

Carlos Rene López Candela

**ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CORPOS DE ÁGUA
COM O USO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil-PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lia Caetano Bastos

Florianópolis - SC
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Candela, Carlos René

Estimativa da profundidade de corpos de água com o uso
de dados de sensoriamento remoto / Carlos René Candela ;
orientadora, Lia Caetano Bastos - Florianópolis, SC, 2013.
141 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Sensoriamento remoto. 3. Lagoa
da Conceição. 4. Profundidade da água. 5. Landsat 7. I.
Bastos, Lia Caetano. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

Carlos René López Candela

**ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CORPOS DE ÁGUA
COM O USO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Esta Dissertação foi julgada e adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

17 de Outubro de 2013

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto.
Coordenador do PPGEC

Prof.^ª Dr. Lia Caetano Bastos.
Orientadora

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juercio Tavares de Mattos – UNESP.

Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Igashi – UFSC.

Prof. Dr. Roque Alberto Sanchez Dalloto – UNOESC.

To Luchis, Isra Chiken and Big head.

AGRADECIMENTOS.

A minha orientadora Lia Caetano Bastos pelo apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

Agradecimento especial à professora Dora Orth por acreditar em mim e me dar a oportunidade de estudar no Brasil.

Aos colegas e amigos que conheci no Brasil, por seus conselhos e ajuda que sempre precisei.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido, indispensável na realização deste trabalho.

Há homens que lutam um dia e são bons;
Há outros que lutam um ano e são melhores;
Há homens que lutam muitos anos e são muito bons;
Mas há os que lutam toda a vida, esses são os imprescindíveis!

Bertolt Brecht.

RESUMO

Esta pesquisa usa uma imagem captada pelo sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), a bordo do satélite Landsat 7, para calcular a profundidade na Lagoa da Conceição, em Florianópolis. São aplicados três diferentes métodos que variam em função do número de bandas usadas. O primeiro é de autoria de Polcyn (1970), usa uma banda espectral da imagem e é dos primeiros e mais clássicos modelos utilizados para estimar profundidades. O segundo método foi proposto por Stumpf (2003), usa duas bandas da imagem, e segundo seus autores tem a vantagem de reduzir os erros devido à existência de vários tipos de fundo. O terceiro método é proposto por Jupp (1989) e usa 3 bandas da imagem, aproveitando a informação captada pelo sensor e que não é usada no método de Polcyn (1970) ou Stumpf (2003). No final do trabalho é feita uma comparação entre as profundidades calculadas e profundidades medidas com ecobatímetro. As exatidões conseguidas são comparadas com as exigidas pela OHI (Organização Hidrográfica Internacional) para a confecção de cartas náuticas.

ABSTRACT

This research uses an image captured by the sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) on board the Landsat 7 satellite in order to calculate the depth in the Conceição Florianópolis-SC's lagoon. Three different methods were applied and varied according to number of used bands. The first one is authored by Polcyn (1970), it uses an image's spectral band. This method is one of the oldest and widely used to estimate depths. The second method was proposed by Stumpf (2003), it uses two spectral bands and according to its authors have the advantage to reduce the errors generated by the existence of various types of bottom. The third method is proposed by Jupp (1989) and uses 3-band image, it taking advantage of the most useful information to calculate the depth. At the end of the work there is a comparison between the calculated and measured echo sounder depths. The accuracies achieved are compared with those required by the IHO (International Hydrographic Organization) for making nautical charts.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESBOÇO DE ELEMENTOS CHAVES DE UM SISTEMA DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	32
FIGURA 2: ESPECTRO DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO TOPO DA ATMOSFERA E NA SUPERFÍCIE DA TERRA E DA EMISSÃO DE UM CORPO NEGRO A 6000 K	33
FIGURA 3: ESPECTROS DE EMISSÃO DA TERRA E DO SOL. GRÁFICO CONSTRUÍDO COM ESCALA LOGARÍTMICA EM AMBOS OS EIXOS	34
FIGURA 4: ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	35
FIGURA 5: CURVAS TÍPICAS DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO	36
FIGURA 6: PROCESSOS DE INTERAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E A MATÉRIA	38
FIGURA 7: REGIÕES VISÍVEL, INFRAVERMELHO E MICRO-ONDAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. OS GASES RESPONSÁVEIS PELA ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA NAS BANDAS SÃO INDICADOS.	39
FIGURA 8: VARIAÇÃO DO VALOR DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO (K) QUANDO A LUZ ATRAVESSA A ÁGUA NA FAIXA DO COMPRIMENTO DA ONDA DE 0,186 μm A 2,65 μm PARA ÁGUA MARÍTIMA PURA	43
FIGURA 9: QUE EXEMPLIFICA A RELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ZPP (ZONAS DE PENETRAÇÃO DA PROFUNDIDADE)	52
FIGURA 10: LOCALIZAÇÃO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO- FLORIANÓPOLIS-SC.	60
FIGURA 11: USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO.	61
FIGURA 12: MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DAS FÁCIES TEXTURAIIS DO FUNDO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO.	62
FIGURA 13: LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS AMOSTRAIS PARA MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA	63
FIGURA 14: CURVAS ESPECTRAIS NA LAGOA DA CONCEIÇÃO A DIFERENTES PROFUNDIDADES.	64
FIGURA 15: LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO CEDIDO PELA PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS.	68
FIGURA 16: RECORTE DA IMAGEM ORIGINAL.	70

FIGURA 17: ENTORNO DA FERRAMENTA CONTIDA NO ENVI 4.7 PARA A CONVERSÃO DE VALORES DE NÚMEROS DIGITAIS A VALORES DE RADIÂNCIA.	71
FIGURA 18: ENTORNO DA FERRAMENTA FLAASH - ENVI 4.7 USADA PARA FAZER A CORREÇÃO ATMOSFÉRICA.	73
FIGURA 19: ASSINATURA ESPECTRAL ANTES E DEPOIS DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA.....	75
FIGURA 20: ASSINATURA ESPECTRAL CORRIGIDA VS ASSINATURA ESPECTRAL REGISTRADA COM ESPETRÔMETRO DE MÃO.	76
FIGURA 21: DELIMITAÇÃO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO USANDO UMA CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA.	77
FIGURA 22: DESLOCAMENTO DE UMA MASCARA OU KERNEL SOBRE UMA IMAGEM FILTRADA.	78
FIGURA 23: IMAGEM ANTES E DEPOIS DA FILTRAGEM DE MEDIA COM TAMANHO DE MASCARA 3X3	79
FIGURA 24: DADOS DE ECOBATÍMETRO ANTES (VERMELHO) E DEPOIS DE REPROJETADOS (AZUL).	80
FIGURA 25: CÁLCULO DA MARÉ NO DIA 13 DE JULHO DO 2001 ÀS 13:05:01 HS.....	81
FIGURA 26: ZONAS AMOSTRADAS PARA O CALCULO DAS ESTATÍSTICAS DE REFLETÂNCIA NA ZONA ESCURA.	83
FIGURA 27: PIXELS DA BANDA 1 COM PIXELS MAIORES QUE RMAXZE.....	85
FIGURA 28: PIXELS DA BANDA 2 COM PIXELS MAIORES QUE RMAXZE.....	86
FIGURA 29: PIXELS DA BANDA 3 COM PIXELS MAIORES QUE RMAXZE.....	87
FIGURA 30: PIXELS DA BANDA 4 COM PIXELS MAIORES QUE RMAXZE.....	88
FIGURA 31: ZONAS DE PENETRAÇÃO DE PROFUNDIDADE – ZPP’S USADOS NO MÉTODO DE JUPP.	89
FIGURA 32: AMOSTRAS.....	90
FIGURA 33: COMPORTAMENTO DA PROFUNDIDADE EM FUNÇÃO DA REFLETÂNCIA PARA A ZPP-1	94
FIGURA 34: COMPORTAMENTO DA PROFUNDIDADE EM FUNÇÃO DA REFLETÂNCIA PARA A ZPP-2	94
FIGURA 35: COMPORTAMENTO DA PROFUNDIDADE EM FUNÇÃO DA REFLETÂNCIA PARA A ZPP-4	95
FIGURA 36: AMOSTRA USADA PARA CALCULAR AS CORRELAÇÕES DE STUMPF.	96

FIGURA 37: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*RB2)/\text{LN}(N^*RB1)$ VS PROFUNDIDADE AMOSTRA.....	97
FIGURA 38: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*RB2)/\text{LN}(N^*RB3)$ VS PROFUNDIDADE AMOSTRA.....	97
FIGURA 39: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*RB2)/\text{LN}(N^*RB4)$ VS PROFUNDIDADE AMOSTRA.....	98
FIGURA 40: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*RB2)/\text{LN}(N^*RB1)$ VS PROFUNDIDADE PARA A ZPP2.....	99
FIGURA 41: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*B2)/\text{LN}(N^*B3)$ VS PROFUNDIDADE PARA A ZPP-2.....	99
FIGURA 42: CORRELAÇÃO $\text{LN}(N^*B2)/\text{LN}(N^*B3)$ VS PROFUNDIDADE PARA A ZPP-2.....	100
FIGURA 43: CORRELAÇÃO $\text{LN}(B1-B1\text{PROMZE})$ VS PROFUNDIDADE.....	101
FIGURA 44: CORRELAÇÃO $\text{LN}(B2-B2\text{PROMZE})$ VS PROFUNDIDADE.....	101
FIGURA 45: CORRELAÇÃO $\text{LN}(B3-B3\text{PROMZE})$ VS PROFUNDIDADE.....	102
FIGURA 46: CORRELAÇÃO $\text{LN}(B4-B4\text{PROMZE})$ VS PROFUNDIDADE.....	102
FIGURA 47: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE POLCYN PARA A BANDA 2.	108
FIGURA 48: MAPA TEMÁTICO DAS DIFERENÇAS ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA USANDO O MÉTODO DE POLCYN SOBRE A BANDA 2 DA IMAGEM.....	109
FIGURA 49: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE STUMPF USANDO A RELAÇÃO DE BANDAS B2/B1.....	110
FIGURA 50: MAPA TEMÁTICO DAS DIFERENÇAS ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA USANDO O MÉTODO DE STUMPF PARA A RELAÇÃO DE BANDAS B2/B1.	111
FIGURA 51: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE STUMPF USANDO A RELAÇÃO DE BANDAS B2/B4.....	112
FIGURA 52: MAPA TEMÁTICO DAS DIFERENÇAS ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA USANDO O MÉTODO DE STUMPF PARA A RELAÇÃO DE BANDAS B2/B4.	113
FIGURA 53: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE JUPP SOBRE A ZONA DE PENETRAÇÃO 1.	114

FIGURA 54: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE JUPP SOBRE A ZONA DE PENETRAÇÃO 2.	115
FIGURA 55: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE JUPP SOBRE A ZONA DE PENETRAÇÃO 4.	115
FIGURA 56: DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA COM O MÉTODO DE JUPP SOBRE TODAS AS ZONAS.	116
FIGURA 57: MAPA TEMÁTICO DAS DIFERENÇAS ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA USANDO O MÉTODO DE JUPP.	117
FIGURA 58: COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA PARA CADA UM DOS MÉTODOS APLICADOS NA ZPP-1.	118
FIGURA 59: COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA PARA CADA UM DOS MÉTODOS APLICADOS NA ZPP-2.	119
FIGURA 60: COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA PARA CADA UM DOS MÉTODOS APLICADOS NA ZPP-4.	120
FIGURA 61: COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A PROFUNDIDADE REAL E A PROFUNDIDADE CALCULADA PARA CADA UM DOS MÉTODOS APLICADOS.	121

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: ERROS MÉDIOS PARA OS MÉTODOS DE ÍNDICE DE DIFERENÇA NORMALIZADA DA ÁGUA.....	56
QUADRO 2: RELAÇÃO PROFUNDIDADE REAL X PROFUNDIDADE ESTIMADA NA LAGOA DA CONCEIÇÃO.....	57
QUADRO 3: PROPRIEDADES DO SATÉLITE LANDSAT 7.....	65
QUADRO 4: CONSTANTES L_{MIN} E L_{MAX} USADAS PARA A CALIBRAÇÃO DA IMAGEM.	66
QUADRO 5: MODELOS PARA A CORREÇÃO DA COLUMNA DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA LATITUDE E ÉPOCA DO ANO.....	73
QUADRO 6: REFLETÂNCIAS MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA NA ZONA ESCURA. .	83
QUADRO 7: PROFUNDIDADE MÁXIMA DE PENETRAÇÃO PARA A ZPP-4.....	91
QUADRO 8: PROFUNDIDADE MÁXIMA DE PENETRAÇÃO PARA A ZPP-1.....	91
QUADRO 9: PROFUNDIDADE MÁXIMA DE PENETRAÇÃO PARA A ZPP-2.....	92
QUADRO 10: CONSTANTES DE CADA BANDA NECESSÁRIAS PARA O CÁLCULO DO MÉTODO DE JUPP.....	93
QUADRO 11: PRECISÕES EXIGIDAS PELA OHI SEGUNDO O ORDEM DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ENVI – Environment for Visualizing Images

FLAASH – Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral

Hypercubes

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

OHI –Organização Hidrográfica Internacional.

QUAC- Quick Atmospheric Correction.

ZPP- Zona de penetração de profundidade.

NASA- National Aeronautics and Space Administration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVO GERAL	29
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	29
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO	31
2.1.1	FONTES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.	32
2.1.2	ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.	35
2.1.3	COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS.	35
2.2	ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E A SUA INTERAÇÃO COM A MATÉRIA.	37
2.2.1	INTERAÇÃO DA LUZ COM A ATMOSFERA.	38
2.2.2	INTERAÇÃO DA LUZ COM A ÁGUA.	41
2.3	TÉCNICAS PARA DERIVAR BATIMETRIA COM IMAGENS DE SATÉLITE	45
2.3.1	MÉTODOS LINEARES.	46
2.3.2	MÉTODOS MULTIBANDA	48
2.4	TRABALHOS PARA DETERMINAÇÃO BATIMÉTRICA UTILIZANDO IMAGEM DE SATÉLITE.	55
2.4.1	CABRAL (1993)	55
2.4.2	TEDESCO (2003)	55
2.4.3	KRUG (2005)	56
2.4.4	RIBEIRO (2008)	56
2.4.5	FOERSTNOW (2011)	57

3	AREA DE ESTUDO	59
3.1	LOCALIZAÇÃO	59
3.2	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.	60
3.3	SEDIMENTOS NO FUNDO DA LAGOA	62
3.4	REFLETÂNCIA ESPETRAL.	63
4	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	65
4.1	MATERIAIS.	65
4.1.1	IMAGEM LANDSAT 7	65
4.1.2	W-TIDES 3.1.8	66
4.1.3	LEVANTAMENTO COM ECOBATÍMETRO.	67
4.1.4	ENVIRONMENT FOR VISUALIZING IMAGES 4.7 (ENVI)	69
4.1.5	ARCIS 10.0	69
4.2	PRE-PROCESSAMENTO	69
4.2.1	RECORTE DA IMAGEM	70
4.2.2	CONVERSÃO DOS VALORES ND A VALORES DE RADIANCIA.	70
4.2.3	CORREÇÃO ATMOSFERICA - REFLETÂNCIA	72
4.2.4	DELIMITAÇÃO DA ZONA REFLECTANTE.	76
4.2.5	FILTRAGEM	77
4.2.6	REPROJEÇÃO DO DOS DADOS DE ECOBATÍMETRO.	79
4.2.7	CONVERSÃO RASTER - VECTOR	80
4.2.8	CORREÇÃO DA MARÉ.	81
4.3	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	82
4.3.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO JUPP (1989)	82
4.3.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO STUMPF (2003)	95
4.3.3	APLICAÇÃO DO METODO POLCYN (1970)	100
5	ANALISE E RESULTADOS	105

5.1	PRECISÃO BATIMÉTRICA EXIGIDA PELA DHN	105
5.2	MÉTODO DE POLCYN (1970)	108
5.3	MÉTODO DE STUMPF (2003)	110
5.4	MÉTODO DE JUPP (1989)	114
5.5	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	118
6	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	<u>123</u>
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>127</u>
	<u>ANEXO A</u>	<u>136</u>

1 INTRODUÇÃO

Batimetria é a técnica para determinação e representação gráfica do relevo de fundo de áreas submersas (mares, lagos, rios). É expressa cartograficamente por isobatas que unem pontos da mesma profundidade, à semelhança das curvas de nível topográficas (Pereira 2008).

A batimetria tem sido convencionalmente mapeada usando ecobatímetros. O equipamento consiste em uma fonte emissora de sinais acústicos e um relógio interno que mede o intervalo entre o momento da emissão do sinal e o instante em que o eco retorna ao sensor (Pereira 2008). Esta metodologia pode atingir profundidades de até 500 m com uma exatidão de poucos centímetros. Porém, a medição em águas superficiais tem duas desvantagens: 1.O processo pode ser perigoso devido ao calhado da embarcação e 2. O sensor pode-se saturar devido ao curto tempo de reflexo da sinal. (Green 2000, Gao 2009)

O LiDAR (Light Detection and Ranging), também pode ser usado para o cálculo da batimetria e funciona similarmente ao ecobatímetro, só que neste caso a medida é feita sobre um pulso de luz laser e o receptor é transportado por um avião, que de igual maneira mede o tempo que demora o pulso em atingir o fundo do mar e retornar para o receptor. Segundo Green (2000), com este método pode-se mapear áreas de até 100 Km² em um único dia com uma exatidão de $\pm 20-30$ cm. Porém, apresenta custo elevado, alcançando valores entre US\$250.000-300.000 para uma área de 1000 Km², incluindo custos de processamento de dados.

O princípio fundamental por trás do uso de sensoriamento remoto para o cálculo de batimetria é que diferentes comprimentos de onda da luz penetram na água em diferentes graus. Este método tem a vantagem de coletar os dados sinopticamente sobre grandes áreas e a um baixo custo, em função do tipo de imagem e da qualidade do processamento. Porém a máxima profundidade atingida por este método é de 25 m em águas claras e consideravelmente menos em águas com turbidez, dependendo da quantidade de sedimento.

O sensoriamento remoto é cada dia mais usado para avaliar o estado e planejar o uso dos recursos naturais costeiros. Um estudo feito por Green (2000) levantou junto a 150 gestores costeiros e cientistas qual aplicação de sensoriamento remoto é atualmente mais utilizado, ou

com maior potencial de uso na área do gerenciamento costeiro. Do total de 41 aplicações, reunidas em 8 grupos, o grupo de inventário e mapeamento de recursos foi a que obteve a maior relevância (32%), seguida pelo grupo de Mapeamento Batimétrico (17%). A atualização ou ampliação de mapas batimétricos é a aplicação mais usada neste último grupo (51%), seguida pelo mapeamento de perigos na navegação e pelo planejamento de pesquisas hidrográficas (16% e 13%, respectivamente). Este resultado mostra como a batimetria calculada a partir de sensoriamento remoto é usada principalmente como apoio ou informação secundária no desenvolvimento de diferentes projetos ou pesquisas.

As imagens de satélite como insumo para o cálculo de batimetria, vêm sendo usadas há cerca de quatro décadas por diferentes autores, (Polcyn 1970, Lyzenga 1978, Benny 1983, Philpot 1989) com resultados satisfatórios. Estes métodos fundamentam-se na lei de Beer's, a qual diz que a luz é atenuada exponencialmente pela profundidade da água devido à absorção e espalhamento. Segundo Loomis Jr (2009) os diferentes métodos podem ser classificados em função do número de bandas em "métodos lineares" e "métodos multibanda". Num estudo feito por Green (2000), foi comparado o método multibanda de Jupp (1989) com os métodos de Lyzenga (1978) e Benny (1983), que usam uma única banda. As correlações obtidas foram de 0.91 no método multibanda, em comparação a 0.52 e 0.53 das outras duas metodologias, evidenciando a melhor correlação dos métodos multibanda.

Neste trabalho serão usados três métodos para o cálculo da profundidade, dois multibanda e um unibanda. O primeiro é proposto por Jupp (1989), e faz uso de Zonas de Penetração da profundidade ZPP, ou DOP, pelas suas siglas em inglês (*Depth penetration zones*). O segundo é proposto por Stumpf (2003) e atenua o erro associado com a variabilidade do tipo de fundo. Por último será usado o método de Polcyn (1970), que usa uma única banda e é um dos mais antigos e usados nas diferentes pesquisas.

1.1 Objetivo Geral

Estimar a profundidade da Lagoa da Conceição aplicando três diferentes métodos que usam técnicas de sensoriamento remoto e comparar as exatidões obtidas com as exigidas pela OHI (Organização Hidrográfica Internacional) para a confecção de cartas náuticas.

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar um pre-processamento à imagem obtida pelo sensor Landsat-7 no dia 13 de Julho de 2013.
2. Estimar as profundidades da Lagoa da Conceição usando os métodos de (Jupp 1989), (Stumpf 2003) e (Polcyn 1970).
3. Calcular a diferença entre as profundidades calculadas e as fornecidas pela prefeitura de Florianópolis, as quais foram medidas com ecobatímetro de precisão.
4. Comparar as exatidões calculadas com as exigidas pela Organização Hidrográfica Internacional OHI para a confecção de cartas náuticas.

1.3 Justificativa do Trabalho

Segundo PNUMA (2007) o Brasil conta com 12% do total dos recursos hídricos do planeta, reconhecido como um dos países mais abundantemente dotado. Este recurso é usado em diferentes atividades: geração de energia, transporte aquaviário, aquicultura, pesca, turismo, esportes, entre outras. O conhecimento das profundidades vem ajudar qualquer das atividades anteriores, confeccionando cartas náuticas ou como apoio em pesquisas hidrográficas.

As medições feitas com Laser podem ser muito caras, podendo custar até US\$300.000 por cada 1000 Km², em quanto que as feitas com ecobatímetro podem ser perigosas ou gerar erros em profundidades baixas. É aí que as imagens de satélite são uma boa opção para o cálculo da batimetria. Ainda não consigam obter medidas em águas profundas (maiores a 25m em águas claras), são baratas e podem ser usadas para a atualização de cartas náuticas em águas rasas, como já foi feito por Abdullah (2012), Warne (1978), Benny (1983) e Baban (1993).

Esta pesquisa oferece uma guia para aqueles pesquisadores ou entidades que estiverem precisando de dados batimétricos em águas rasas, e que contem com um orçamento reduzido.

Um trabalho similar já foi feito na Lagoa da Conceição usando o método NDWI (Normalized Difference Water Index), o qual é uma modificação do NDVI (Normalized Difference Vegetal Index), criado originalmente para estimar a quantidade, qualidade e desenvolvimento da vegetação. Os métodos apresentados nesta pesquisa foram feitos especificamente para calcular a profundidade da água, baseiam-se na ley de Beer's, a qual diz que a luz perde energia em função da profundidade.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos: No capítulo 1 apresenta-se a introdução, objetivos e justificativa da pesquisa. O capítulo 2 faz uma introdução ao sensoriamento remoto, e apresenta as pesquisas já feitas no Brasil e o mundo que usam imagens de satélite para o cálculo da batimetria. A localização, propriedades físicas e espectrais da área de estudo apresentam-se no capítulo 3. Os materiais usados, o pre-processamento feito à imagem, e a aplicação dos métodos estão no capítulo 4. O capítulo 5 e 6 analisam os resultados obtidos e tira conclusões da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interação da energia eletromagnética com os diferentes corpos do meio ambiente gera reações. Às vezes estas podem gerar efeitos indesejáveis sobre uma imagem de satélite, ou pelo contrário, podem ser a informação base usada para descrever processos físicos.

Neste capítulo faz-se uma introdução aos conceitos básicos de sensoriamento remoto, se expõem as fontes que geram a energia eletromagnética, como esta viaja através do espaço e quais são suas diferentes interações com a matéria.

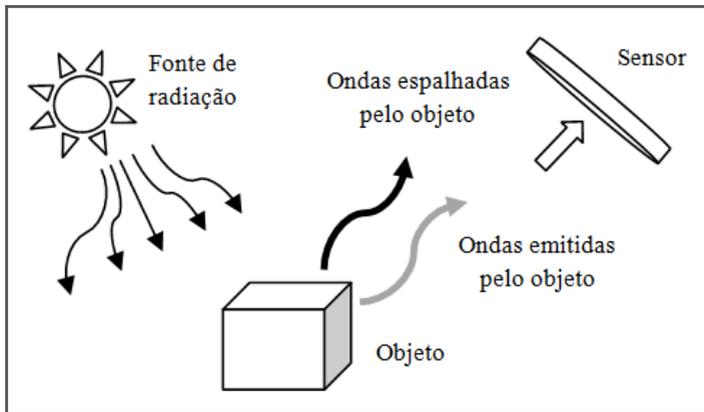
Serão apresentadas as diferentes técnicas para calcular profundidades usando imagens de satélite, como estas se classificam, quais foram usadas no Brasil e o mundo, e quais foram os resultados obtidos.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é a ciência e a arte de obter informação de um objeto, área, ou fenômeno através das análises de dados adquiridos por um sensor que não entra em contato com o objeto, área ou fenômeno sobre pesquisa (Lillesand 2004).

