprovou a viabilidade de estimar profundidades utilizando imagens de satélites de alta resolução espacial com a técnica de uma RNA, treinada para modelar o problema. O modelo proposto baseia-se na informação de duas bandas espectrais, a banda 3 (vermelho) e a 2 (verde) do sistema IKONOS II, e a posição (N, E) do ponto no corpo de água.

A utilização de imagens de alta resolução espacial atualmente disponíveis, possibilitam a extração de dados de profundidade, cuja dimensão do *pixel*, isto é, sua resolução espacial, está em torno de 0,7-1,0m. Este tipo de estudo é favorecido pelo fato dos sensores de alta resolução operarem principalmente no visível e infravermelho próximo, regiões consideradas mais apropriadas para a estimativa da profundidade de corpos de água.

Os resultados obtidos satisfazem as especificações técnicas da DHN, responsável pelos levantamentos batimétricos no Brasil, para LH de Ordem 1, ou seja, o erro máximo abaixo de 0,50m. No entanto, verificou-se que esta metodologia atende, apenas, uma faixa restrita de profundidade, entre 0,80m a 3,00m, na qual a

resposta espectral da coluna de água prevalece sobre o reflexo do fundo e não é fortemente afetada pela absorção.

Tendo-se em vista o acima exposto e as normas definidas pela DHN conclui-se que, mediante a técnica de RNA as profundidades estimadas podem ser utilizadas na confecção/atualização de cartas náuticas de Ordem 1, em regiões de profundidades de no mínimo 0,80m até no máximo 3,0m. Para as profundidades menores que 0,80m a resposta espectral influencia erroneamente o aprendizado da RNA, pois são faixas onde a resposta espectral está fortemente relacionada com turbidez e movimentos da água. Para as profundidades maiores que 3,00m a resposta espectral é sempre semelhante, isto é, não existe diferença numérica nos níveis digitais, portanto não acrescentando informações.

O estudo foi realizado em uma região específica, onde as condições de turbidez e tipo de fundo favorecem este tipo de levantamento. Recomenda-se a verificação da metodologia em outros locais, com diferentes condições ambientais. Bem como a utilização de uma RNA com menos graus de liberdade, permitindo que a RNA seja mais estável que esta gerando estimativas com menores oscilações.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, K.; MATJAFRI, M. Z.; DIN, Z. B. Contribution form remote sensing in updating bathymetric chart. *21st Asian Conference on Remote Sensing*. Taipei, 2000. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs>>. Acesso em: agosto 2004.
- ABDULLAH, K.; MOHD DIMYATA, K.; CRACKNELL, A. P.; VAUGHAN R. A. Evaluation of Landsat TM and Spot data for shallow water bathymetry. *12th Asian Conference on Remote Sensing*. Singapore, 1991. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs>>. Acesso em: agosto 2004.
- BRASIL. Aprova as "Instruções para controle dos levantamentos hidrográficos pela marinha do Brasil". Portaria n. 53 / MB, de 1º de março de 2002. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/chm/Levantamento/>> Acesso em: agosto 2004.
- CENTENO, J. A. S. *Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais*. Curitiba: Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2004.
- CHUVIECO, E. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. S.A. Madrid: Ediciones Rialp, 1990.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. *Especificações para levantamentos hidrográficos*. Tradução da Publicação Especial da Organização Hidrográfica Internacional. 2<sup>a</sup> Edição, 1998.
- GERMAN, G. W. H.; GAHEGAN, M. N. Neural network architectures for the classification of temporal image sequences. *Computers Geosciences*, v. 22, n.9, p. 969 – 979, 1996.

- HAYKIN, S. *Neural networks. A comprehensive foundation.* New Jersey: Prentice Hall, 2 Ed. p. 842, 1999.
- KRUEGER, C. P. *Investigações sobre aplicações de alta precisão no âmbito marinho.* 1996. Tese apresentada ao Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora. Curitiba, 1996.
- LYZENGA, D. R.. Shallow water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, v.6, p.115-125, 1985.
- LYZENGA, G.A.; AHRENS, T. J. The Relation Between the Shock-induced Free Surface Velocity and the Postshock Specific Volume of Solids, *J. Appl. Phys.*, n.49, p.201. 1978.
- MIGUENS, A. P. *Navegação: a ciência e a arte - Navegação Costeira, estimada e em águas restritas.* Rio de Janeiro: DHN, v. 1, 2000.
- 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*, p. 1129-1139, 1990.
- PHILPOT, W. D. Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. *Applied Optics*, n. 28, n. 8. p. 1569-1578. 1989
- RIBEIRO, S. R. A. *Integração de Imagens Landsat TM e dados auxiliares para a delimitação de unidades fisionômicas usando Redes Neurais Artificiais.* 2003. Tese apresentada ao Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora. Curitiba, 2003.
- RIBEIRO, S.R. A.; CENTENO, J. A. S. *Clasificación del uso del suelo utilizando redes neurales y el algoritmo MAXVER.* Antofagasta- Chile: Innovación, año 14, n.1, p. 55-60., 2002.
- SEEBER, G. *Satellite geodesy. Foundations, methods and applications.* New York : Berlin, 1993.
- SPITZER, D.; DIRKS, R.W.J., Bottom influence on the reflectance of the sea. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 279-290, 1987.
- SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. *Remote sensing. The quantitative approach.* United States of America: McGraw-Hill Book Company, 1978.
- TEDESCO, A. *Viabilidade do uso de imagens de alta resolução para a atualização de mapas batimétricos.* 2003. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná , Curitiba , 2003.

(Recebido em janeiro/07. Aceito em abril/08)