O sensoriamento remoto funciona basicamente da seguinte maneira: uma fonte de ondas electromagnéticas ilumina o objeto a ser estudado. A onda ao interagir com o objeto é espalhada e ao mesmo tempo alterada por diferentes processos de interação que contêm as “impressões digitais” do objeto. Em alguns casos, o objeto é a sua própria fonte e contêm ondas com informações sobre as suas propriedades. Uma parte das ondas espalhadas e das ondas irradiadas é então recolhida por um coletor e gravadas em um detector (Figura 1). Um processo inverso é então utilizado para inferir as propriedades do objeto a partir das propriedades medidas da onda recebida. (Elachi 2006)

Figura 1: Esboço de elementos chaves de um sistema de sensoriamento remoto



Fonte: Adaptado de Elachi (2006)

Os sistemas de sensoriamento remoto, especialmente os transportados por satélites, proveem uma repetitiva e consistente vista do planeta que propicia o monitoramento dos efeitos das atividades humanas, permitindo o monitoramento de mudanças globais, da atividade agrícola, da exploração de recursos não renováveis, do mapeamento, da meteorologia, etc (Schowengerdt 2007).

O uso do sensoriamento remoto pode-se dividir em dois caminhos, o primeiro é o mais clássico, chamado por Schowengerdt (2007) de *centrado na imagem* ou *subsistema de coleta de dados*. Este envolve a interação de uma pessoa com experiência em localizar e identificar elementos de interesse, por exemplo: rios, estruturas geológicas, vegetação, rodovias, prédios, aeroportos etc.

O segundo caminho é chamado pelo mesmo autor de *centrado no dado* ou *subsistema de análise de dados*. Neste caso o experto está mais interessado nas dimensões do dado mesmo, da quantidade de energia recebida pelo sensor. Um exemplo é o estudo feito nesta pesquisa, que se fundamenta no cálculo da quantidade de energia refletida por uma coluna de água para o cálculo da sua profundidade.

2.1.1 Fontes de radiação eletromagnética.

O sensoriamento remoto funciona a partir das ondas eletromagnéticas geradas de maneira natural ou artificial por uma fonte. O Sol é a principal fonte de energia eletromagnética natural disponível

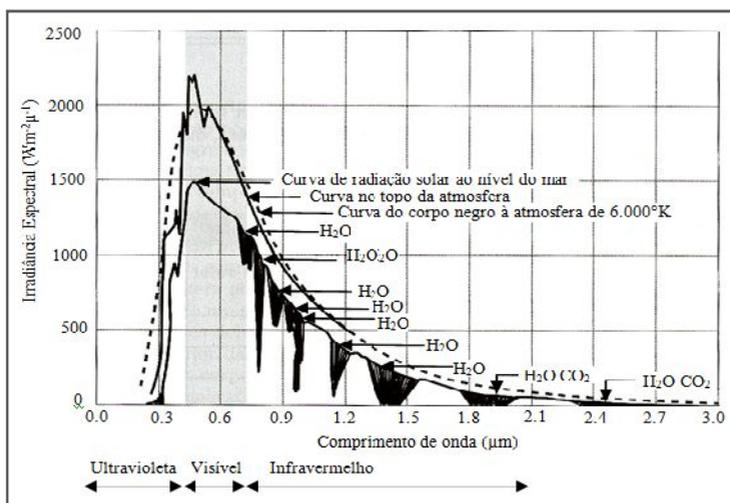
para o sensoriamento remoto, chamado de sensor passivo. A esta energia proveniente do Sol em direção à Terra foi dado nome de fluxo radiante.

Além do sol existe outro tipo de fontes que são construídos pelo homem e geram energia artificial, chamados de sensores ativos. Alguns destes tipos de fontes são o ecobatímetro ou o Lidar. Uma das principais vantagens destes sensores é sua condição de obter imagens a qualquer hora do dia, ou no caso do Lidar, quando a cobertura de nuvens é total.

Qualquer material com temperatura acima de 0°K gera uma energia radiante, no caso do Sol a energia é muito variável devido às grandes variações de temperatura que ocorrem na sua superfície e pela opacidade de certas regiões da atmosfera terrestre.

A energia gerada pelos diferentes corpos tem uma continuidade que abrange um comprimento de onda desde nanômetros até metros, viaja à velocidade da luz e se propaga no vácuo. A Figura 2 representa graficamente a energia radiante do Sol que incide sobre a Terra para cada comprimento de onda, esta energia assemelha-se à de um corpo negro com temperatura equivalente a 6000°K (Novo 1992).

Figura 2: Espectro de radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície da terra e da emissão de um corpo negro a 6000 K



Fonte: Adaptado de Novo (1992)

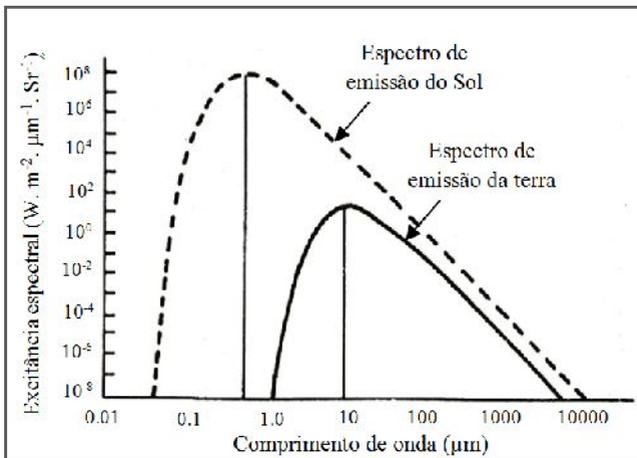
Na figura 2 pode-se observar que o máximo de energia disponível gerada pelo sol, encontra-se na faixa de $0,4\ \mu\text{m}$ a $0,7\ \mu\text{m}$, conhecida

como região visível do espectro eletromagnético. Porém, nem toda a energia radiante do Sol pode chegar diretamente até a superfície da terra ou pode ser visível. Existem regiões do espectro eletromagnético nas quais a atmosfera é opaca, ou seja, não permite a passagem de radiação eletromagnética.

Além disso, o olho humano percebe somente à radiação eletromagnética entre 0,4 e 0,7 μm (espectro visível) através das mudanças fotoquímicas que ocorrem na retina. Comprimentos de onda superiores a 0,7 μm ou inferiores a 0,4 μm embora atinjam a retina, não produzem estímulos visuais.

Vale salientar que não todos os corpos emitem a mesma energia, como foi dito anteriormente, isto varia em função da sua temperatura. O espectro de radiação da terra aproxima-se do espectro de radiação de um corpo negro à temperatura de 300°K, em comparação aos 6000°K do Sol. A Figura 3 mostra a diferença aproximada entre o espectro do Sol e da Terra.

Figura 3: Espectros de emissão da Terra e do Sol. Gráfico construído com escala logarítmica em ambos os eixos



Fonte: Adaptado de Sensoriamento remoto (Novo 1992)

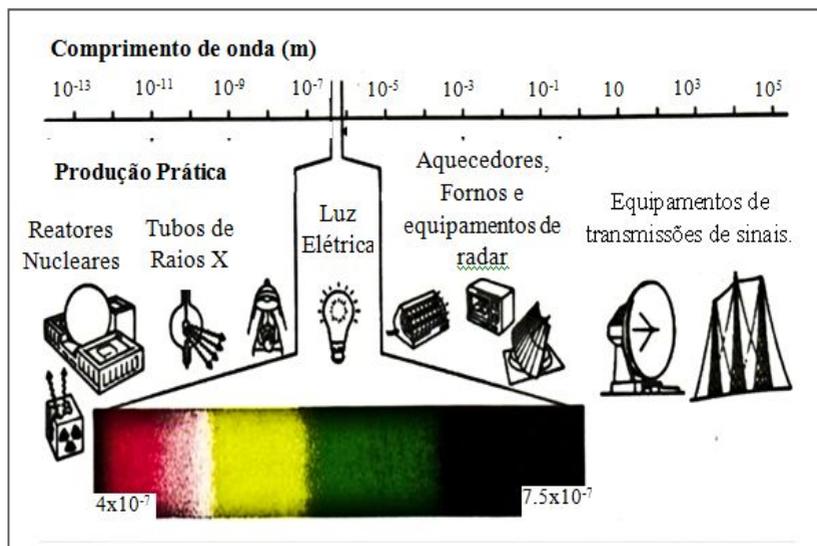
A figura 3 traz dois aspectos importantes: a quantidade total de energia emitida pelo Sol é muito maior que aquela emitida pela Terra, e a região de máxima emissão encontra-se em comprimentos de ondas menores que aquelas de máxima emissão da terra. Por conseguinte, a

maior parte da energia gravada por um sensor passivo é aquela que depois de ser emitida pelo Sol e refletida pela Terra.

2.1.2 Espectro eletromagnético.

O espectro eletromagnético é formado pelos diferentes comprimentos de ondas gerados pelas diferentes fontes, sejam estas passivas ou ativas. O Sol tem sua maior intensidade na faixa de 0,4-0,7 μ m, em quanto que as ativas variam em função do tipo de fonte, sendo que o homem já construiu fontes que geram ondas com comprimentos de 10^{-5} a 10^8 m. A Figura 4 representa o espectro eletromagnético, com as radiações conhecidas e algumas das suas possíveis fontes.

Figura 4: Espectro Electromagnético



Fonte: (Brasileira. 2012)

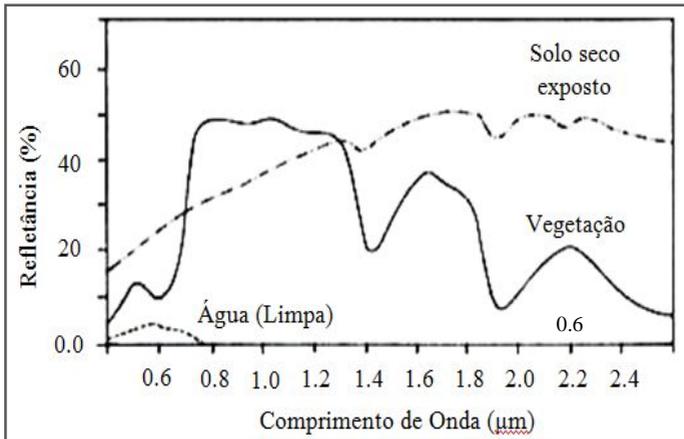
2.1.3 Comportamento Espectral dos alvos.

O comportamento espectral dos alvos ou assinatura espectral é a variação na radiação eletromagnética refletida ou absorvida por um material em diferentes comprimentos de onda, esta variação identifica um objeto em particular (Camacho 2006).

Esta refletância é gravada por um instrumento chamado espectroradiômetro, as medidas podem ser tomadas de três modos: em laboratório, no campo ou a partir de uma plataforma elevada (helicóptero, avião ou satélite). (Novo 1992)

A água apresenta baixa refletância em comparação com outros elementos (Figura 5), a maioria da sua energia refletida encontra-se nos comprimentos de onda entre 0,38 μm e 0,7 μm , acima dos 0,7 μm é absorvida totalmente (Novo 1992).

Figura 5: Curvas típicas de reflectância espectral da água, solo e vegetação



Fonte: Adaptado de (Tedesco 2003)

Para estudos com sensoriamento remoto é fundamental o conhecimento do comportamento espectral do material em estudo e dos fatores nos quais ele sofre interferência. Dado que os objetos estão inseridos num contexto ambiental, estes sofrem interferências de múltiplas fontes, quer oriundas dos objetos adjacentes, quer oriundas do seu próprio dinamismo interno (Novo 1992). Por exemplo: a presença de pragas na lavoura ou a irrigação podem mudar o espectro na vegetação, o tamanho do pixel em que é gravada a informação pode captar o espectro de varias fontes dado que a energia integrada em um pixel é derivada de um conjunto de objetos, uma mistura de refletâncias, No caso específico da água, uma das interferências pode ser a quantidade de sólidos em suspensão.

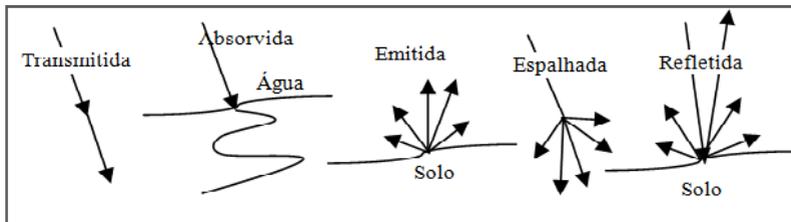
2.2 ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E A SUA INTERAÇÃO COM A MATÉRIA.

A energia eletromagnética que incide sobre a matéria, seja ela sólida, líquida ou gasosa, é chamada de radiação incidente. Interações com a matéria podem mudar as propriedades da radiação incidente: intensidade, direção, comprimento de onda, polarização e fase. A ciência do sensoriamento remoto detecta e grava estas mudanças. As imagens e os dados resultantes são interpretados para identificar remotamente as características da matéria que produzem as mudanças na radiação eletromagnética gravada. (Sabins 1996)

As seguintes mudanças podem acontecer (Figura 6):

- Pode ser *transmitida*, isto é, pode passar através de alguma substância. A velocidade de radiação eletromagnética varia na medida em que é transmitida pelo ar, vácuo, ou outras substâncias.
- Pode ser *absorvida* por uma substância, gerando algum outro tipo de energia, como calor, no caso da água.
- Pode ser *emitida* por uma substância, em função da sua estrutura e da sua temperatura. Toda a matéria em temperaturas acima do zero absoluto, 0°K , emite energia.
- Pode ser *espalhada*, isto é, desviada em todas as direções. Superfícies ásperas geram mais espalhamento.
- Pode ser *refletida* de duas maneiras, isto é, se a radiação retorna da superfície do material com um ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência é reflexão especular, mas se esta é refletida com igual intensidade em todas as direções esta é chamada de difusa.

Figura 6: Processos de interação entre a energia eletromagnética e a matéria



Fonte: Adaptado de (Levin 1999)

A emitância, o espalhamento, e a refletância, são chamadas de fenômenos de superfície por que as suas interações são determinadas primeiramente pelas propriedades da sua superfície, como sua cor e sua rugosidade. A transmitância e a absorção são chamadas de fenômenos de volume, por que elas são determinadas pelas características internas do material, como sua densidade e condutividade. As combinações das interações de superfície e de volume em um material particular dependem do comprimento de onda da radiação eletromagnética e das propriedades específicas do material (Sabins 1996).

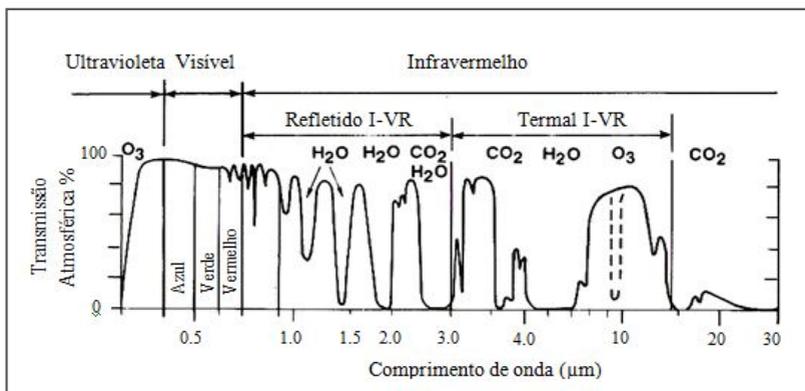
2.2.1 Interação da luz com a atmosfera.

A intensidade de radiação que atinge no topo da atmosfera é muito maior que a que atinge o nível do mar, isso se deve ao efeito da atenuação atmosférica, produzida pelo espalhamento e a absorção atmosférica (Novo 1992).

A atmosfera do planeta Terra absorve a energia nas regiões dos raios gama, raios X, e a maioria da ultravioleta, assim, estas regiões não são usadas para o sensoriamento remoto. Os principais responsáveis por esta absorção são as moléculas de ozônio (O_3), dióxido de carbono (CO_2) e o vapor de água (H_2O). Os sensores passivos usados para o sensoriamento remoto terrestre gravam a energia nas regiões das micro-ondas, infravermelho e visível, assim como uma porção da região UV. Estes intervalos de comprimentos de onda são chamados de janelas atmosféricas (Sabins 1996).

A Figura 7 mostra detalhes destas regiões, o eixo horizontal indica o comprimento de onda em escala logarítmica e o eixo vertical a porcentagem de energia transmitida através da atmosfera da Terra.

Figura 7: Regiões visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético. Os gases responsáveis pela absorção atmosférica nas bandas são indicados.



Fonte: Adaptado de (Sabins 1996)

O espalhamento atmosférico acontece quando a radiação entrante interatua com moléculas de gás presentes na atmosfera causando o redirecionamento do seu caminho original. O espalhamento depende do comprimento de onda, da quantidade de partículas de gás e da distância que a radiação viaja através da atmosfera. (Levin 1999)

Existem dois tipos de espalhamento, o Rayleigh e o Mie. O espalhamento Rayleigh acontece quando as partículas de gás são menores comparados com o comprimento de onda da radiação incidente, tais como partículas nitrogênio ou moléculas de oxigênio. Estas partículas produzem um maior espalhamento nos comprimentos de onda curta (a cor azul do céu é devido ao maior espalhamento na banda azul do espectro) e se caracteriza por acontecer na camada superior da atmosfera (Levin 1999).

O espalhamento Mie acontece quando o diâmetro das partículas na atmosfera é similar ao comprimento de onda da radiação. Poeira, pólen, fumaça e vapor de água são causas comuns de espalhamento Mie, que tende a afetar a comprimentos de onda mais longos do que aqueles afetados por espalhamento Rayleigh. O espalhamento Mie acontece principalmente nas partes mais baixas da atmosfera, onde as partículas maiores são mais abundantes (Levin 1999).

O espalhamento atmosférica afeta de duas maneiras a quantidade de energia que é gravada pelo sensor: 1) ela atua como um refletor, adicionando uma energia extra ao sinal que é detectado pelo sensor e 2)

ela atua com um absorvedor, atenuando a intensidade de energia que ilumina o alvo na superfície. Devido a isto os valores de refletância dos alvos tem um valor adicional ou menor de energia, considerado um erro, o qual tem que ser corrigido, esta correção é chamado de correção atmosférica.

Atualmente, existem inúmeros modelos para correção atmosférica de imagens de satélite, cada um com suas vantagens e limitações. Segundo Liang (2001) todos os métodos reportados na literatura para correção atmosférica de imagens tiradas com o sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) do Landsat 7 podem se agrupar em: objeto invariante, emparelhamento de histograma, objeto escuro, e redução de contraste, cada um com suas vantagens e suas desvantagens.

São muitos os softwares computacionais que incluem algoritmos para fazer correções atmosféricas, o ENVI (Environment for Visualizing Images), por exemplo, inclui o modelo DOS (Dark object subtraction) de Chavez (1989), o QUAC (Quick atmospheric correction) de Bernstein (2005) e o método FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) de Adler-Golden (1999).

Segundo (Gürtler (2009), Andrade (2010)) o método DOS proposto por Chavez (1989) é um dos métodos mais simples para correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais (ND) da imagem de satélite. Além disso, destaca-se deste método que não há necessidade de obter dados das condições atmosféricas na data de obtenção das imagens. Porém, o método ignora a transmitância e a irradiância, e devido a esta grande simplificação no procedimento o erro associado pode ser grande. (Moran 1992).

O método QUAC é recente, foi desenvolvido no ano 2005 por Spectral Sciences, Inc. sobre o patrocínio do laboratório de pesquisas da força aérea dos Estados Unidos. Segundo seu criador, Bernstein (2005), este método é aplicável a imagens multi-espectrais e hiper-espectrais que permite recuperar a profundidade óptica afetada pelos aerossóis, a névoa e absorvedores moleculares. Esta metodologia calcula os parâmetros de compensação diretamente a partir das informações contidas na cena, usando o espectro observado no pixel. A abordagem baseia-se no conhecimento empírico de que o desvio padrão espectral de uma coleção de espectros de materiais diversos, tais como os espectros de minerais em uma cena, é essencialmente espectralmente plana. (Bernstein 2005)

O QUAC incluído no ENVI permite fazer uma correção automatizada de imagens multispectrais e hiperespectrais na região solar refletiva espectral (0.4-2.5 μm), além disso, suporta imagens dos sensores IKONOS, Landsat, MODIS, AVIRIS, etc (ENVI 2009).

O outro método aplicável no software ENVI é o FLASHH, esta ferramenta baseada no algoritmo MODTRAN, também desenvolvido pelo laboratório de pesquisas da força aérea dos Estados Unidos, suporta a análise de imagens multi-espectrais e hiper-espectrais, visíveis e de infravermelho próximo. Os objetivos principais são: fornecer exatidão, descrição da superfície e das propriedades atmosféricas (albedo, elevação relativa, coluna de vapor de água, aerossol e propriedades ópticas das nuvens e temperaturas) baseado na física da lei de transmitância da luz de Beer's (Anderson 1999, Cooley 2002).

O FLASHH opera com base no conhecimento prévio de alguns dados, tais como: o tipo de dado hiperespectral, o sensor que foi utilizado para obter os dados, e qualquer informação MODTRAN conhecida que for necessária para gerar informações atmosféricas, (Meta-dados relacionados com as condições de aquisição, tais como altitude do sensor, a energia solar e a geometria de visualização)(Cooley 2002).

2.2.2 Interação da luz com a água.

A interação da luz com a água pode se resumir assim: uma porção da energia de radiação solar que incide na superfície da água é refletida e outra penetra na água, aquela que entra chega ao fundo e reflete para fora da água, a qual é gravada pelo sensor (Liu 2006). A equação 1 modela este processo.

$$I_o = I_r + I_a + I_d \quad (1)$$

Onde:

- I_0 é a intensidade da luz que incide na água;
- I_r é a intensidade da luz refletida diretamente pela superfície da água;
- I_a é a intensidade da luz absorvida pela água;
- e I_d é a intensidade de luz que penetra a água, chega ao fundo e é por ele refletido.

A energia I_d é a que os sensores medem para monitorar as propriedades dos recursos hídricos. (Liu 2006)

A perda de energia da luz ao entrar na água resulta de dois processos, absorção e espalhamento. A absorção envolve a conversão de energia eletromagnética em outro tipo como calor ou fotossíntese. O processo de espalhamento é causado pelo material orgânico ou inorgânico em suspensão na água, e aumenta em função da quantidade de material em suspensão (turbidez).

Segundo Liu (2006) a capacidade de penetração da luz na água é medida pelo fator chamado coeficiente de extinção (k) que considera ambos os efeitos de absorção e espalhamento. Assim:

$$I_d = I_0 * e^{-pk} \quad (2)$$

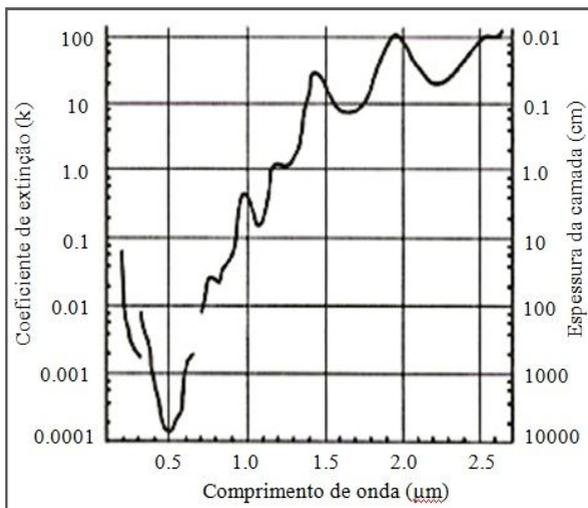
Onde:

- K é o coeficiente de extinção da água e
- p a distância que a luz atravessa.

A equação 2 é denominada de lei de Beer's,

A Figura 8 mostra a variação do valor de k quando a luz atravessa a água na faixa do comprimento da onda de $0,186 \mu\text{m}$ a $2,65 \mu\text{m}$ para água marítima pura. Observa-se que a melhor faixa do comprimento de onda na detecção da penetração profunda da luz na água é na faixa visível (ao redor de $0,5 \mu\text{m}$).

Figura 8: Variação do valor do coeficiente de extinção (k) quando a luz atravessa a água na faixa do comprimento da onda de $0,186 \mu\text{m}$ a $2,65 \mu\text{m}$ para água marítima pura



Fonte: Adaptado de (Liu 2006)

O espalhamento gerado na água é função do tamanho das partículas do material em suspensão, as partículas suspensas mais finas favorecem mais o espalhamento nas ondas mais curtas no espectro visível. Essa cor muda gradualmente para verde quando o tamanho das partículas aumenta. Segundo Liu (2006) a cor da água pura, profunda e infinita é azul, mas pela presença de impurezas, a cor tem tendência a mudar na seqüência azul esverdeada, verde, verde amarelada, amarela e marrom.

2.3 TÉCNICAS PARA DERIVAR BATIMETRIA COM IMAGENS DE SATÉLITE

O sensoriamento remoto óptico oferece uma alternativa para os levantamentos tradicionais da profundidade da água, com a vantagem que os dados são coletados rapidamente sobre grandes áreas. Porém, como já fora dito, este tipo de batimetria pode alcançar uma profundidade de 25m em águas claras, e consideravelmente menos em águas com turbidez.

A batimetria óptica é sustentada pelo princípio de que a quantidade total de energia radiante refletida por uma coluna de água é uma função da profundidade da água. Por tanto, a intensidade do sinal recebida pelo sensor é indicativa da profundidade que a radiação solar penetrou. Para calcular esta profundidade é preciso um modelo que relacione os valores de radiância das imagens de satélite e as profundidades em locais amostrados (Gao 2009). O fundamento que relaciona estas duas variáveis é apresentado na equação 2, a qual considera que a energia incidente na água se “extingue” exponencialmente em função da profundidade.

A profundidade que pode alcançar a energia incidente varia em função do comprimento de onda e da turbidez da água. Em comprimentos de onda curta (banda azul) a energia pode chegar a penetrar numa profundidade de até 25 metros, porém na faixa do vermelho a profundidade pode ser de poucos metros. No caso da turbidez, as partículas de sedimento em suspensão, o fitoplâncton e o material orgânico dissolvido afetam a transmitância da água, já que estas partículas espalham e absorvem a energia.

Segundo Green (2000) os usos práticos da batimetria encontrada com imagens de satélite podem ser múltiplos, tais como: atualização ou ampliação de cartas náuticas existentes (Bullard 1983), complemento no mapeamento de riscos de transporte (Jupp 1985), mapeamento de corredores de transporte (Gray 1988), planejamento de levantamentos hidrográficos (Benny 1983), monitoramento da acumulação e perda de sedimentos na costa (Danaher 1988), auxílio na interpretação de características de recifes (Zainal 1993), entre outros.

São vários os autores que fazem classificações das metodologias existentes para o cálculo da batimetria com uso de sensoriamento remoto. Gao (2009) faz uma classificação em função do método de coleta dos dados, ele os classifica em: os que usam imagens (de satélite, aéreas ou microondas) e os que não usam imagens (LIDAR, ecobatímetro etc). Loomis Jr (2009) os classifica de acordo com o

número de bandas espectrais utilizadas em “métodos lineares” ou “métodos multibanda”. Yarbrough (2003) fazem uma classificação dos modelos que atuam sobre águas pouco profundas em “spectral ratioing” ou “razão espectral” e “radiative transfer” ou “transferência radiativa”. Neste capítulo serão apresentados os métodos citados pelos anteriores autores, segregados em lineares e multibanda.

2.3.1 Métodos Lineares.

Estes modelos são caracterizados por usar uma única banda da imagem para o cálculo da profundidade. Bandas com comprimentos de banda entre 0.45-0,6 μ m são as mais empregadas devido a sua maior penetração na água.

Duas hipóteses são feitas para os modelos unibanda, a primeira diz: que a luz é atenuada exponencialmente à profundidade da coluna de água, e a segunda, que a qualidade da água é consistente com a imagem em particular (o coeficiente de atenuação K é constante em toda a imagem). (Green 2000).

2.3.1.1 Polcyn (1970)

Um dos primeiros modelos apresentados para calcular a profundidade do mar com o uso de imagens de satélite foi proposto por Polcyn (1970). Este modelo despreza os efeitos devidos ao espalhamento e à reflexão interna na superfície da água, e apresenta a equação 3 como forma de obter a profundidade.

$$L = L_{\infty} + CR_b e^{-KfD} \quad (3)$$

Ao isolar a equação 3 obtemos a profundidade:

$$D = \frac{1}{fK} * Ln\left(\frac{CR_b}{L - L_{\infty}}\right) \quad (4)$$

Onde:

- L é a radiância observada na banda,
- L_{∞} é a radiância média observada sobre uma região profunda,
- C é a constante que é função da irradiância solar no topo da atmosfera, da transmitância da atmosfera, e da refletância de fundo sobre o tipo de fundo observado em cada pixel,

- R_b é a reflectância de fundo,
- K é o coeficiente de atenuação da água para cada banda,
- f é o fator geométrico relativo ao caminho óptico através da água e
- D é a profundidade da água para cada pixel da imagem.

Autores como (Abdullah (1991), Mishra (2004), Liu (2010)) e autores brasileiros como Cabral (1993) basearam seus estudos no modelo de Polcyn (1970) para o cálculo da Batimetria.

2.3.1.2 Benny (1983)

Benny (1983) também propuseram um modelo aplicável a águas pouco profundas, assim:

$$Z = \frac{\ln(L_x - L_d) - \ln(L_o - L_d)}{-K[1 + \cos(E')]} \quad (6)$$

Onde:

- L_d e L_o refere-se à radiança para águas profundas e pouco profundas respectivamente.
- L_x representa a radiança da água numa profundidade x , e
- E' é o ângulo da radiação entrante na superfície da água.

Este modelo toma em conta a atenuação da luz refletida do fundo usando pontos com profundidades conhecidas. Assim, as condições locais são consideradas para o cálculo de K . (Gao 2009). Esta metodologia foi implementada no estudo de Muslim (2008).

2.3.1.3 Philpot (1989)

Um modelo que se pode usar em águas de propriedades ópticas homogêneas e fundo uniforme é o de Philpot (1989):

$$Z = -\frac{1}{g} * \ln\left(\frac{L_d - L_o}{L_b}\right) \quad (7)$$

Onde:

- g é um coeficiente de atenuação da água,
- L_d é radiância da água opticamente profunda e
- L_b é uma variável sensível à refletância do fundo.

2.3.1.4 Civco (1992)

Em resposta às limitações do modelo de Polcyn (1970) para ser usado em águas turvas onde a reflexão do fundo está oculta ou simplesmente não existe (águas profundas), foi desenvolvido o modelo de Civco (1992) o qual obtêm melhores resultados nestes casos. A equação é a seguinte:

$$D = -\frac{1}{K} * Ln \left(1 - \frac{L - B'}{A'} \right) \quad (5)$$

Onde:

- A' é um parâmetro relacionado com a transmissão atmosférica e a refletância de uma coluna de água, e
- B' contém somente os efeitos da irradiância atmosférica e do céu, estes dois parâmetros são determinados usando uma regressão baseada em dados batimétricos conhecidos. (Gao 2009)

Os métodos apresentados neste capítulo são os mais citados ou usados para o calculo da batimetria, porém, existem mais alguns métodos lineares, como: O método “empírico” apresentado por (Gao 2009) onde a profundidade é calculada em função de uma regressão linear.

2.3.2 Métodos multibanda

Os modelos do item 2.3.1 utilizam só uma banda do espectro eletromagnético. Porém, existem também algumas que usam duas ou mais bandas para calcular dados de batimetria.

Segundo Gao (2009) usualmente os modelos onde se usam unicamente uma banda para o cálculo da batimetria estão sujeitos a perda de informação valiosa nas outras bandas de um sensor multi-espectral. A metodologia linear e a multibanda compensam a variação

de albedo no fundo (areia, algas, corais, etc.) e recuperam a batimetria em águas com profundidades menores que 10 a 15 m, porém, o método linear não diferencia profundidades maiores que 15m e é mais sujeito a variabilidade em estudos de atóis ou recifes. (Stumpf 2003)

2.3.2.1 Lyzenga (2006)

Um dos modelos que usam mais de uma banda do espectro é apresentado por Lyzenga (2006):

$$Z = -\frac{1}{\alpha} [\ln(L_b) - \ln(L' - L'_s)] \quad (8)$$

Onde:

- α representa a soma dos coeficientes de atenuação difusa para a ressurgência e subsidência da luz,
- L_b inclui as perdas de transmissão através da interface ar-água e os efeitos da refletância do fundo,
- L' representa a radiância corrigida para o brilho do sol e/ou variações atmosféricas,
- L'_s é o retorno médio da água profunda que foi corrigido para brilho do sol, mas ainda sujeita ao efeito de espalhamento da coluna de água.

Este modelo é aplicável para áreas de propriedades ópticas uniformes e refletância do fundo. Em contraste com os modelos de uma banda, este leva em consideração o reflexo do sol. Além disso, envolve o uso de bandas multi-espectrais que pode suprimir eficazmente erros na profundidade da água causados por variações na refletância inferior e/ou nas propriedades ópticas da água. (Gao 2009)

2.3.2.2 Metodo Stumpf (2003)

Segundo Stumpf (2003) o uso de duas ou mais bandas para o cálculo da batimetria permite a separação das variações em águas que tem fundos com albedos diferentes. A metodologia de Stumpf (2003) em comparação às outras metodologias múltipla-bandas tem vantagem na facilidade de sua implantação. Segundo os autores os coeficientes para o algoritmo podem se ajustar manualmente com pouco conhecimento da zona a ser mapeada.

São vários os autores (Heron 2004, Shapiro 2005, Camacho 2006, Ji 2008, Loomis Jr 2009) que usaram este método para o cálculo de batimetria.

Este método baseia-se na relação das quantidades de absorção de energia nos diferentes comprimentos de onda. Bandas diferentes atenuarão em quantidades diferentes a energia que penetra na coluna de água. Enquanto a profundidade aumenta, a refletância captada na banda com uma maior taxa de absorção irá diminuir proporcionalmente mais rápido do que a banda com uma menor taxa de absorção. Por conseguinte, a relação das refletâncias entre duas bandas irá aumentar a medida que a profundidade aumenta (Camacho 2006).

Com bandas tendo absorções diferentes da água, uma banda terá valores de refletância aritmeticamente menores que a outra. Assim, tal como os valores de refletância mudam com a profundidade, a relação entre elas mudará. Como a profundidade aumenta enquanto que a refletância de ambas as bandas diminui, o ln da Refletância na banda com maior absorção $Ln(R_w(\lambda_i))$ diminuirá proporcionalmente mais rápido que o ln da refletância na banda com menor absorção $Ln(R_w(\lambda_j))$. Por conseguinte, a relação entre duas bandas (por exemplo: a banda azul e a banda verde) irá aumentar.

Se a condição anterior se aplicasse, esperaríamos que a relação fosse a profundidade aproximada, independente do tipo de albedo, e ainda que fosse preciso apenas ser escalada à profundidade real, assim

$$Z = m_1 \frac{Ln(nR_w(\lambda_i))}{Ln(nR_w(\lambda_j))} - m_o \quad (9)$$

Onde:

- m_1 é uma constante ajustável para dimensionar a relação com a profundidade,
- n é uma constante fixa para todas as áreas, e
- m_o é uma compensação para a profundidade de 0 m ($Z=0$).

O valor fixo de n na equação 9 é escolhido para assegurar que o valor do logaritmo seja positivo e que a relação das bandas produza uma resposta linear com a profundidade. (Stumpf 2003)

O autor esclarece que embora se possam construir vários algoritmos empíricos com uma variedade de combinação de bandas, incluindo refletâncias sem a transformação log, todos exigiriam mais

parâmetros de ajuste e soluções mais complexas do que a método proposto. (Stumpf 2003).

2.3.2.3 NDWI (Normalized Difference Water Index)

Um modelo que usa especificamente duas bandas é o NDWI – (Normalized Difference Water Index), este faz uso do sinal refletido nas regiões do infravermelho próximo e do verde visível para realçar a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (McFeeters 1996), assim:

$$\frac{DN_2 - DN_4}{DN_2 + DN_4} \quad (10)$$

Onde:

- DN_2 = é o valor digital do pixel na faixa verde do espectro visível.
- DN_4 = é o valor digital do pixel na faixa do infravermelho próximo do espectro visível.

2.3.2.4 Jupp (1989)

O método de Jupp (1989) pode se dividir em duas etapas: 1. Cálculo das ZPP (Zonas de penetração da profundidade), 2. Interpolação das ZPP com as profundidades reais conhecidas

O método de Jupp (1989) tem três premissas:

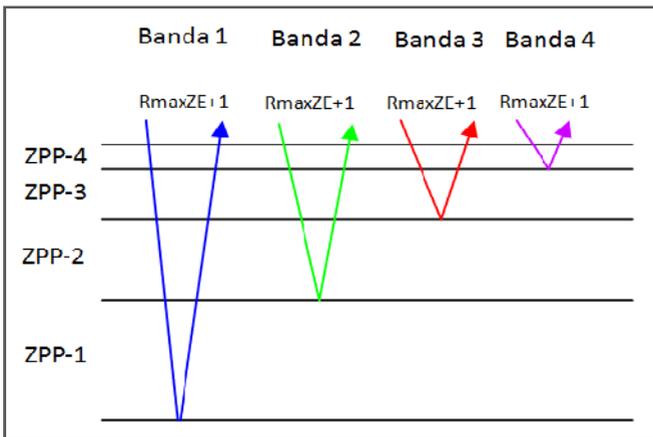
1. A luz é atenuada exponencialmente em função da profundidade
2. A qualidade da água (e por conseguinte o fator de atenuação K) não varia com a imagem e
3. A cor (e, por conseguinte, as propriedades de reflexão) do substrato é constante.

As zonas de penetração são delimitadas usando os pixels da imagem com os mínimos valores de refletância, estes indicam que a luz não consegue penetrar mais na água. Diferentes bandas da imagem penetram na água com diferentes intensidades, em função da sua localização no espectro eletromagnético. Em águas limpas as bandas perto da faixa azul do espectro penetram mais na água que as bandas perto da faixa verde ou vermelha.

São chamados de pixels de zona escura aqueles que absorvem totalmente a luz, são identificados em lugares muito profundos da imagem. Estes pixels teoricamente teriam que ter valores de refletância de 0, porém, o espalhamento atmosférico e outras interações do meio ambiente fazem que não seja assim.

A construção das diferentes zonas de penetração se faz tomando uma amostra de pixels numa área com pixels escuros, ou seja, numa área onde a profundidade seja maior à que penetra a luz. Os pixels que estejam por acima do máximo valor da amostra conseguem penetrar na água e voltar para o sensor. São estes últimos que fazem parte de cada zona de penetração ou ZPP. A figura 9 ilustra a interação entre a energia e a água, neste caso as bandas corresponderiam às captadas por um sensor ETM+.

Figura 9: que exemplifica a relação entre as diferentes ZPP (Zonas de penetração da Profundidade)



Fonte: Applications of satellite and airborne image data to coastal management. (Edwards 1999)

O cálculo das ZPP não designa uma profundidade para cada pixel, em vez disso, atribui um pixel a uma faixa de profundidade. Assim é necessário a interpolação das profundidades para cada pixel dentro de cada ZPP.

Segundo Jupp (1989) para um tipo de fundo particular, o valor de ND (Numero digital do pixel) pode variar entre um mínimo, que é o ND localizado em águas profundas, e um máximo, que seria o valor obtido na superfície. Assim, entre a profundidade máxima de penetração

para a banda 2 (z_2) e a superfície, o valor ND é uma função da profundidade Z , com uma taxa de decréscimo dos valores de ND controlados pelo coeficiente de atenuação (k_2). Na ZPP 2 os valores de um pixel podem ser expressados assim:

$$L_2 = L_{2profmedia} + (L_{2superficie} - L_{2profmedia}) \cdot e^{-2k_2z} \quad (11)$$

Onde

- $L_{2profmedia}$ é o valor médio de um pixel em águas profundas para a Banda 2,
- $L_{2superficie}$ é o valor médio de um pixel em águas superficiais ,
- k_2 é o coeficiente de atenuação e
- Z a profundidade.

O autor do modelo define uma nova variável, assim:

$$X_2 = \log_e(L_2 - L_{2profmedia}) \quad (12)$$

Mudando a equação original para a seguinte:

$$X_2 = \text{Log}_e \cdot (L_{2superficie} - L_{2profmedia}) - 2k_2z \quad (13)$$

Para um dado tipo de fundo na banda 2, $\text{Log}_e \cdot (L_{2superficie} - L_{2profmedia})$ é uma constante denominada A_2 . Deste modo, a equação 16 será:

$$X_2 = A_2 - 2k_2z \quad (14)$$

A equação 14 é a base para a interpolação das profundidades em cada ZPP. Se um pixel está entre a ZPP da banda 2 e a ZPP da banda 1 (Zona com menor coeficiente de atenuação), o pixel tem um valor X_{2min} dado por:

$$X_{2min} = A_2 - 2K_2Z_2 \quad (15)$$

Onde:

- k_2 e A_2 são coeficientes específicos da banda 2 e,
- Z_2 é a máxima penetração da luz na banda 2 (a profundidade onde é obtida a mínima refletância na ZPP 2).

Agora considerando outro pixel que se encontra entre a ZPP da banda 2 e a ZPP da banda 3 (Zona com o seguinte maior coeficiente de atenuação), o pixel tem um valor X_{2max} dado por:

$$X_{2min} = A_2 - 2K_2Z_3 \quad (16)$$

Os valores de X_{2min} e X_{2max} , Z_2 e Z_3 podem ser obtidos diretamente da imagem.

Igualando a equação 18 e a equação 19 pode ser obtida a equação para calcular o valor de K_2 .

$$K_2 = \frac{(X_{2max} - X_{2min})}{2 \cdot (Z_2 - Z_3)} \quad (17)$$

E, por conseguinte o valor de A_2 :

$$A_2 = X_{2min} + 2 \cdot K_2Z_2 \quad (18)$$

A partir da equação 17 pode-se isolar o valor de Z :

$$Z = \frac{(A_2 - X_2)}{2K_2} \quad (19)$$

O procedimento anterior será realizado para cada uma das bandas e cada uma das ZPP de modo a determinar a profundidade da cada pixel. E por conseguinte o mapa com as profundidades da zona em estudo.

2.4 TRABALHOS PARA DETERMINAÇÃO BATIMÉTRICA UTILIZANDO IMAGEM DE SATÉLITE.

Os trabalhos apresentados a continuação foram os encontrados após fazer uma pesquisa no banco de teses da capes e no Google Scholar. Para cada um destes trabalhos é descrito o método usado, a região na que foi feita o estudo, o sensor que gravou a imagem, e as profundidades e exatidões conseguidas.

2.4.1 Cabral (1993)

Cabral (1993) Realizou um estudo na porção nordeste do Rio Grande do Norte, na região frontal ao Cabo Cancanhar, sendo selecionada uma sub-cena de 1000 x 1000 pixels. A imagem usada foi a do sensor TM do satélite Landsat 5, esta teve um tratamento radiométrico e geométrico prévio. O estudo usou duas metodologias: primeiro a metodologia de Polcyn (1970), seguida pela extração da batimetria via transformação por componentes principais. Foram comparados os resultados obtidos, com dados de batimetria real fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN, assim:

- Foi obtido um coeficiente de correlação de 0,69 entre o modelo de transformação de componentes e o modelo de Polcyn (1970).
- O coeficiente entre o modelo de transformação de componentes e os dados reais foi de 0,795.
- Por último a correlação entre o modelo de Polcyn (1970) e os dados reais foi de 0,918.

Cabral (1993) concluiu que 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 e, que a faixa de profundidade útil será dependente de fatores como a transparência da água, a concentração do material em suspensão e fitoplanctônico.

2.4.2 Tedesco (2003)

Tedesco (2003) utilizou o imageador de alta resolução Ikonos II para o cálculo da batimetria. Os experimentos foram realizados no canal localizado entre as Ilhas Sepultura e do Capinzal, na Baía de Guaratuba, no litoral paranaense. O método por ele utilizado foi empírico, ou seja,

determinou uma correlação entre profundidades e valores de níveis digitais - ND. Concluiu-se que as profundidades estimadas, acima de 3,5m apresentam maior confusão, isto porque a partir desta profundidade os valores digitais tornam-se muito parecidos. Concluiu-se também que o método permite estimar profundidades de até 5m com erros menores a 1m. É bom ressaltar que este trabalho não usou nenhum pré-processamento da imagem.

2.4.3 Krug (2005)

Krug (2005) fez seu estudo no Complexo Estuarino de Paranaguá, situado na costa paranaense, no sul do Brasil. A imagem utilizada foi a obtida pelo sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat 7. A imagem foi corrigida atmosféricamente, utilizou-se o método de regressão de bandas. Neste estudo os valores de profundidades foram correlacionados com as bandas 1, 2, 3, 4, e 5 individualmente, com diferentes razões das bandas, com o índice de Diferença Normalizada da Água - MNDWI e, ainda, com os valores de radiância das bandas 3 e 4 (Quadro 1). Sendo o MNDWI o método que apresentou os melhores resultados, assim:

Quadro 1: Erros médios para os métodos de Índice de Diferença Normalizada da Água.

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	0,5
3 – 4 m	0,41	0,42
4 – 4,5 m	0,94	0,51

Fonte: (Krug 2005)

2.4.4 Ribeiro (2008)

Ribeiro (2008) utilizou redes neurais artificiais – RNA, como método para o cálculo da batimetria. Seu estudo foi feito numa área do litoral paranaense que abrange o canal de fundo arenoso, localizado entre as Ilhas Sepultura e do Capinzal, na baía de Guaratuba. A imagem utilizada foi a registrada pelo sensor a bordo do IKONOS II. Segundo o autor, esta metodologia gera resultados que atendem as especificações técnicas da Diretoria de Hidrografia e navegação – DHN, sendo o erro máximo para levantamentos de ordem 1 de 0,25 m a 0,5 m. No entanto,

verificou-se que esta metodologia atende uma faixa restrita de profundidade, entre 0,8 m a 3,0 m, na qual a resposta espectral da coluna de água prevalece sobre o reflexo do fundo e não é fortemente afetada pela absorção.

2.4.5 Foerstnow (2011)

Foerstnow (2011) realizou um estudo na mesma zona de estudo que vai ser usada neste trabalho, Lagoa da Conceição em Florianópolis/SC-Brasil (capítulo 3). A metodologia por eles utilizada é a de NMDWI. A cena foi dividida em diferentes áreas em função da profundidade e da distância da margem. Os resultados das correlações entre os valores calculados e os valores reais são apresentados no quadro 2.

Quadro 2: Relação profundidade real x profundidade estimada na Lagoa da Conceição.

NDWI	Pearson (r)	R ²
Toda a lagoa	0,47	0,33
Profundidade de 1 a 5 m	0,56	0,48
A 100 m da margem	0,75	0,66

Fonte: (Foerstnow 2011)

O autor conclui que o intervalo onde os dados têm uma maior variação ou são mais instáveis é no intervalo de 0,1 a 1,0 m, e ao contrário no intervalo de 4,1 a 5,0 m, que representam 20,4 % do total das profundidades, apresentam uma maior estabilidade. O autor ainda ressalta que nos locais onde foram obtidos os maiores erros note-se a presença de áreas construídas próximas à margem da lagoa.

Além dos estudos já apresentados existem alguns outros, como o feito por Zani (2009), onde a zona de estudo muda de zonas costeiras ou lagoas para rios, nesse caso o rio Paraguai, além de usar um sensor diferente, o ASTER. Ou o estudo de Gonçalves (2009) quem aplica a análise de componentes principais e dados do imageador Ikonos II.

3 AREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Lagoa da Conceição, em Florianópolis-SC, a escolha da área deve-se a sua importância na região. Segundo de Ledo (1989) a lagoa da conceição e suas águas constituem as maiores atrações turísticas e de lazer da Ilha de Santa Catarina (recreação infanto-juvenil, esportes, cultura, turismo, comércio, gastronomia), tanto na alta como na baixa estação. Por estas razões, ela é considerada o ambiente de maior potencial natural, turístico e econômico da Ilha de Santa Catarina. Este capítulo apresenta a localização e algumas propriedades físicas da Lagoa da conceição.

3.1 Localização

A Lagoa da Conceição está localizada na borda leste da Ilha de Santa Catarina, pouco abaixo do trópico de Capricórnio, à latitude $27^{\circ}34'$ se estende, em sentido Norte-Sul, logo atrás de depósitos arenosos, com um comprimento total de 13,5Km; largura entre 2,5 e 0,15Km e área total de aproximadamente 20Km^2 (Figura10). Devido à sua configuração alongada, é dividida de Norte para Sul em Lagoa da Cima, Lagoa do Meio e Lagoa de Baixo, estando esta última ligada ao principal corpo lagunar apenas por um canal estreito sobre o qual passa a ponte que permite a ligação entre as duas margens. (Muehe 1989)

Figura 10: Localização da Lagoa da Conceição- Florianópolis-SC.

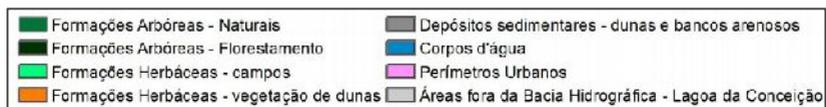
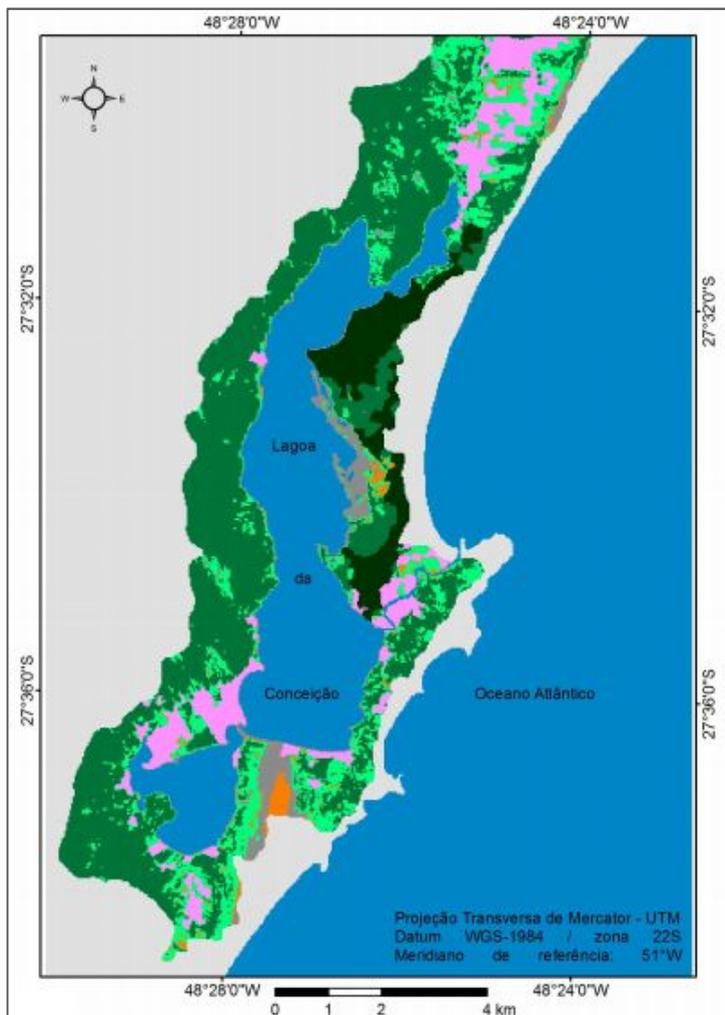


Fonte: Adaptado de (Foerstnow 2011)

3.2 Uso e ocupação do solo.

Um estudo feito por Bonetti Filho (2013) usou imagens gravadas pelo sensor +TM durante os dias 28/07/1986, 30/06/1999 e 02/08/2011 com o objetivo de estimar as alterações de usos e ocupação da terra na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição/Florianópolis. As principais técnicas de processamento usadas sobre a imagem foram: Análise de componentes principais, Índice de vegetação NDVI, segmentação e classificação usando máxima verossimilhança. Para esta pesquisa foi considerado o resultado obtido usando a imagem do dia 30/06/1999 (Figura 11), isto devido a sua maior proximidade com a data da imagem usada para o cálculo da profundidade, 13/07/2001.

Figura 11: Uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.

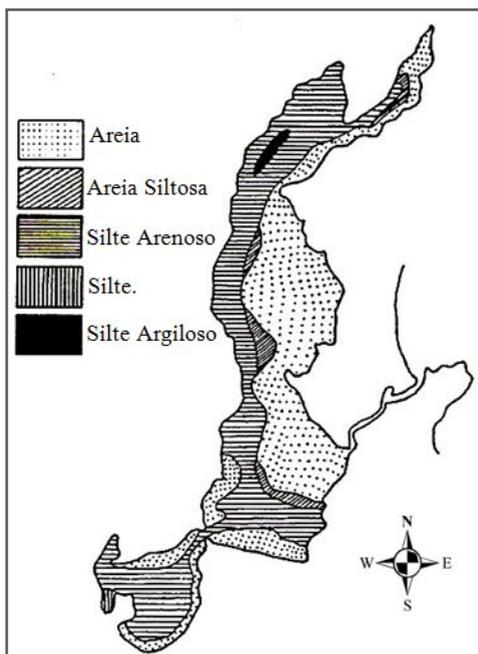


Fonte: Adaptado de Bonetti Filho (2013).

3.3 Sedimentos no fundo da Lagoa

Segundo Gré (1999) os sedimentos encontrados no fundo da Lagoa da Conceição são de duas classes dominantes, representadas pelas areias e lama (Figura 12). As areias estão presentes em praticamente todo o corpo lagunar, sendo provenientes de duas fontes principais: retrabalhamento dos depósitos da Planície costeira e sedimentos originados de processos intempéricos e erosivos a partir das rochas constituintes do Embasamento Cristalino. A lama está presente nas porções mais profundas e abrigadas da laguna. Origina-se no Embasamento Cristalino, ingressa no corpo lagunar e é transportada em suspensão pelas correntes superficiais.

Figura 12: Mapa de distribuição das fácies texturais do fundo da Lagoa da Conceição.



Fonte: Adaptado de (Gré 1999)

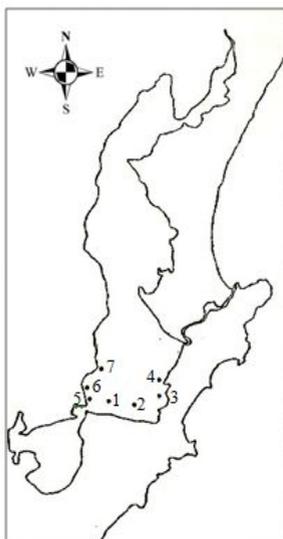
A fácies silte arenosa cobre aproximadamente 45% do fundo, sua presença é dominante nas regiões mais profundas da porção Sul e Central e ao Norte, ocorre paralelamente à margem ocidental. A fácies

areia ocupa cerca de 40 % da superfície, encontra-se principalmente no setor Centro leste, nas porções marginais e bancos adjacentes aos depósitos da Planície Costeira. A fácies areia siltosa representa um sedimento intermediário entre a areia e silte arenoso, ocupando 10% da área na porção Central da Lagoa. O Silte argiloso aparece em apenas 3% do fundo, localiza se no Nordeste da Lagoa, onde o nível energético é suficientemente baixo permitindo a deposição desta fácies. O silte recobre apenas 2% da área e é encontrado em um setor marginal e isolado no Sul da Lagoa. (Gré 1999)

3.4 Refletância espectral.

Um estudo sobre a relação entre os fatores de refletância espectral e os parâmetros hidrológicos da Lagoa da Conceição foi feito por Froidefond (1990), no qual foram estipulados sete pontos para a medição radiométrica (Figura 13).

Figura 13: Localização dos corpos amostrais para medição da refletância

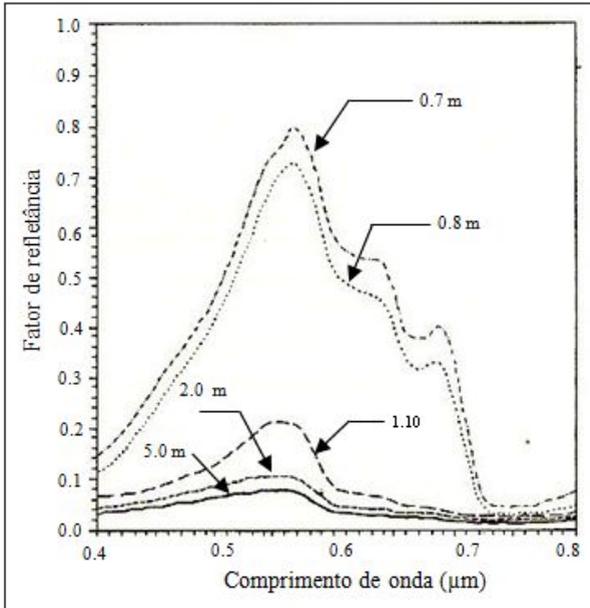


Fonte: Adaptado de (Froidefond 1990)

O estudo conclui que os pontos amostrais de maior profundidade apresentaram maior fator de refletância tendendo para a faixa do verde (aproximadamente 550nm) e os mais rasos para a faixa do amarelo

(aproximadamente 580nm) em função da resposta espectral do fundo arenoso. A Figura 14 mostra os fatores de refletância em função dos comprimentos de onda de cada ponto amostral, onde menores valores de profundidades são maiores os valores de refletância.

Figura 14: Curvas espectrais na Lagoa da Conceição a diferentes profundidades.



Fonte: Adaptado de (Froidefond 1990)

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Este capítulo expõe os recursos e os processos usados para calcular a profundidade na Lagoa da Conceição. Faz-se uma descrição da imagem e os softwares usados, do pre-processamento aplicado na imagem, e dos modelos usados para calcular a profundidade na área de estudo.

4.1 Materiais.

Usou-se neste trabalho uma imagem captada pelo sensor ETM+ a bordo do Landsat-7, baixada sim custo do site da *United State Geological survey (USGS)*. Também usou-se dados de profundidades gravadas com ecobatímetro e cedidas pela prefeitura de Florianópolis.

. Os softwares empregados tem a função de pre-processar a imagem (ENVI 4.7), calcular a maré no dia que foi obtida a imagem (Wtides 3.1.8), e de realizar operações espaciais entre os diferentes dados tipo raster e vetor (ArcGis 10).

4.1.1 Imagem Landsat 7

O Landsat 7 é composto por 8 bandas espectrais (Quadro 3), pode adquirir imagens desde a latitude 81° Norte até a latitude 81° Sul e em todas as longitudes da terra. Uma órbita do Landsat-7 é feita a cada 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas em torno da terra ao dia, e cobrir a totalidade do planeta em 16 dias (resolução temporal). O satélite cruza a linha do equador entre as 10.00hs e as 10.15 (hora local) em cada passagem. O tamanho de uma cena é de 183 Km x 170 Km e sua resolução radiométrica é de 0 bits ou 256 níveis de cinza.

Quadro 3: Propriedades do satélite Landsat 7.

Banda espectral	Intervalo espectral (μm)	Zona do espectro	Resolução espacial (m)
1	0.45-0.515	Visível - Azul	30
2	0.525-0.605	Visível – Verde	30
3	0.63-0.690	Visível – Vermelho	30
4	0.75-0.90	Infravermelho Próximo	30
5	1.55-1.75	Infravermelho Médio	30

6	10.40-12.5	Infravermelho termal	60
7	2.09-2.35	Infravermelho médio	30
Pancromático	0.52-0.90	Visível	15

Fonte: (Irish 2008)

A imagem usada neste trabalho foi gravada em formato Geotiff o dia 13 de Julio de 2001 às 13.01.05 hs hora local. Passou por uma correção tipo “L1T”, a qual usa pontos de control e modelo de elevação (MDT) para georreferenciá-la. É usado como sistema de referencia o elipsoide WGS-84, e como sistema projeção o Universal Tranverse de Mercator (UTM) zona 22.

As constante usadas para calibrar a imagem ($L_{min} - L_{max}$) a valores de radiância são expostas no quadro 4. Informações adicionais sobre o métadatos da imagem encontra-se no Anexo A.

Quadro 4: Constantes Lmin e Lmax usadas para a calibração da imagem.

Banda	L Min	L Max
1	-6.2	191.6
2	-6.4	196.5
3	-5	152.9
4	-5.1	157.4
5	-1	31.06
6	0	17.04
7	-0.35	10.8
8	-4.7	243.1

Fonte: Adaptado da Metadatos da imagem.

4.1.2 W-Tides 3.1.8

As marés são o processo que afeta ao nível do mar. Devem-se à atração que exerce a Lua e o Sol sobre os corpos de água, o que provoca que cada dia se tenha aumentos e reduções no nível da água em relação ao nível médio. O nível médio do mar (Mean Sea Level-MSL) define-se como a altura média das águas calmas durante um período determinado de tempo (meses, anos). Este nível é medido por diferentes estações no Brasil e é usada pela rede de nivelção nacional para referenciar as alturas medidas no território Brasileiro.

O W-Tides é um software que calcula a maré em qualquer lugar do mundo e a qualquer hora do dia. Este Software é usado para calcular a profundidade da Lagoa da Conceição no momento que foi tirada a imagem.

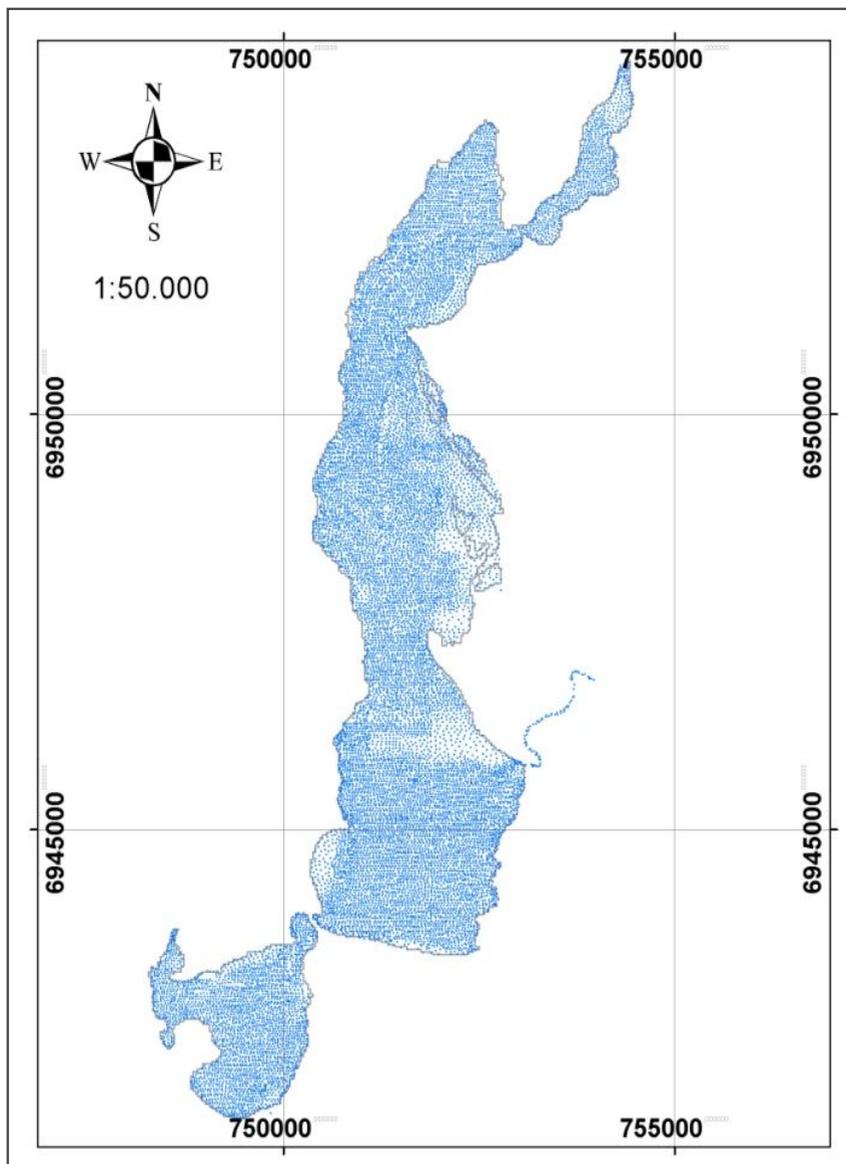
4.1.3 Levantamento com ecobatímetro.

O levantamento com ecobatímetro na Lagoa da Conceição foi contratado pela prefeitura de Florianópolis no ano 2001, abrangendo uma área de aproximadamente 20,65 Km, correspondente à lagoa e ao rio da barra da lagoa. Foram fornecidos pela prefeitura de Florianópolis 79 arquivos em formato .dwg, cada um corrigido por efeito da maré e com as seguintes propriedades:

- Projeção Transversa de Mercator. TM
- Datum Vertical Imbituba – SC,
- Datum horizontal SAD 69
- Precisão das profundidades de 0,1m.

Os 79 arquivos foram juntados e convertidos a formato .shp, mantendo o sistema de referencia original. O total de pontos depois de este processo foi de 15723 (figura 15).

Figura 15: Levantamento batimétrico cedido pela prefeitura de Florianópolis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Environment for Visualizing Images 4.7 (ENVI)

Este software foi desenvolvido para o processamento de imagens multi-espectrais e hiperespectrais, análises de dados e extração de informação. O ENVI foi escrito em linguagem de programação IDL (Interactive data Language), o que possibilita a integração do processamento da imagem e sua visualização em tela. Usou-se o ENVI 4.7 para realizar os seguinte processos:

- Recorte da imagem.
- Conversão de ND (números digitais) a valores de radiância.
- Correção atmosférica usando FLASSH.
- Classificação não supervisionada.
- Filtragem passa baixa.

4.1.5 Arcis 10.0

O ArcGis é um software para a construção de Sistemas de Informação Geográficos –SIG. Os SIG's são um conjunto de hardware, software, dados geográfico e pessoal treinado para levantar, guardar, pesquisar, analisar, e apresentar todo tipo de informação que consiga ter uma referencia geográfica.

A principal função do SIG é identificar e analisar as relações espaciais entre as características de um ou mais fenômenos, chamado comumente de geo-processamento. O Arcgis tem ferramentas de geoprocessamento que conseguem executar tarefas de análise, conversão e administração de dados. As usadas neste trabalho foram as seguintes:

- Project
- Raster to vector
- Spatial Join

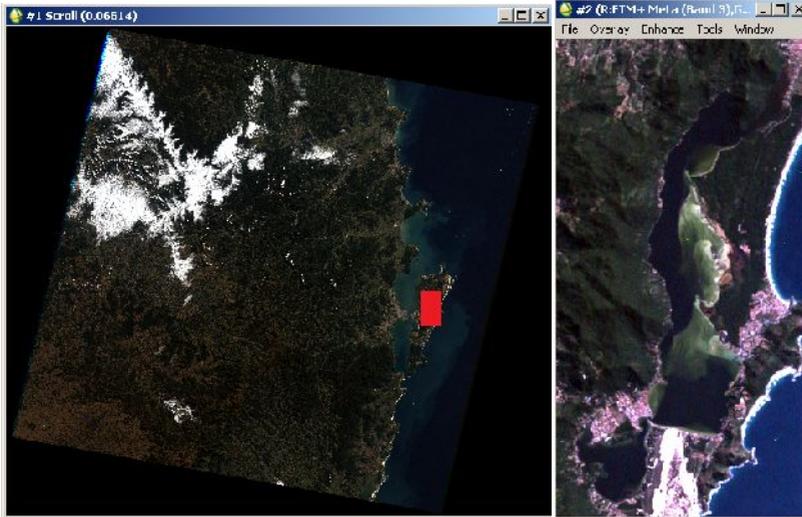
4.2 Pre-processamento

O tratamento prévio tem como objetivo principal reduzir os ruídos gerados por espalhamentos na atmosfera ou refletância de áreas vizinhas, além de converter os valores gravados pelo sensor em unidades físicas, valores de refletância. Os diferentes processos aplicados à imagem e aos dados batimétricos apresentam-se a continuação:

4.2.1 Recorte da Imagem

Com o Objetivo de delimitar a área de interesse um corte na imagem original foi realizado. O tamanho da imagem original era de 7991 x 7551 pixels, e foi reduzido para um tamanho de 246 x 464 pixels (Figura 16).

Figura 16: Recorte da imagem Original.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Conversão dos valores ND a valores de radiação.

Os sensores dos satélites como o Landsat 7 gravam a intensidade da radiação eletromagnética como valores em Números Digitais – ND, em um intervalo de 0 a 255. Estes valores mudam em função do tipo de sensor e as condições nas que foram medidas, portanto, são medidas arbitrárias. Para utilização dos métodos é necessário converter os valores de ND em unidades físicas (radância), esse procedimento será realizado utilizando a equação 23.

$$L_{\lambda} = Lmin_{\lambda} + \left(\frac{Lmax_{\lambda} - Lmin_{\lambda}}{NDmax - NDmin} \right) (ND - NDmin) \quad (23)$$

Onde:

ND = Numero digital de cada pixel

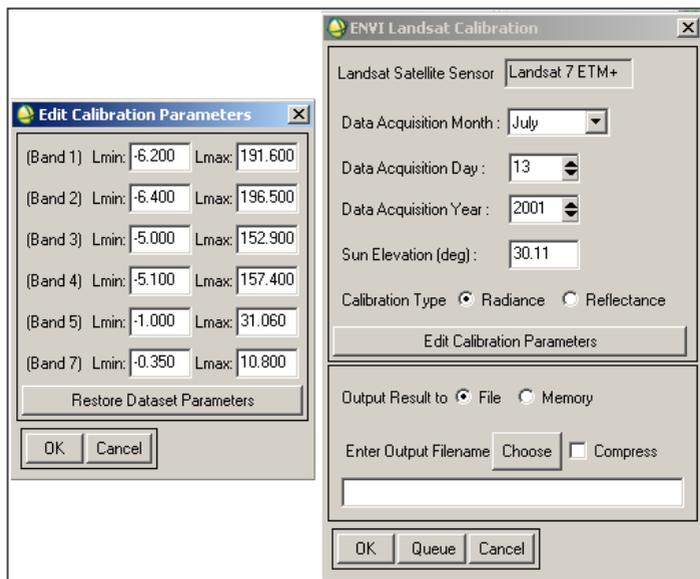
$L_{min\lambda}$ e $L_{max\lambda}$ = São constantes de calibração para cada banda (encontrados na metadatos da imagem).

ND_{max} e ND_{min} = São os valores máximo e mínimo que o ND pode alcançar. O Landsat 7 tem uma resolução de 8 bits, portanto, o ND_{max} é de 255 e ND_{min} é 0.

L_{λ} = Radiância espectral monocromática em unidades de $(W/(m^2 * sr * \mu m))$

Esta conversão foi realizada no software ENVI 4.7 (Figura 17) usando as constantes apresentadas no Quadro 4 do item 4.1.1.

Figura 17: Entorno da ferramenta contida no Envi 4.7 para a conversão de valores de números digitais a valores de radiância.



Fonte : ENVI 4.7

4.2.3 Correção atmosférica - refletância

Quando a energia emitida pelo sol interage com diferentes gases na atmosfera acontece um redirecionamento da luz, gerando um aumento na refletância gravada pelo sensor. Assim é necessário fazer uma correção deste efeito, chamado de correção atmosférica.

Segundo Green (2000) estas correções são fundamentais quando:

1. Realiza-se comparações de imagens em tempo ou espaço.
2. São usados modelos que utilizam a interação entre a radiação eletromagnética e elementos da superfície terrestre, ou
3. Para utilizar relações de bandas para análise de imagens.

A correção atmosférica da imagem foi realizada utilizando a ferramenta FLASSH do ENVI 4.7, a qual se fundamenta no algoritmo MODTRAN (Matthew 2000). Para utilização do FLASSH requer-se que a imagem esteja em unidades de $(\mu W / (cm^2 * sr * nm))$, porém, a refletância tem unidades de $(W / (m^2 * sr * \mu m))$, diferindo esta última por um fator de 10. Assim a imagem cortada é dividida por 10 antes de ser processada com o FLAASH.

Também são requeridas as coordenadas do centro da imagem, o dia que foi gravada a imagem, e a altura que o satélite Landsat 7 percorre o planeta, informações encontradas no Anexo A, e mostradas na figura 18.

Figura 18: Entorno da ferramenta FLAASH - Envi 4.7 usada para fazer a correção atmosférica.

Fonte: ENVI 4.7

Um modelo de correção de coluna de água e outro de efeito aerossol são requeridos para o funcionamento do FLAASH.

Os modelos disponíveis para fazer a correção da coluna de água são: Sub-Artic Winter (SAW), Mid-Latitud Winter (MLW), U.S Standard (US), Sub-Artic Summer (SAS), Mid-Latitud Summer (MLS) e Tropical (T). A seleção é feita usando o Quadro 5, onde o tipo de modelo varia em função da latitude da zona e da época do ano que foi tirada a imagem. Dado que a zona de estudo tem uma latitude de -27° e a imagem foi tirada no mês de Julho, o modelo a ser usado é Mid-Latitud Summer (MLS)

Quadro 5: Modelos para a correção da columna de água em função da latitude e época do ano.

Latitude	Janeiro	Março	Maior	Julho	Setembro	Novembro
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS

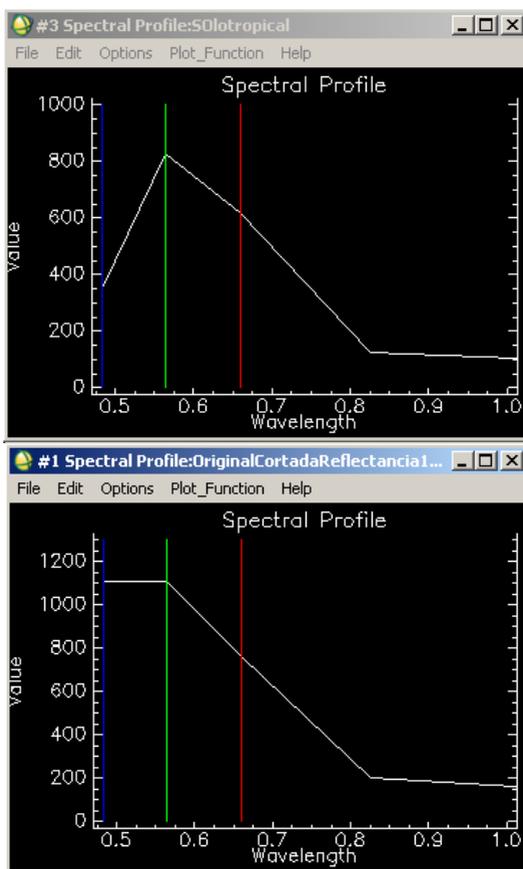
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLS	MLS	T
-30	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	SAS
-60	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-80	MLW	MLW	MLW	SAW	MLW	MLW

Fonte: Adaptado de (ENVI 2009)

Para o efeito aerossol tem-se dentre quatro modelos em função da zona de estudo, estes são: zona rural, urbana, marítima e troposférica. A zona marítima é descrita como aquela situada á beira do mar ou continentes onde prevalece vento vindo do oceano, e segundo isso é a que melhor se adapta á zona da Lagoa da Conceição.

Ao final do processo de correção atmosférica se obtém valores de refletância numa escala de 1-10000. A refletância é adimensional, e representa uma porcentagem da quantidade de energia refletida por um material. Portanto um valor de 1000 na imagem corresponde a 10% da energia refletida do total emitida pela fonte, neste caso o sol. As curvas espectrais antes e depois da correção atmosférica são apresentadas na Figura 19.

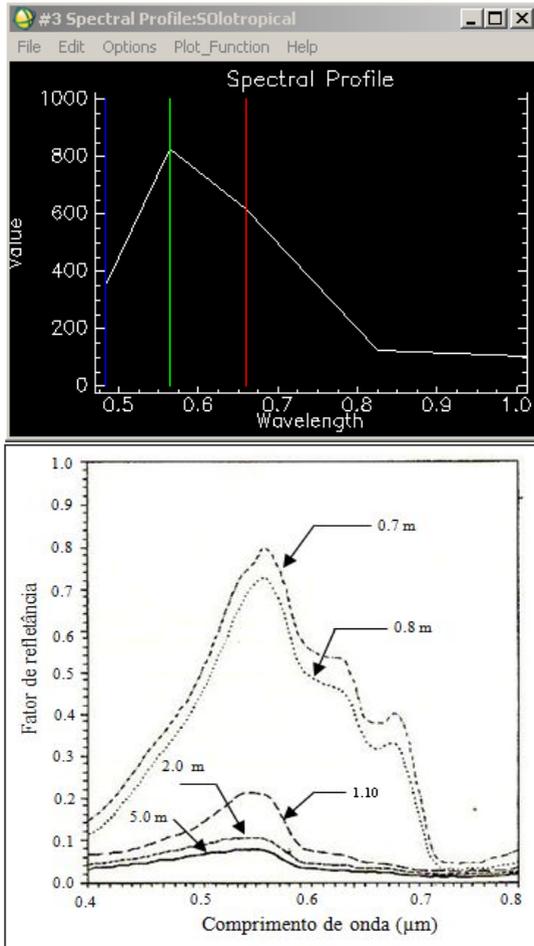
Figura 19: Assinatura espectral antes e depois da correção atmosférica.



Fonte ENVI 4.7

É notável a quantidade de energia resultante devido ao efeito do espalhamento atmosférico. A zona azul da assinatura espectral passou de valores de 1100 a valores de 380, correspondentes a refletâncias de 11% e 3.8% respectivamente. Do mesmo modo, no entanto em menor quantidade, os valores da zona verde desceram de 1100 a 800, e na zona vermelha de 800 a 600. A veracidade da correção atmosférica foi aceita ao compara-la com a assinatura espectral apresentada por (Froidefond 1990), a qual foi medida com espectrômetro de mão, e mostra a refletância mais alta perto da zona verde do espectro electromagnético (Figura 20).

Figura 20: Assinatura espectral corrigida VS Assinatura espectral registrada com espectrômetro de mão.



Fonte : ENVI 4.7 e Froidefond (1990)

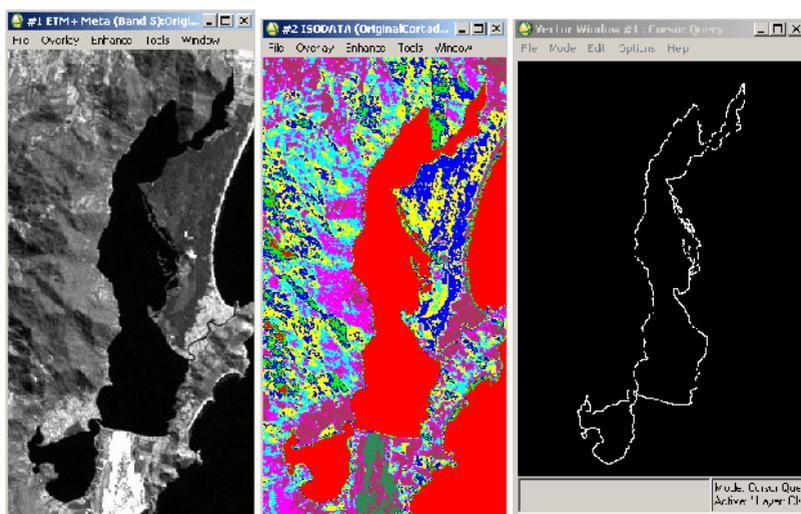
4.2.4 Delimitação da Zona reflectante.

Um passo importante foi selecionar aqueles pixels que interagem totalmente com a água, ou seja, os que não tem interferências por elementos adjacentes. O corpo de água reflete energia no intervalo de 0,38 μm a 0,7 μm do espectro electromagnético, e é pouca ou quase nula em comprimentos de ondas maiores. A banda 5 do Landsat 7 tem um

cumprimento de onda de $1.65 \mu\text{m}$, portanto, a energia que atinge a água neste comprimento de onda é totalmente absorvida.

Usando a banda 5 da imagem da Lagoa da Conceição foi feita uma classificação não supervisionada do tipo IsoData. O produto foi um arquivo tipo raster com 10 classes, a qual foi convertida num polígono (Figura 21). Os pixels que estão dentro do polígono são os que têm uma interação direta com a água, e serão os usados para calcular a profundidade da água.

Figura 21: Delimitação da lagoa da conceição usando uma classificação não supervisionada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

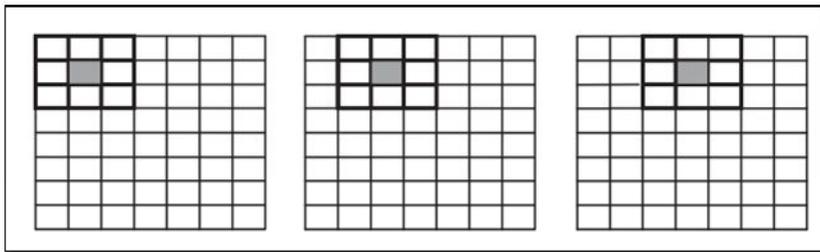
4.2.5 Filtragem

A aplicação da filtragem foi decidida após fazer um primeiro cálculo das Zonas de penetração de profundidade ou ZPP's, onde foram observadas irregularidades devido à interferência de ruídos na imagem.

São vários os tipos de filtros aplicáveis nas imagens, os mais comuns são os chamados de passa-alta e os de passa-baixa. Os filtros passa-alta tendem a realçar os detalhes da imagem enquanto os de passa baixa tendem a suaviza-la, atenuando regiões de bordas e detalhes finos da imagem, como ruídos. Dentre as técnicas mais conhecidas de suavização estão os filtros de média e da mediana.

Para aplicar a filtragem é definida uma janela composta por um número ímpar de linhas e colunas, chamada de máscara (Kernel). A filtragem consiste no deslocamento desta máscara pixel a pixel sobre toda a imagem, e envolve o cálculo do valor do pixel central em função do conjunto de pixel da área da imagem coberta pela máscara (Figura 22). A filtragem é considerada uma operação de área ou vizinhança e não pontuais, por isso a refletância de um pixel p após a filtragem depende da refletância original de p e de o seus vizinhos.

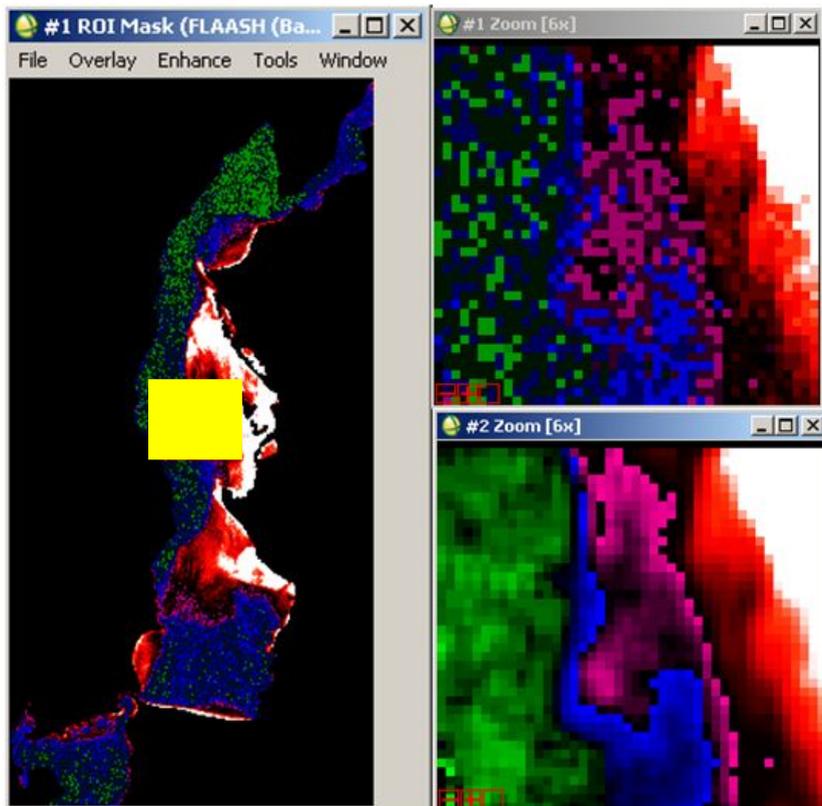
Figura 22: Deslocamento de uma máscara ou Kernel sobre uma imagem Filtrada.



Fonte: IBGE (2001)

Neste trabalho foi aplicado um filtro de média ponderada de tamanho 3X3, este substitui a refletância do pixel central pela média aritmética das refletâncias dos seus vizinhos mais próximos. A Figura 23 apresenta o resultado da filtragem, é notável como as refletâncias foram atenuadas, não tendo pixels “intrusos” sobre algumas zonas.

Figura 23: Imagem antes e depois da Filtragem de media com tamanho de mascara 3x3



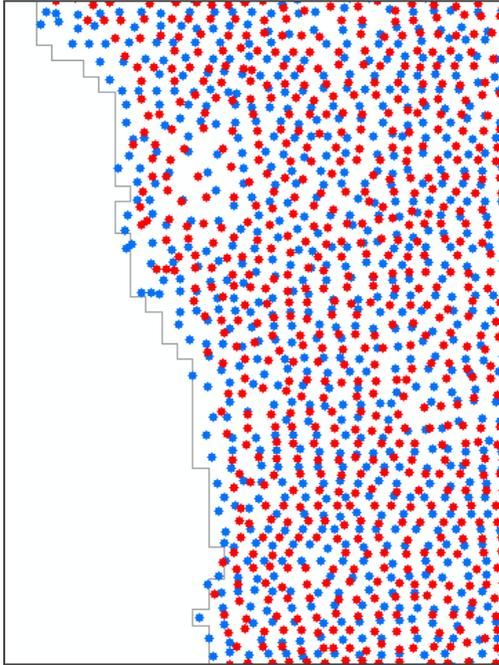
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Reprojecção do dos dados de ecobatímetro.

Os dados de profundidade fornecidos pela prefeitura usam o sistema de referencia SAD-69, diferente da imagem usada, a qual usa o sistema de referencia WGS-84. Por conseguinte é necessário transformar as profundidades do ecobatímetro ao sistema de referencia da imagem. A ferramenta *Project* usou-se para realizar este processo. A diferença entre os valores originais e os transformados é de aproximadamente 55 m. Na figura 24 apresemta-se em cor vermelha os pontos originais e em cor azul os transformados, podendo percibir o melhor ajuste destes últimos à

beira da lagoa conseguida no item 4.2.4., confirmando a necessidade da reprojeção.

Figura 24: Dados de ecobatímetro antes (Vermelho) e depois de reprojitados (Azul).



Fonte 1: Elaborada pelo autor

4.2.7 Conversão raster - vector

Foi realizada uma transformação raster-vetorial (ponto) para facilitar a interação com os dados das profundidades. No ENVI 4.7 cada banda da imagem foi guardada em formato JPG2000, a qual mantém os valores de refletância de cada pixel. Depois estas imagens foram abertas com ArcGIS e convertidas em pontos usando a ferramenta *raster to vector*. O produto foi uma malha de pontos contendo os valores de refletância no centroide de cada pixel.

Para ter uma ligação entre as refletâncias e as profundidades foi utilizada a ferramenta *spatial Join* do Arcgis. Esta ferramenta atribui os valores de um ponto para algum outro usando a localização relativa entre eles. Neste trabalho as profundidades foram as encarregadas de

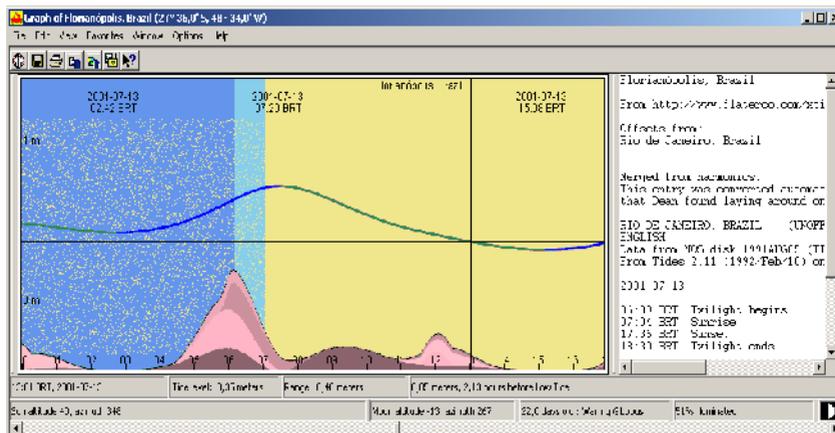
receber os atributos das refletâncias. Ao final se tem uma malha de pontos que contém os atributos da profundidade e de refletância do pixel que estivesse mais perto.

4.2.8 Correção da maré.

A altura de o mar no transcorrer do dia varia em função do tempo, este efeito chama-se de maré e tem que ser corrigida antes de aplicar algum modelo para o calculo da profundidade da água. A batimetria fornecida pela prefeitura já está ajustada, os valores têm referencia absoluta, ou seja, apresentam a profundidade media do mar.

A imagem foi tirada no dia 13 de Julio do 2001 às 13:05.01 hs horário de Brasília. Para saber a altura da água nesse momento foi usado o software Wtides, o qual calculou uma altura de 0,35 m nesse momento do dia (Figura 25).

Figura 25: Cálculo da maré no dia 13 de Julho do 2001 às 13:05:01 hs.



Fonte: Wtides 3.2

A altura da maré (0,35cm) é somada á batimetria da lagoa para obter a profundidade no momento que foi tirada a imagem. Esta última profundidade é a usada para ajustar os diferentes modelos que calculam a profundidade. Para a apresentação das profundidades em cartas náuticas, estas tem que ser levadas ao nível médio do mar, portanto, teriam que ser subtraídos 0,35 cm às profundidades calculadas da imagem.

O resumo do pré-processamento é o seguinte: A imagem foi cortada, convertida a valores de radiância, foi corrigida atmosféricamente (Refletância), e por ultimo, os centroides dos seus pixels convertidos a pontos. Depois as profundidades foram reprojctadas ao sistema WGS-84 e corrigidas devido aos efeitos da maré somando. Depois a cada dado de profundidade de ecobatímetro foi atribuído o valor de refletância do pixel mais próximo. Ao final do pré-processamento se obteve uma nuvem de pontos com os valores de profundidade e de refletância.

4.3 Aplicação dos métodos

Os três métodos para o cálculo da profundidade usam a mesma imagem pre-processada. Primeiro vai ser apresentado o procedimento para o cálculo do método de Jupp, que usa 3 bandas da imagem, seguido pelo de Stumpf, que usa duas bandas, e de ultimo o método de Polcyn que usa uma única banda.

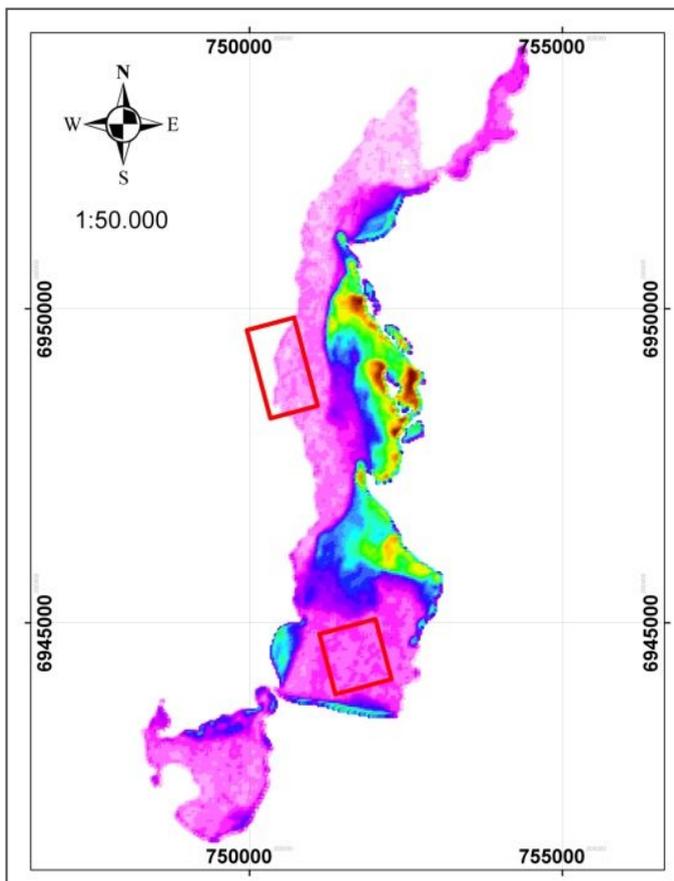
4.3.1 Aplicação do Método Jupp (1989)

O método de Jupp é calculado em duas etapas: Primeiro são delimitadas as ZPP's ou Zonas de penetração e depois calculada uma profundidade correspondente à refletância de cada pixel.

4.3.1.1 Cálculo refletância Max da Zona escura.

Para cada banda identificou-se as zonas onde a energia não consegue penetrar mais na água, em função dos níveis de refletância de cada pixel. Primeiro foi atribuído uma rampa de cores aos valores de refletância com o objetivo de identificar em que sentido estes iam diminuindo. Na beira Este da lagoa encontram-se os valores maiores, enquanto que na beira oeste têm-se as refletâncias menores. Na zona com os valores mínimos de refletância, chamada de Zona escura, são retiradas amostras (1567 pontos) e calculado o valor mínimo (R_{minZE}), máximo (R_{maxZE}) e médio (R_{promZE}) de refletância (Figura 26 e Quadro 6)

Figura 26: Zonas amostradas para o calculo das estatísticas de refletância na zona escura.



Fonte: Elaborado pelo autor

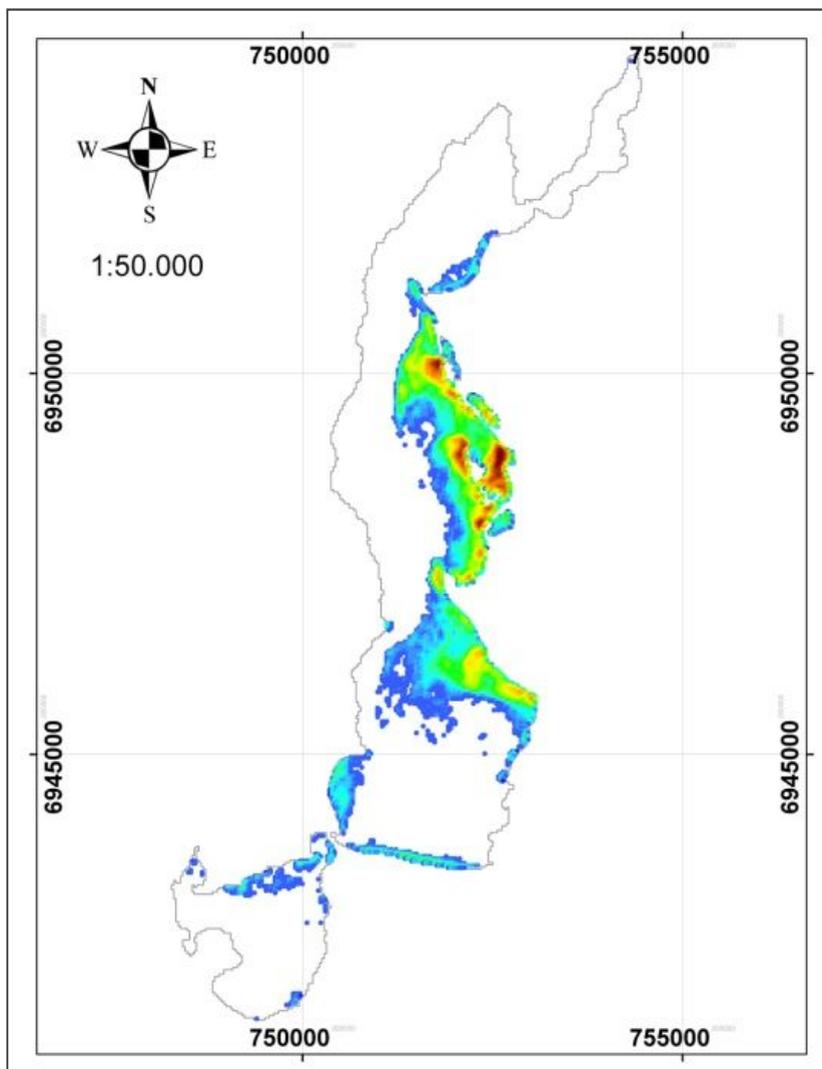
Quadro 6: Refletâncias mínima, média e máxima na Zona Escura.

	Banda			
	4	1	3	2
Refletância min Zona oscura (RminZE)	61	75	76	94
Refletância max Zona Oscura (RmaxZE)	279	191	182	237
Refletância prom Zona Oscura (RpromZE)	114.41	146.36	140.99	193.06

4.3.1.2 Delimitação ZPP (Zonas de penetração)

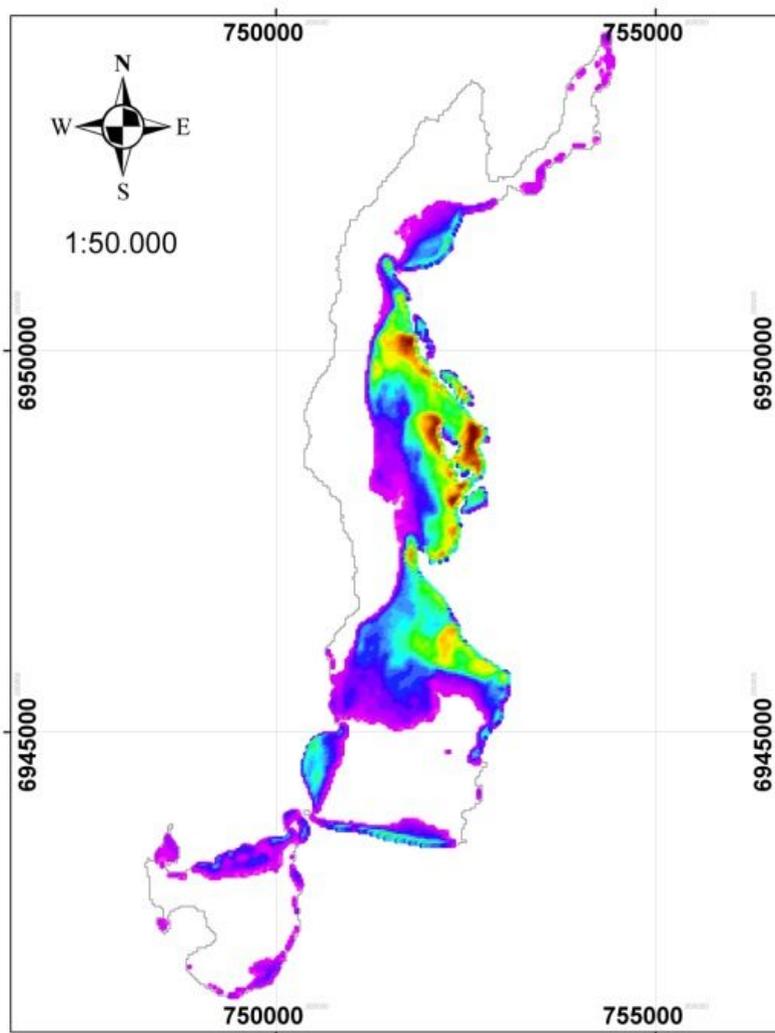
As refletâncias maiores que R_{maxZE} correspondem à energia que consegue penetra na água e depois ser refletida para o satélite. Os pixels com estas refletâncias compõem as chamadas Zonas de penetração de profundidade ou ZPP, é sobre estas zonas que vai ser aplicado o método de Jupp. Para delimitar as ZPP, foram excluídos os valores menores que R_{maxZE} , assim unicamente serão visualizados os pixels que contém informação útil para o método (Figura 27-30).

Figura 27: Pixels da banda 1 com pixels maiores que RmaxZE



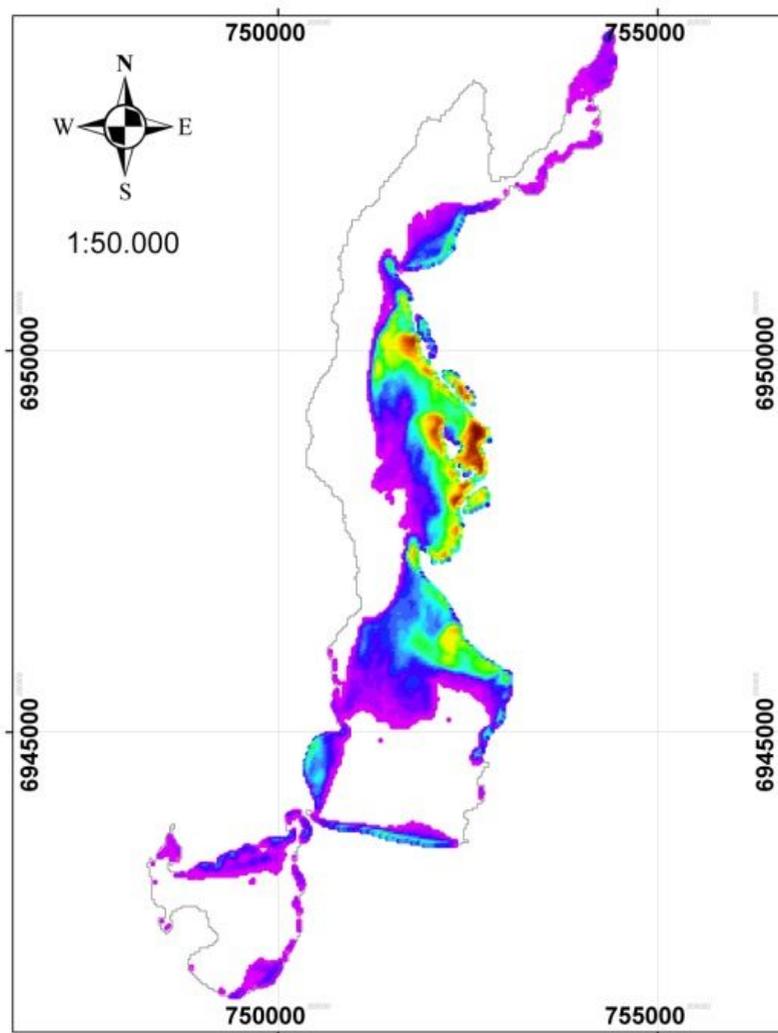
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28: Pixels da banda 2 com pixels maiores que RmaxZE



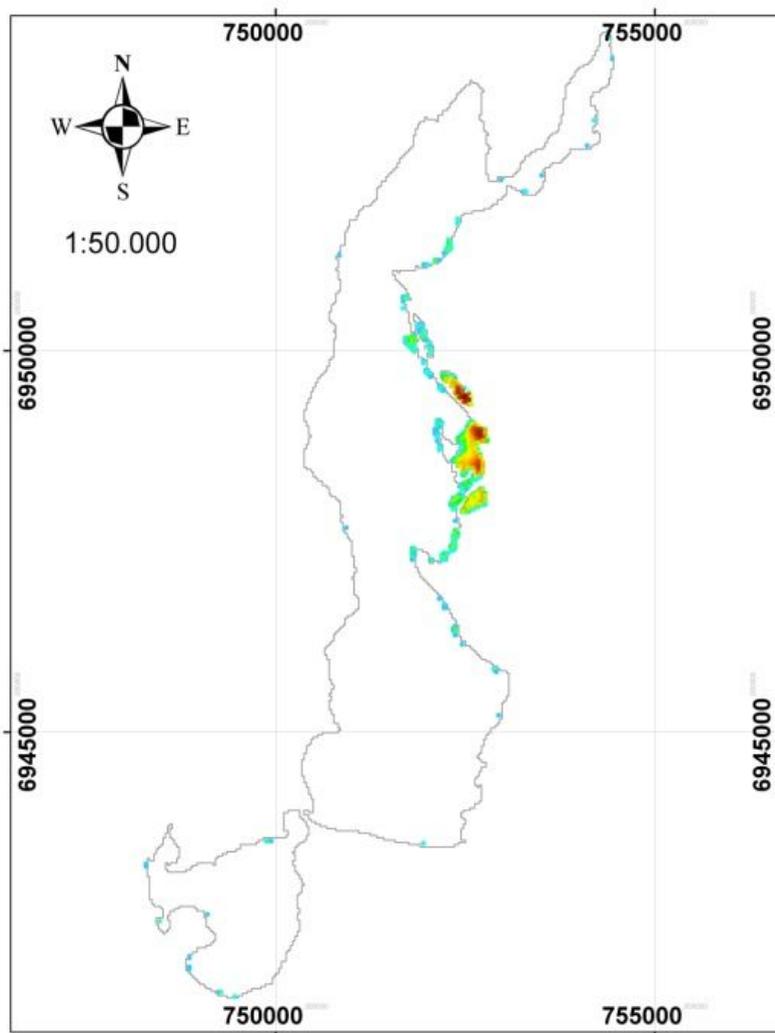
Fonte : Elaborada pelo autor

Figura 29: Pixels da banda 3 com pixels maiores que RmaxZE



Fonte: Elaborado pelo autor

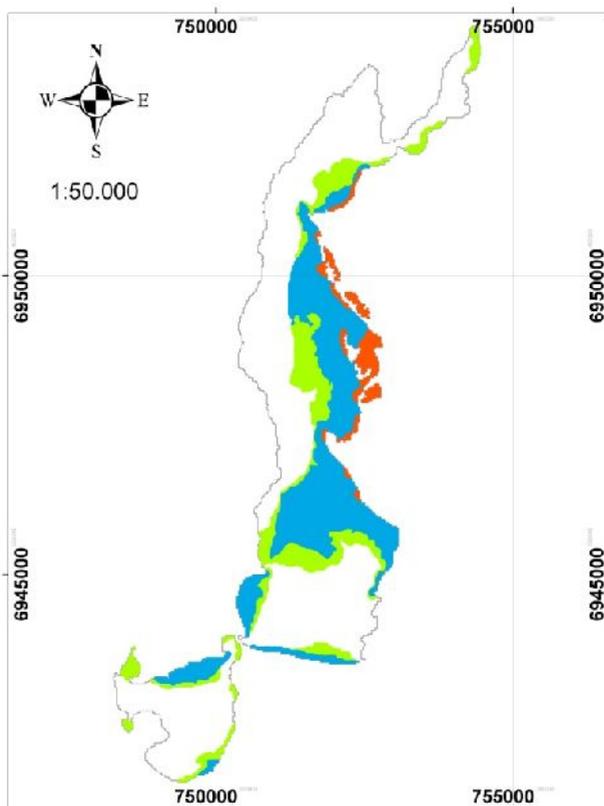
Figura 30: Pixels da banda 4 com pixels maiores que RmaxZE



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao deixar unicamente os valores maiores que R_{maxZE} para cada banda, foram desenhados polígonos que os delimitaram, estes polígonos correspondem às ZPP's. Devido à similitude entre a zona da banda 2 e da banda 3, decidiu-se excluir a banda 3, ficando assim um polígono para a banda 1, 2 e 4. A cor de cada ZPP é representada pela cor onde se encontra cada uma das bandas no espectro eletromagnético, assim, a zona azul pertence á banda 1, a verde á banda 2, a vermelha á banda 4 (Figura 31)

Figura 31: Zonas de penetração de profundidade – ZPP's usados no método de Jupp.



Fonte Elaborado pelo autor

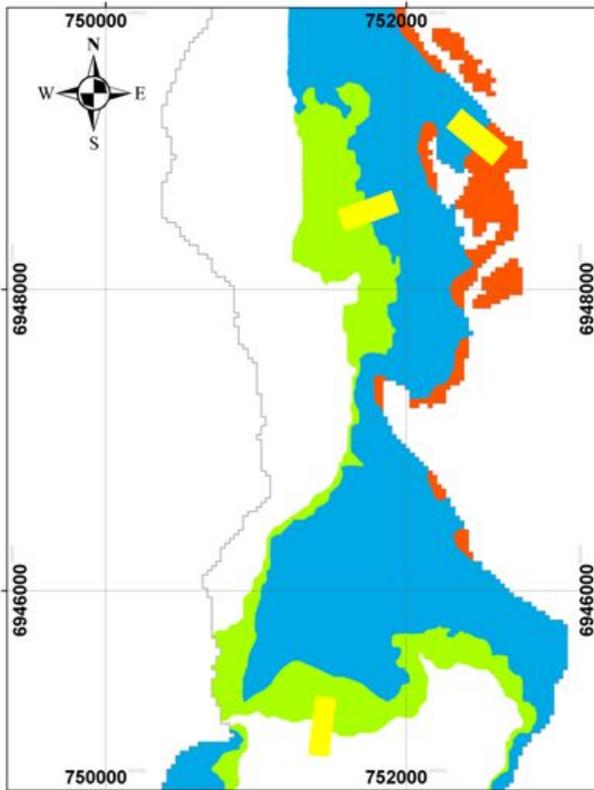
O total da área das zonas de penetração é de 8.4 Km^2 , em comparação a área total da lagoa de aproximadamente 17.4 Km^2 . Assim,

a zona que é possível mapear usando o método de (Jupp 1989) na Lagoa da Conceição corresponde a um 48%, a outra parte da lagoa absorve o toda a energia antes de voltar para o sensor.

4.3.1.3 Profundidades das ZPP.

Delimitadas as ZPP é necessário atribuir um valor mínimo e máximo de profundidade para o valor mínimo e máximo de refletância de cada zona. Depois de definir uma amostra nos limites de cada zona (Figura 32), seus correspondentes valores de refletância são ordenados do maior para o menor.

Figura 32: Amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

As refletâncias maiores que R_{max} são agrupadas e a média de suas profundidades calculado, esta média também é achada para o grupo dos valores menores que R_{max} (Quadro 7-8-9).

Portanto teremos duas profundidades promédio, uma para Refletâncias maiores que R_{max} e outra para valores menores que R_{max} . A média destes dois valores corresponde à profundidade máxima de calculo para cada ZPP.

Quadro 7: Profundidade máxima de penetração para a ZPP-4

Profundidade Banda4		
$R_{maxZE} = 279$		
Refletância	Profundidade	
450	-1.05	
430	-1.05	Promedios
385	-1.05	-1.05
259	-0.95	-0.95
228.00	-0.95	
Prof. Final		-1.00

Quadro 8: Profundidade máxima de penetração para a ZPP-1

Profundidade Banda1		
$R_{maxZE} = 191$		
Refletância	Profundidade	
252	-1.55	
245	-1.65	
239	-1.55	
228	-1.55	Promedios
225.00	-1.65	-1.59
190.00	-1.45	-1.5
185	-1.55	
Prof. Final		-1.55

Quadro 9: Profundidade máxima de penetração para a ZPP-2

Profundidade Banda2	
RmaxZE = 237	
Refletância	Profundidade
340	-2.80
337	-2.80
329	-2.70
292	-2.80
285.00	-2.60
235.00	-2.50
227	-2.40
	Promedios
	-2.74
	-2.45
Prof. Final	-2.60

4.3.1.4 Cálculo da profundidade de cada pixel.

Depois de obter as zonas de profundidade, e saber a máxima profundidade que a luz consegue atingir em cada uma delas, faltaria conhecer uma variável para conseguir aplicar o método, esta variável é o valor de Rmax. Para o cálculo de Rmax foi selecionado 1% dos máximos valores de refletância de cada banda, recomendado pelo autor de método, o menor destes corresponde a Rmax.

Para o calculo da profundidade é necessário os seguintes valores:

$$X_{i\max} = \text{Log} (R_{i\max} - R_{i\text{promZE}}) \quad (24)$$

Onde

- $R_{i\max}$ = Refletância máxima de cada banda e
- $R_{i\text{médiaZE}}$ = Refletância promédio na zona escura.

$$X_{i\min} = \text{Log}((R_{i\max\text{ZE}} + 1) - R_{i\text{promZE}}) \quad (25)$$

Onde

- $R_{i\max\text{ZE}}$ = Refletância Max na zona escura.

$$K_i = \frac{(X_{imax} - X_{imin})}{2.(Z_i - Z_{i+1})} \quad (26)$$

$$A_i = X_{min} + 2.K_i Z_i \quad (27)$$

O cálculo das constantes são resumidos para todas as zonas na Quadro 10.

Quadro 10: Constantes de cada banda necessárias para o cálculo do método de Jupp.

	Banda 1	Banda 2	Banda 4
Ri max ZE	191	237	279
Ri Prom ZE	146.36	193.06	114.41
Ri min	192	238	280
Ri max	822	460	990
Zi	-1.55	-2.6	-0.35
Z(i+1)	-1.00	-1.55	-1.00
Xmax	6.5156	5.5870	6.7748
Xmin	3.8207	3.8053	5.1095
k	-2.44	-0.84	-1.28
A	11.41	8.2171	7.6716

Fonte 2: Elaborado pelo autor

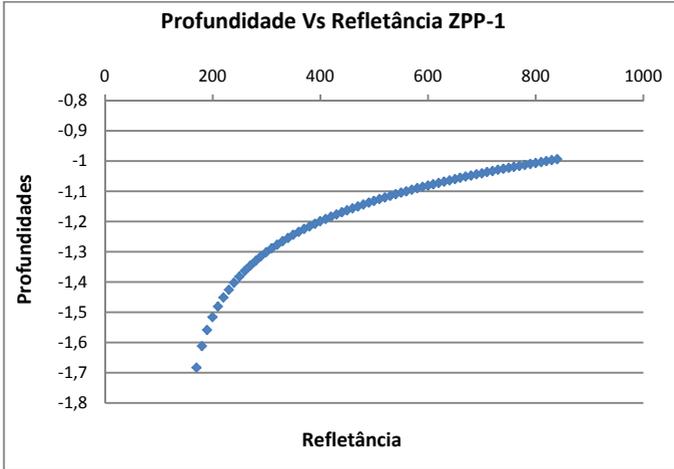
Com os valores de k e A é possível calcular a profundidade de cada pixel com a equação 28.

$$Z_i = \frac{(A_i - \log(R_i - R_{iprom ZE}))}{2.K_i} \quad (28)$$

Onde R_i é o valor de refletância de cada pixel da imagem, e A_i e K_i são as constantes calculadas para cada ZPP.

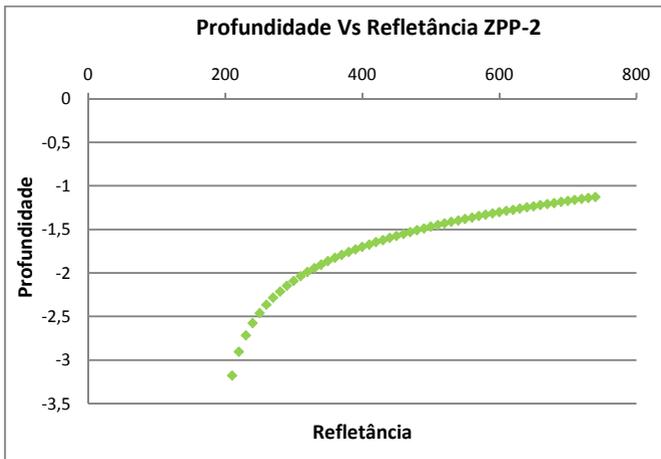
As figuras 33 a 35 representam o comportamento das profundidades em função do valor de refletância para cada Zona de Penetração de Profundidade.

Figura 33: Comportamento da profundidade em função da refletância para a ZPP-1



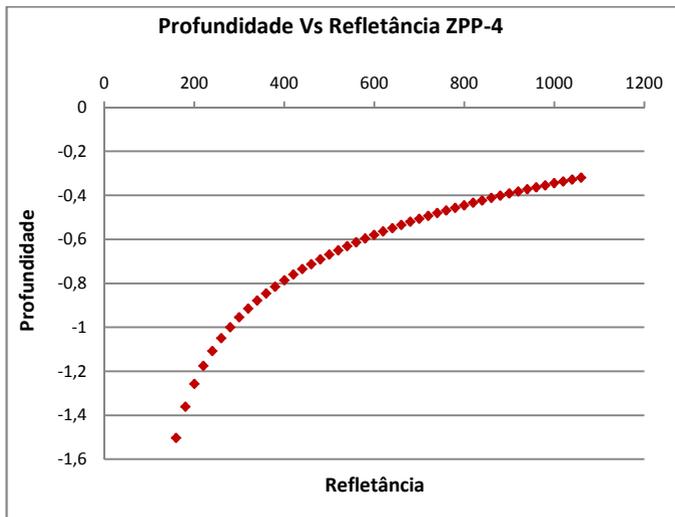
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34: Comportamento da profundidade em função da refletância para a ZPP-2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35: Comportamento da profundidade em função da refletância para a ZPP-4



Fonte: Elaborado pelo autor

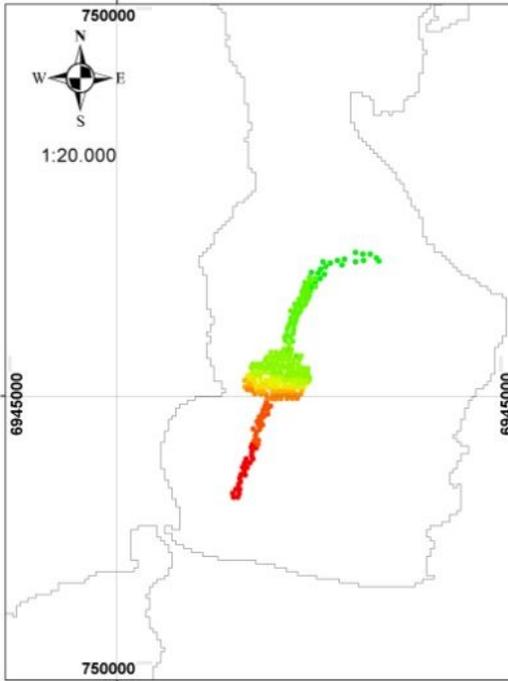
4.3.2 Aplicação do Método Stumpf (2003)

O método de (Stumpf 2003) usa a divisão dos valores de refletância de duas bandas e dados conhecidos de profundidade para o cálculo da batimetria. A equação 29 é a base do cálculo, onde R_{Bi} equivale aos valores de refletância da banda i , e R_{Bj} aos valores de refletância da banda j , n é uma constante que garante valores positivos a equação, 1000 no caso deste trabalho; e m_1 e m_0 são chamados de “ganho” e “offset”, são calculadas conhecendo valores reais de profundidade, e sua função é reescalonar os valores de refletância a valores de profundidade.

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_{Bi})}{\ln(nR_{Bj})} - m_0 \quad (29)$$

O método é aplicado em três fases. Primeiro é definida uma amostra de profundidades com seus respectivos valores de refletância para cada banda (Figura 36).

Figura 36: Amostra usada para calcular as correlações de Stumpf.



Fonte: Elaborado pelo autor

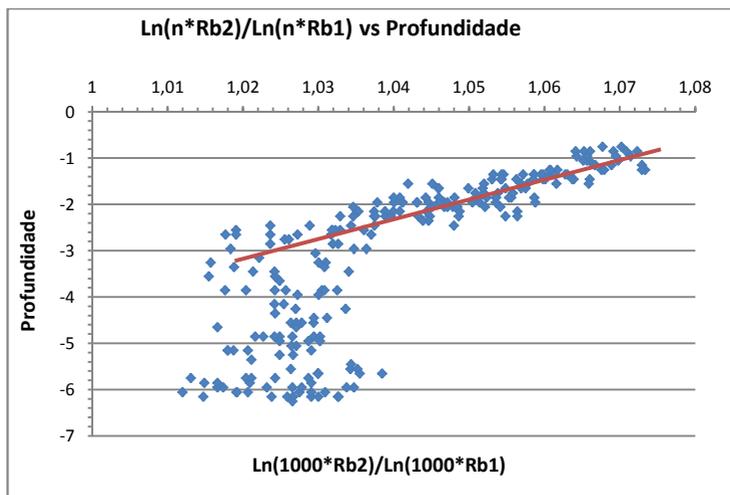
A partir da amostra são calculadas as seguintes operações:

$$\ln(1000 * R_{B2}) / \ln(1000 * R_{B1}) ; \quad (30)$$

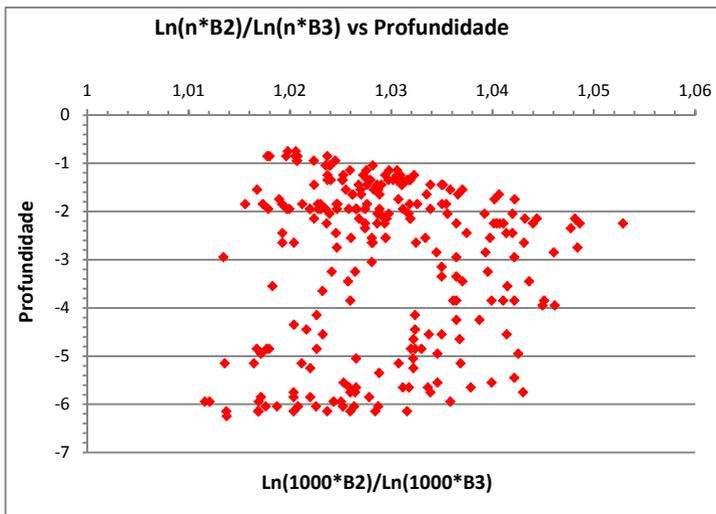
$$\ln(1000 * R_{B2}) / \ln(1000 * R_{B3}) \text{ e} \quad (31)$$

$$\ln(1000 * R_{B2}) / \ln(1000 * R_{B4}). \quad (32)$$

Estes valores são representados graficamente VS a profundidade, as figuras de 37 a 39 mostram o resultado obtido.

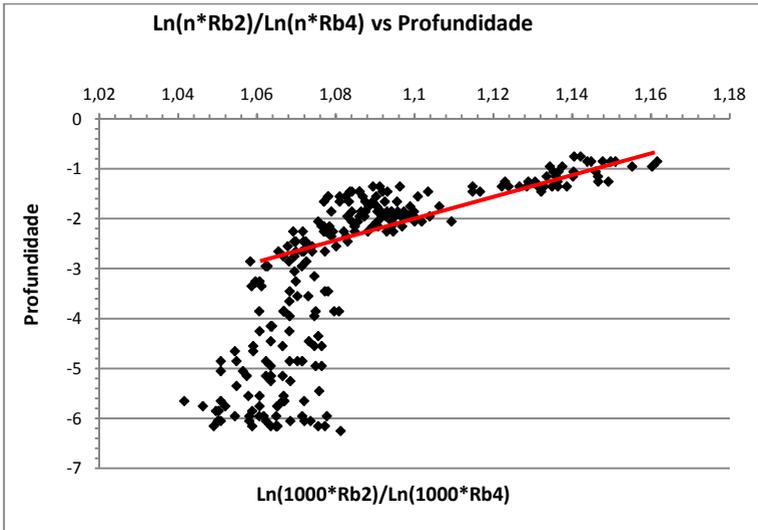
Figura 37: correlação $\text{Ln}(n \cdot \text{Rb2})/\text{Ln}(n \cdot \text{Rb1})$ vs Profundidade Amostra

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38: correlação $\text{Ln}(n \cdot \text{Rb2})/\text{Ln}(n \cdot \text{Rb3})$ vs Profundidade Amostra

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39: correlação $\text{Ln}(n^*R_{b2})/\text{Ln}(n^*R_{b4})$ vs Profundidade Amostra

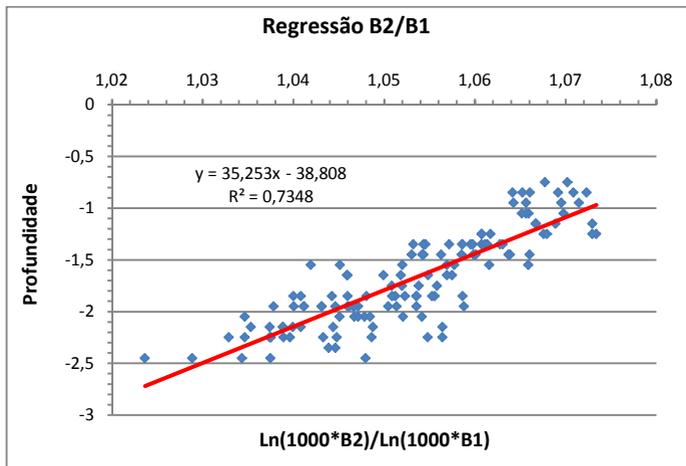


Fonte: Elaborado pelo autor

É notável como as regressões da figura 37 e da figura 39 apresentam uma tendência linear até aproximadamente uma profundidade de 2.6 m, depois os valores de $\text{Ln}(1000 * R_{Bi}) / \text{Ln}(1000 * R_{Bj})$ permanecem quase constantes a medida que aumenta a profundidade.

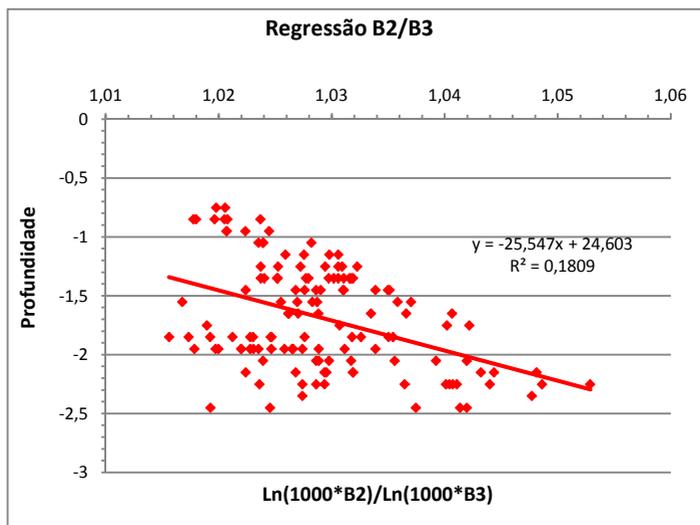
Este comportamento corrobora o apresentado no método de (Jupp 1989), o qual identificou zonas onde a luz não conseguia penetrar mais na água. Em função desses resultados as equações a tendência lineal dos dados foram calculadas considerando unicamente os valores com profundidades menores que 2.6 m (Figuras 40 a 42)

Figura 40: correlação $\ln(n \cdot Rb2)/\ln(n \cdot Rb1)$ vs Profundidade para a ZPP2.



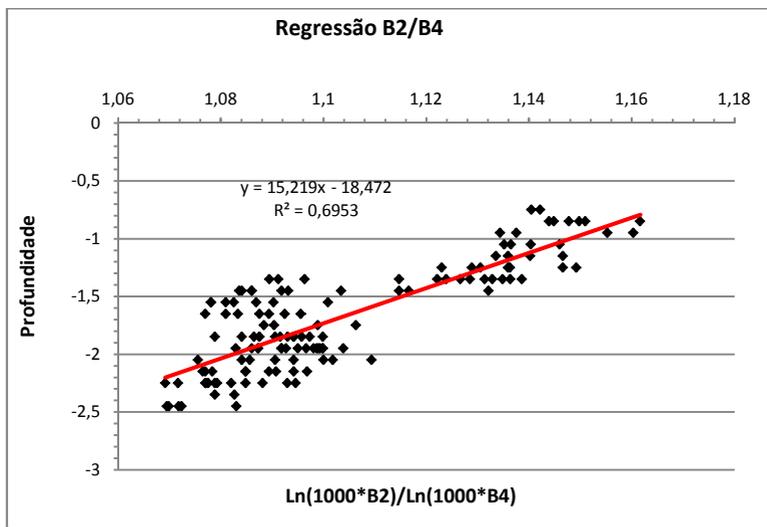
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41: correlação $\ln(n \cdot B2)/\ln(n \cdot B3)$ vs Profundidade para a ZPP-2.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42: correlação $\text{Ln}(n \cdot B2)/\text{Ln}(n \cdot B3)$ vs Profundidade para a ZPP-2.



Fonte: Elaborado pelo autor

As maiores correlações obtidas foram com as relações de $\text{Ln}(1000 \cdot R_{E1})/\text{Ln}(1000 \cdot R_{E2})$ e de $\text{Ln}(1000 \cdot R_{E2})/\text{Ln}(1000 \cdot R_{B4})$, por conseguinte, suas equações vão ser usadas para o cálculo da batimetria sobre o mesmo perímetro da zona ZPP-2 do método de Jupp.

4.3.3 Aplicação do Método Polcyn (1970)

O método de Polcyn calcula a profundidade de cada pixel da imagem usando o Ln da refletância e dados conhecidos de profundidade. A intensidade da luz decresce exponencialmente com o incremento da profundidade, portanto, se os valores de refletância fossem transformados usando o Ln, essa relação converteria-se em linear. Polcyn propõe a seguinte equação para fazer essa linearização:

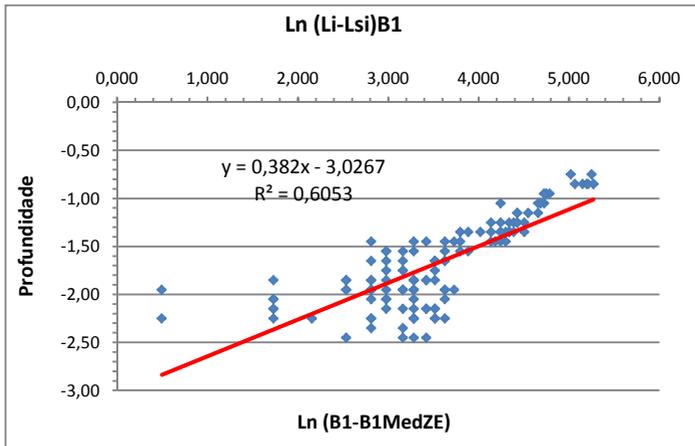
$$Xi = \text{Ln}(Ri - RipromZE) \quad (33)$$

Onde R_i é a refletância de cada pixel, e R_iZE é a média das refletâncias numa zona escura, neste caso, a mesma zona escura usada no método de Jupp.

Para o cálculo do método de Polcyn foi usada a mesma amostra usada no método multibanda de Stumpf (Figura 36). O resultado da

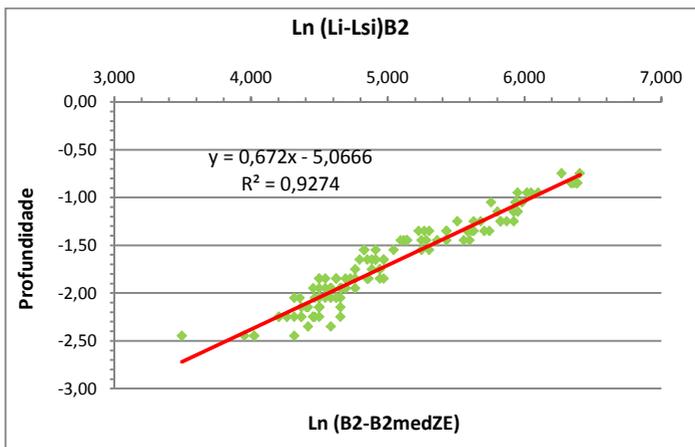
aplicação da linearização para cada uma das 4 primeiras bandas da imagem é mostrada nas figuras 43, 44, 45 e 46.

Figura 43: Correlação Ln(B1-B1PromZE) VS Profundidade



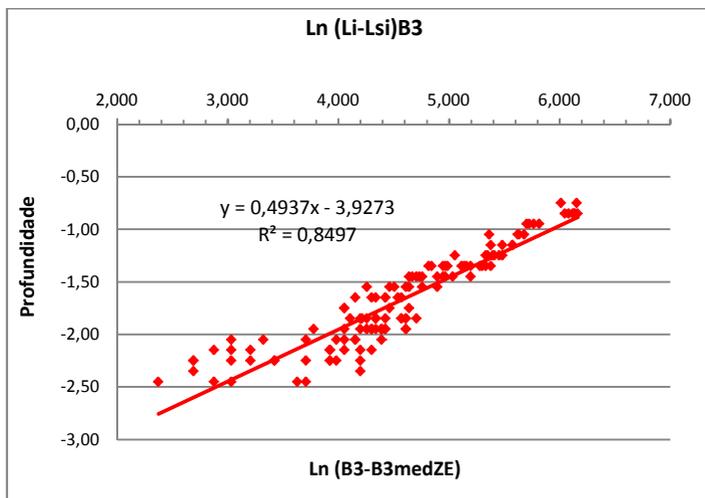
Fonte : Elaborado pelo autor

Figura 44: Correlação Ln(B2-B2PromZE) VS Profundidade



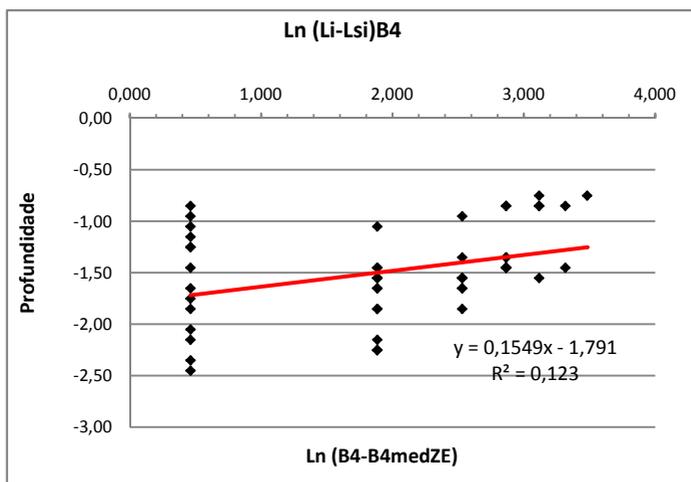
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45: Correlação Ln(B3-B3PromZE) VS Profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46: Correlação Ln(B4-B4PromZE) VS Profundidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta da banda 2 apresentou a maior correlação entre a profundidade e o Ln da refletância, portanto, vai ser usada para calcular a profundidade dos 5897 pontos que fazem parte da ZPP 2 do método de Jupp.

5 ANALISE E RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo focalizam-se na comparação com as exatidões exigidas pela *Organização Hidrográfica Internacional* para a construção de cartas nauticas. São apresentados os métodos na ordem de bandas usadas pelo mesmo, primeiro o método de Polcyn, seguido pelo método de Stumpf, e por ultimo o método de Jupp. Ao final será feita uma comparação entre os três métodos e discutem-se os fatores que influenciaram nos resultados.

5.1 Precisão Batimétrica exigida pela DHN

Os levantamentos Hidrográficos são regidos pela norma “NORMAN-25” , decretada com a lei N° 243, de 28 de fevereiro de 1967. Estes podem ser feitos pela DHN (Diretoria de hidrografia e marinha) ou por qualquer outra entidade privada, com autorização da primeira. Estes levantamentos são classificados em duas categorias:

- Categoria “A”: Levantamentos Hidrográficos que devem seguir especificações técnicas que permitam que os dados obtidos sejam aproveitados na atualização de cartas náuticas ou para as demais finalidades descritas no item 0205.
- Categoria “B”: LH executados sem o propósito de produzir elementos que sirvam para atualização de cartas náuticas.

A DHN classifica os levantamentos na categoria A em função do seu propósito, assim:

- subsidiar a atualização ou produção de documentos náuticos;
- subsidiar proposta de definição ou alteração dos parâmetros operacionais de navegação de portos e terminais portuários, tais como, delimitação de canais de acesso, bacias de evolução/manobra e definição de calado máximo de operação;
- subsidiar proposta de balizamento, de acordo com a NORMAM-17/DHN;
- realizar Levantamentos Hidrográficos pós-dragagem, de acordo com a NORMAM-11/DPC;
- georreferenciar obras sobre, sob e às margens das AJB, tais como pontes, instalações portuárias e píeres, cabos e dutos submarinos, etc.;

- posicionar pontos notáveis e sinais de auxílios à navegação fixos (balizas, faróis e faroletes); e
- outras finalidades que possam afetar a segurança da navegação, a critério do CHM.

Segundo (DHN 2011) os Levantamentos Hidrográficos da categoria “A” devem cumprir integralmente as especificações previstas na Publicação Especial nº 44 (S-44) da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), em sua edição mais recente, de acordo com a classificação prevista, para que possam ser aproveitados para a atualização das cartas editadas pela DHN.

A (OHI 2008) na sua publicação especial nº 44 definiu quatro ordens de levantamento em função dos requisitos da precisão, têm-se: Ordem Especial, Ordem 1, Ordem 2 e Ordem 3.

Ordem Especial: são de aplicação restrita a áreas críticas específicas, de folga mínima sob a quilha e onde as características do fundo sejam potencialmente perigosas à navegação, como portos, atracadouros e canais críticos. Estas áreas devem ser obrigatoriamente designadas de maneira explícita pelo órgão responsável pela qualidade do levantamento e todas as fontes de erro devem ser obrigatoriamente minimizadas. Deve-se assegurar que elementos cúbicos superiores a 1 metro possam ser discernidos pelo equipamento de sondagem.

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 100m. Embora o requisito de ensonificação do fundo seja menos rigoroso do que no de Ordem Especial, exige-se a completa ensonificação do fundo em áreas cujas características deste sejam potencialmente perigosas à navegação. Nestas áreas, deve-se assegurar que elementos cúbicos maiores que 2m até profundidades de 40m, ou maiores que 10% da profundidade em áreas de profundidades maiores de 40m, possam ser discernidos pelo equipamento de sondagem

Ordem 2: destinam-se às áreas com profundidades menores de 200m, não abrangidas pela Ordem Especial e Ordem 1 e onde uma descrição geral da batimetria seja suficiente para assegurar a inexistência de obstruções capazes de colocar em risco as

embarcações suscetíveis de transitar ou operar na referida área. É o critério a ser adotado para uma variedade de usos marítimos que não justificam levantamentos hidrográficos de uma ordem mais alta. Pode ser necessária uma ensonificação completa do fundo em áreas cujas características deste e o risco de obstruções, sejam potencialmente perigosos à navegação

Ordem 3: destinam-se a todas as áreas não abrangidas pela Ordem Especial, Ordens 1 e 2 e onde as profundidades sejam superiores a 200m.

Para o cálculo da máxima incerteza vertical permitida em cada um das ordens a (OHI 2008) proporciona a equação 34. As constantes “a” e “b” para cada ordem apresentam-se no quadro 11.

$$\pm\sqrt{a^2 + (b * d)^2} \quad (34)$$

Onde:

a = Incerteza que não varia com a profundidade.

b = Incerteza que varia com a profundidade.

c = profundidade

Quadro 11: Precisão exigidas pela OHI segundo o ordem do levantamento Batimétrico.

	Ordem Especial	Ordem 1	Ordem 2	Ordem 3
Constantes máxima incerteza permitida	$a= 25 \text{ cm}$ $b=0.0075$	$a= 50 \text{ cm}$ $b=0.013$	$a= 50 \text{ cm}$ $b=0.013$	$a= 100 \text{ cm}$ $b=0.023$

Fonte: Elaboração própria.

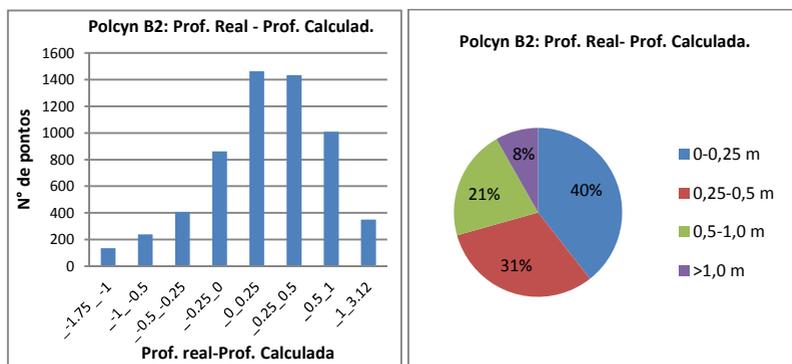
Usando a equação 34 percebe-se que a incerteza aumenta com a profundidade, no caso de uma profundidade de 1 metro, a máxima incerteza para os levantamentos de ordem especial é de 0.25 m, de 0.5 para ordem 1, 0.5 para ordem 2, e de 1m para ordem 3.

5.2 Método de Polcyn (1970)

Os resultados apresentados são uma comparação das precisões exigidas pelo DHN (Diretoria de hidrografia e navegação) com as conseguidas aplicando o método de Polcyn. Foi calculada a diferença de profundidade entre a batimetria real e a calculada para a banda 2. O total de amostras comparadas foi de 5897, correspondente à zona onde a água não absorvia a totalidade da luz, a mesma da ZPP-2 do método de Jupp, correspondente a uma área de 48% do total da Lagoa da Conceição.

Com o método de Polcyn 40% dos dados (2322) tem uma diferença menor do que 25 cm entre as profundidades real e as calculadas. O 31% dos dados (3088) têm uma exatidão entre 25-50 cm, enquanto que 21 % têm uma exatidão entre 50 e 100cm e o 8% maior que 100 cm. Por tanto o 71% dos dados pertencem à ordem de levantamento 1, destinado para o uso em zonas com tráfego náutico onde as propriedades geofísicas do fundo não seja tão perigoso à navegação (fundo de lama ou arenoso).

Figura 47: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Polcyn para a banda 2.

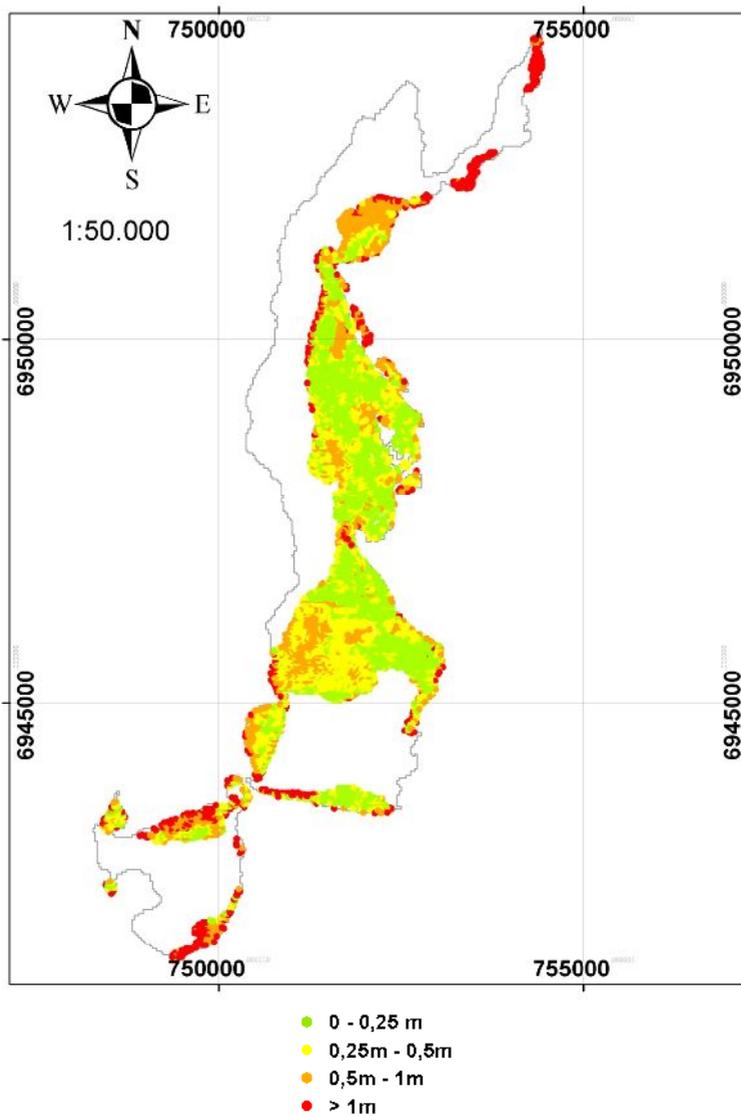


Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 47 representa com diferentes cores a exatidão dos dados. A cor violeta mostra os pontos que tiveram a pior exatidão (>1m), enquanto a cor azul os melhores (<25cm).

A figura 48 mostra as diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada usando o método de Polcyn.

Figura 48: Mapa temático das diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada usando o método de Polcyn sobre a banda 2 da Imagem.

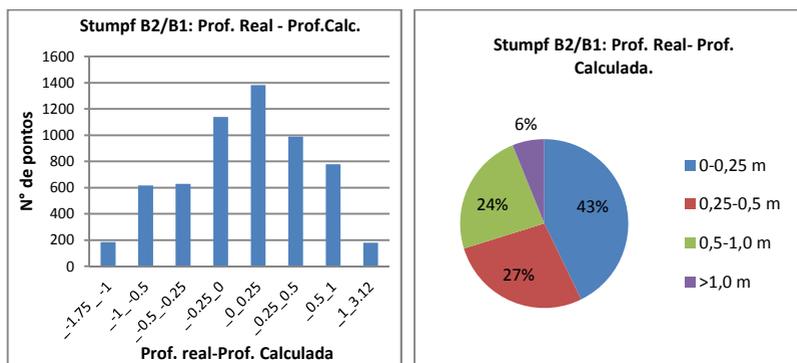


Fonte : Elaborado pelo autor

5.3 Método de Stumpf (2003)

Depois de aplicar o método de Stumpf usando a relação de bandas B2/B1, e sobre os mesmos 5897 pontos do método de Polcyn, 43% deles obtiveram uma exatidão de menos de 25 cm. Portanto um resultado melhor que o calculado com o método de Polcyn (Figura 49).

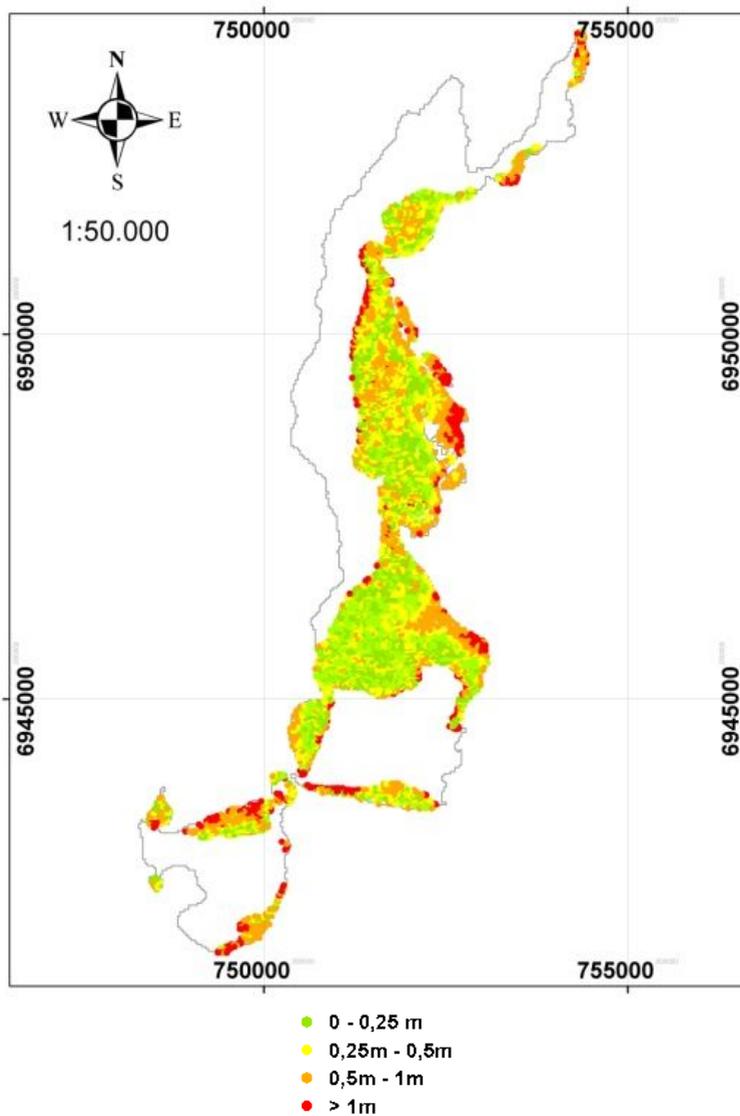
Figura 49: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Stumpf usando a relação de Bandas B2/B1.



Fonte: Elaborado pelo autor

O mesmo mapa criado para representar as exatidões no método de Polcyn foi criado para Stumpf, Mostrado na Figura 50.

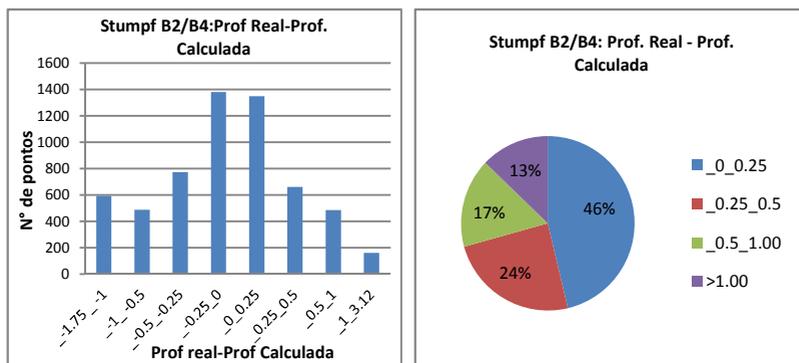
Figura 50: Mapa temático das diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada usando o método de Stumpf para a relação de bandas B2/B1.



Fonte : Elaborado pelo autor

O calculo do método de Stumpf para a relação de bandas B2/B4 teve um comportamento similar à relação B2/B1. 2731 pontos podem ser classificados como de ordem especial, porem os dados com uma diferença de profundidade maior a 1 metro aumentou, passando de 363 a 756 pontos (figura 51).

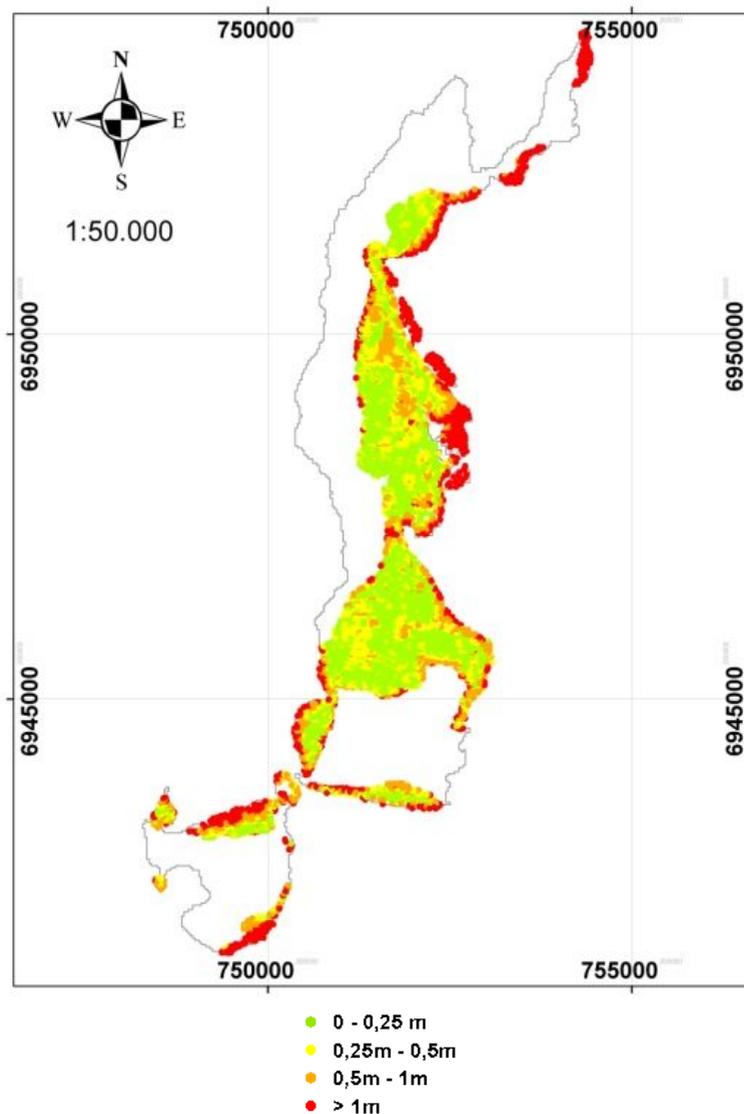
Figura 51: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Stumpf usando a relação de Bandas B2/B4.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 52 indica na cor vermelha as exatidões maiores a 1m, com tendência a se agrupar na beira da lagoa.

Figura 52: Mapa temático das diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada usando o método de Stumpf para a relação de bandas B2/B4.

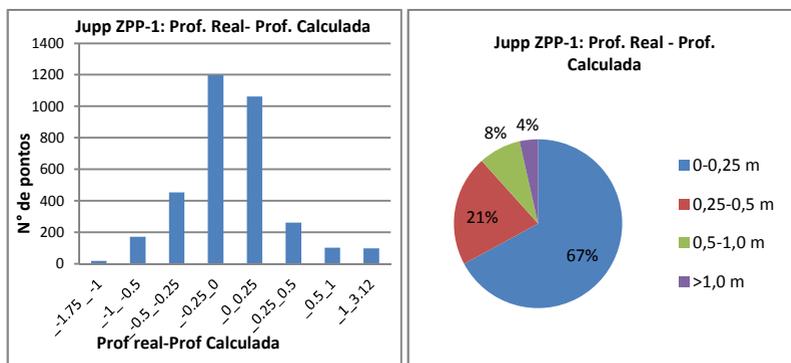


Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Método de Jupp (1989)

A Zona de penetração da banda 1 encerra 3366 pontos, dos quais 67% (2259) tem uma diferença entre a profundidade real e a calculada de 0,25 cm, correspondendo assim à maioria do total dos pontos a um levantamento de ordem especial. O 21% tem uma exatidão entre 0,25-50 cm, e unicamente o 4% dos dados tem uma diferença maior de 100 cm (Figura 53).

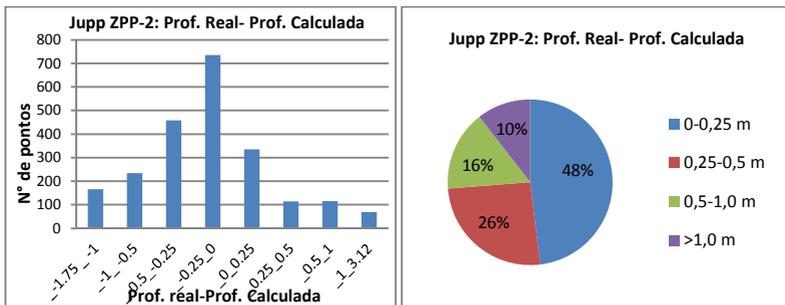
Figura 53: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Jupp sobre a zona de penetração 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Zona de penetração da banda 2 contém 2229 pontos comparados, dos quais 48% (1071) tem uma diferença entre a profundidade real e a calculada de 0,25 cm (Figura 54). Do mesmo modo que a ZPP-1, a maioria dos pontos tem uma exatidão correspondente a um levantamento de ordem especial. As exatidões de ordem especial baixam um 19% em comparação com as calculadas para a ZPP-1. Os dados com diferença de profundidade maiores de 100 cm aumentam em comparação com a ZPP-1, neste caso é de 10%, aumentou o 6%.

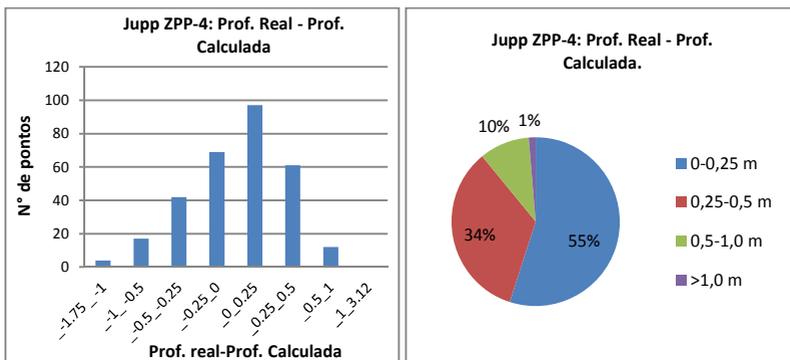
Figura 54: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Jupp sobre a zona de penetração 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Zona de penetração da banda 4 contém 302 pontos, dos quais 166 tem uma diferença entre a profundidade real e a calculada de 0,25 cm, correspondendo assim a maioria dos pontos a um levantamento de ordem especial (figura 55). O 89% do total dos pontos da ZPP-4 cumprem com as precisões dum levantamento de ordem 1.

Figura 55: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Jupp sobre a zona de penetração 4.

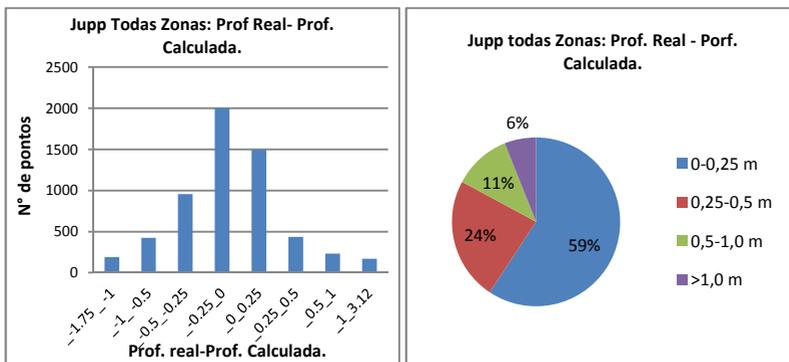


Fonte: Elaborado pelo autor

O total da área estudada tem 5897 pontos, 59% (3496) tem uma exatidão de menos de 25 cm, 24% (1391) entre 25 e 50cm, 11% (653) entre 50 e 75 cm de, e 6% (357) tem uma exatidão maior a 1m (Figura 56). É importante ressaltar a grande exatidão deste método, o 89% dos dados comparados tem uma diferença menor de 50 cm, os quais podem se

destinar a mapear áreas portuárias, canais de acesso, rotas recomendadas, canais de navegação interior e áreas costeiras com grande densidade de tráfego mercante segundo a classificação feita pela Organização Hidrográfica Internacional.

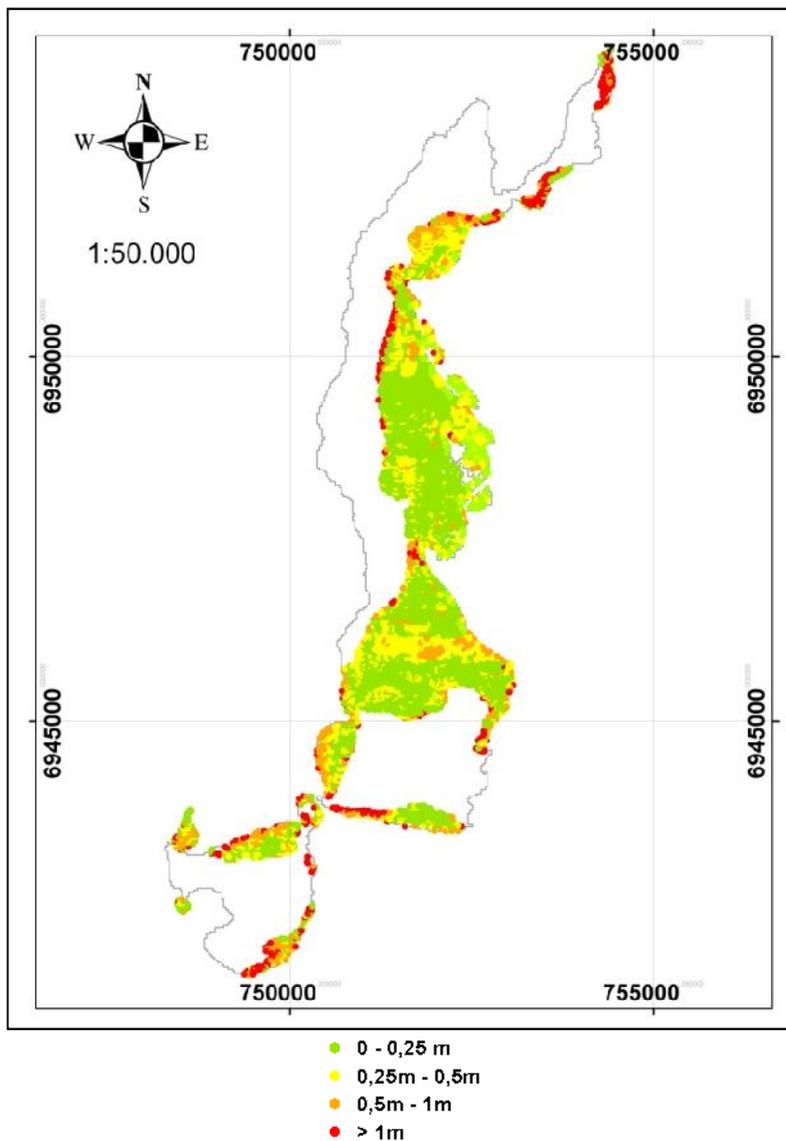
Figura 56: Diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada com o método de Jupp sobre todas as zonas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Do mesmo modo que com os anteriores métodos, foi criado um mapa temático das diferentes exatidões (Figura 57)

Figura 57: Mapa temático das diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada usando o método de Jupp.



Fonte: Elaborado pelo autor

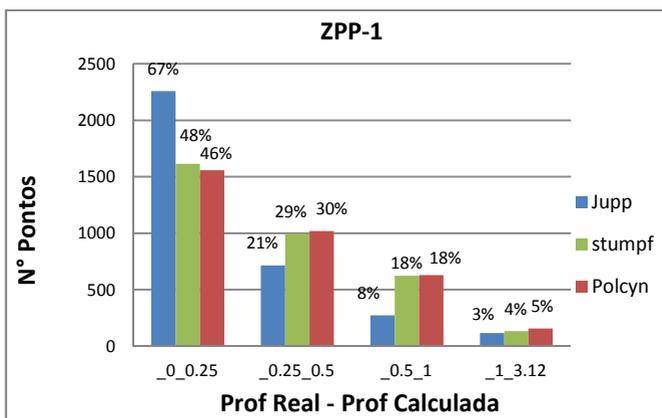
5.5 Comparação dos métodos

Este item resume os resultados obtidos com cada um dos métodos dos capítulos anteriores levando em conta as exatidões exigidas pela OHI, ou seja, agrupando as diferenças entre a profundidade real e a profundidade calculada em intervalos de 0-25cm, 25-50cm, 50-100cm e maiores de 100cm. As comparações foram realizadas para cada uma das zonas de penetração e para o total da zona estudada.

No grupo com diferenças entre 0-25cm para a ZPP-1 (3366 pontos) o método de Jupp é o mais preciso (figura 58), tem 21% (701) a mais de pontos que o método de Polcyn e 19% (645) a mais que o método de Stumpf.

Cabe ressaltar a similitude entre o método de Stumpf e o método de Jupp para a ZPP-1, os dados não variam mais do que 2% para cada um dos grupos de exatidões, isto é, no grupo de 0-25 cm a diferença é do 2%, no grupo de 25-50cm é do 1%, no grupo de 0-50cm são iguais e no grupo de 50-100cm a diferença é de 1%.

Figura 58: Comparação da diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada para cada um dos métodos aplicados na ZPP-1.



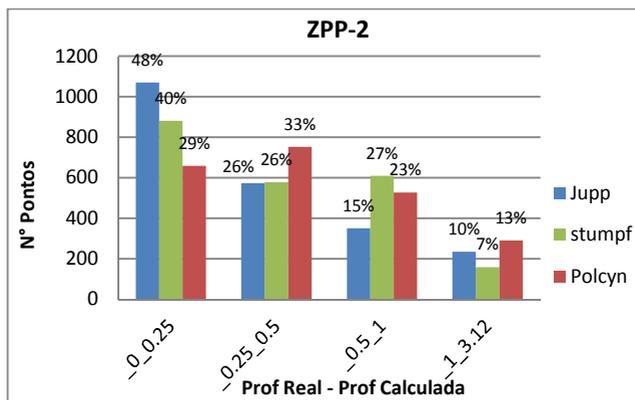
Fonte: Elaborado pelo autor

Na zona de penetração 2 (2229 pontos) o método de Jupp ainda é o melhor para o grupo de exatidões entre 0-25cm (figura 59), porém, sua exatidão em comparação com a ZPP-1 caiu do 67% ao 48%. Isto

poderia ser um efeito da maior profundidade da ZPP-2, já que está entre -1.50m e 2,6m.

Os resultados nesta zona melhoram para o método de Stumpf em comparação com o método de Polcyn, 40% dos dados tem uma diferença entre 0-25cm em comparação com o 29% do método de Polcyn.

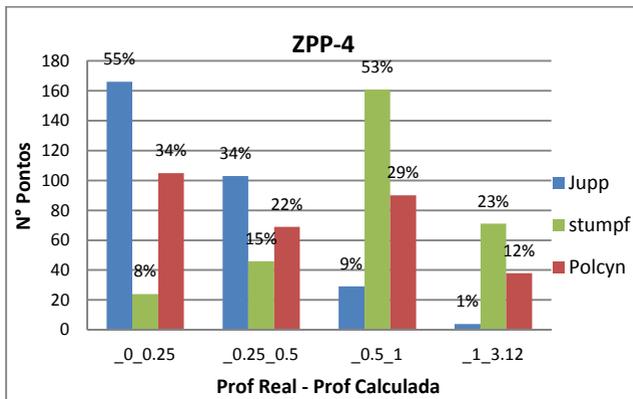
Figura 59: Comparação da diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada para cada um dos métodos aplicados na ZPP-2.



Fonte: Elaborado pelo autor

O método de Jupp na ZPP-4 obteve o segundo melhor resultado dentre todas as ZPP's (Figura 60), 55% (166 pontos) dos dados obtiveram uma diferença de 0-25cm entre a profundidade real e a calculada. É importante ressaltar como o método de Polcyn tem um melhor comportamento que o método de Stumpf em zonas menos profundas, que para este estudo era de entre 0-1m.

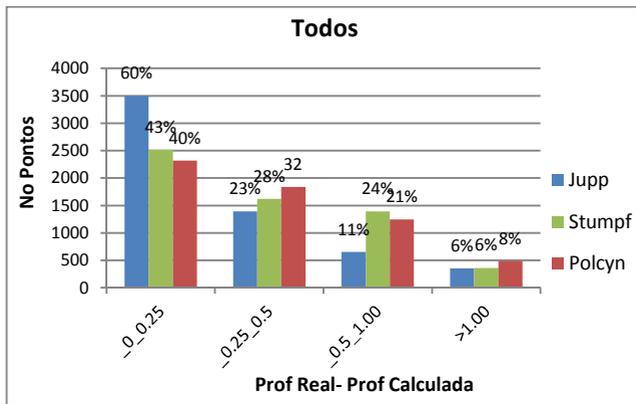
Figura 60: Comparação da diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada para cada um dos métodos aplicados na ZPP-4.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar o total de pontos estudados (5897) é clara a maior exatidão do método de Jupp, conseguindo que 60% dos dados tiveram uma diferença menor do que 25 cm entre os dados reais e os calculados. O método de Stumpf não obteve um bom comportamento na ZPP-4 é melhor que o método de Polcyn no total dos pontos estudados, como era esperado. O método de Polcyn apresentou o pior resultado dos métodos estudados, porém, sua exatidão não é depreciável, o 72% dos seus pontos estariam classificados como levantamentos tipo 2 (Figura 61).

Figura 61: Comparação da diferença entre a profundidade real e a profundidade calculada para cada um dos métodos aplicados.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados encontrados concordam com a teoria e com o esperado, o método que usa mais bandas consegue distinguir melhor a relação entre a refletância e a profundidade da água.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na revisão bibliográfica deste trabalho (Capítulo 2) apresentou-se o comportamento espectral da água. Sua baixa refletância foi comparada com a de outros elementos, como a da vegetação ou do solo. A máxima refletância da água na zona visível do espectro é de aproximadamente 8%, em comparação com a vegetação ou o solo, que podem chegar a ser de 15% ou 20% respectivamente. Porém, esta pouca energia que é refletida pela água demonstrou ser suficiente para ser usada nos diferentes métodos para o cálculo da profundidade.

A banda azul das imagens Landsat é a mais usada pelos diferentes estudos (Nordman 1990, Abdullah 1991, Baban 1993, Cabral 1993), devido à maior penetração da água nesta zona do espectro. Porém, as diferentes quantidades de material em suspensão podem mudar este comportamento. Esse efeito foi confirmado neste trabalho, já que a assinatura espectral da água tem o valor máximo na zona verde do espectro eletromagnético (Figura 19).

O material em suspensão que afeta a assinatura espectral da água também afeta a profundidade na qual a luz consegue penetra-la. Profundidades de até 20 m foram conseguidas por autores como Vanderstraete (2003) ou Tripathi (2002), comparados com os 2,6m deste trabalho. Portanto, concluiu-se que para calcular profundidades maiores usando imagens de satélite é necessário condições ótimas da água, muito limpas e claras.

Pode-se concluir que o pre-processamento da imagem é tão importante como a aplicação dos métodos para o cálculo da profundidade. A aplicação do filtro passa baixa além de eliminar ruídos conseguiu delimitar mais nitidamente os limites das Zonas de penetração ou ZPP's, usadas no método de Jupp. A correção de a maré evita cometer um erro grosso, que poderia mudar os resultados em 30 cm, que era a altura do nível da água na lagoa no dia que foi tirada a imagem.

A correção atmosférica apresentou resultados ótimos. A assinatura espectral mudou radicalmente, especialmente na banda azul, a qual passou de refletâncias de 1100 a valores de 380. A assinatura espectral feita por (Froidefond 1990) com espectrômetro de mão ratifica a efetividade da correção atmosférica, como é mostrado na figura 20.

A edição espectral da imagem, correspondente à conversão de ND a radiação, filtragem, ou correção atmosférica, foram feitas com Envi 4.7. Já a manipulação de elementos tipo vector, como a union dos valores de refletância com as profundidades foram feitas com Arcgis 10.

O Envi 4.7 é útil para manipulações espectrais em quanto o Arcgis em manipulações espaciais.

Na Lagoa da Conceição testaram-se três diferentes métodos para o calculo da profundidade usando uma imagem tirada pelo sensor ETM+ a bordo do Landsat 7. Foi comprovada a maior exatidão conseguida pelo método de Jupp (1989), o qual usou três bandas da imagem, seguido pelo método de Stumpf (2003), que usou duas bandas, y por ultimo o método de Polcyn (1970), que usou uma única banda.

A complexidade de aplicação dos métodos usados varia em função do numero de bandas utilizadas, assim, o método que mereceu mais tempo de trabalho foi o de Jupp, seguido pelo de Stumpf por ultimo de Polcyn. Porém este tempo é recompensado com bons resultados, como aconteceu com o método de Jupp.

Ainda que o método de Jupp conseguiu obter os melhores resultados em qualquer ZPP, marcou um grande diferencial em profundidades menores a 1m. Dos 302 pontos calculados, os dados que obtiveram uma exatidão tipo 1 (<0,5m) foram 166, em comparação com o método de Stumpf que obteve 24 e de Polcyn que obteve 105. Em quanto que o método de Jupp usa uma única equação para calcular profundidades menores a 1m, o método de Polcyn e Stumpf o fazem para calcular as profundidades em toda a lagoa, esta uma vantagem do método de Jupp.

A exatidão do método de Jupp pode ser que seja afetada pela ocupação urbana. Ao aplicar o método de Jupp as áreas com as piores exatidões foram encontradas na zona Norte e Sul da Lagoa, coincidindo com as áreas que tem maior ocupação urbana (Figura 11). Será necessário fazer uma revisão da literatura que pesquisa este tema, a contaminação na Lagoa da conceição e sua relação com a refletância espectral. O método de Stumpf e Jump não apresentam uma relação entre as exatidões e a ocupação Urbana.

A exatidão do método de Stumpf pode ser que seja afetada pelos depósitos sedimentares. Ao aplicar o método de Stumpf as áreas com as piores exatidões foram encontradas na zona Leste da Lagoa, coincidindo com as áreas que tem depósitos sedimentares, dunas o bancos arenosos (Figura 11). Os depósitos sedimentares afetam a refletância da coluna de água, fazendo que seja maior devido à maior refletância da areia no fundo da água.

O método de Jupp não apresentou uma relação perceptível entre os diferentes usos e ocupações da terra e a profundidade de água calculada. Isto pode ser devido a que as ZPP's têm uma delimitação similar com os erros encontrados no método de Polcyn ou o método de

Jupp, ajudando a que os erros possíveis devido à ocupação urbana ou depósitos sedimentares ficaram numa única ZPP, a ZPP-4.

Os métodos para o cálculo de profundidade que usam imagens de satélite conseguem extrair grande quantidade de informação com uma pequena amostra de calibração. Para este estudo foram usadas 250 amostras distribuídas nas profundidades de 0 a 6m, com as quais foram calibrados os modelos e obtidas as profundidades de 5897 pontos. Assim, unicamente o 4% do total dos pontos calculados foram usados para calibrar os modelos.

O custo das imagens de satélite é menor em comparação com um levantamento batimétrico. No caso deste estudo a imagem não teve preço, foram obtidas de graça desde o site da U.S. Geological survey. Ainda que este tipo de imagens tem uma resolução espacial baixa, de 30m, existem outras imagens que tem uma melhor resolução mantendo um preço baixo, como o caso das imagens SPOT, que tem uma resolução de 10m e o preço é de aproximadamente \$10 por Km².

Durante a realização deste trabalho foi lançado a órbita o Landsat 8, que contém a mesma resolução espacial do Landsat 7 mas uma resolução espectral maior, de 16 bits, ou seja, os valores dos números digitais estão num rango de 0-65536. Portanto é recomendável testar um próximo trabalho usando esta imagem de Landsat 8, que também é de graça.

É bom resaltar que os dados cedidos pela prefeitura já tinham sido manipulados e tinham uma precisão de 0.1m, os quais não correspondem com as precisões dum levantamento batimétrico. Isto pode ter afetando os resultados obtidos.

As profundidades encontradas poderiam ser uma opção para complementar as cartas náuticas nas beiras dos corpos de água. As exatidões exigidas pela OHI são classificadas em quatro categorias: especial; ordem 1; ordem 2 e ordem 3, Como exposto no capítulo 6.1. Com o método de Jupp conseguiu-se que o 81% dos dados tiveram uma diferença menor de 50 cm com o valor real, correspondente a um levantamento de ordem 1. Portanto, o 81% dos dados poderiam se destinar a mapear as profundidades baixas das zonas portuárias, canais de acesso, áreas costeiras com grande densidade de tráfego mercante onde a folga sobre a quilha seja menos crítica e as propriedades geofísicas do fundo sejam menos perigosas à navegação.

Os resultados esperados foram cumpridos em parte, já que a profundidade na que penetrou o água foi pouca, porém a exatidão cumpriu com o esperado, que era ter a maioria dos dados testados com uma diferença com valores reais menor a 25 cm.

Existem mais métodos multibanda, porém são poucos os trabalhos que usam mais de duas bandas, perdendo informação nas bandas encontradas perto dos comprimentos de vermelho ou infravermelho. Para os trabalhos seguintes recomenda-se testar a exatidão de diferentes métodos que usem múltiplas bandas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullah, K., et al. (2012). **Contribution form remote sensing in updating bathymetric chart.**

Abdullah, K., et al. (1991). **Evaluation of Landsat TM and Spot data for shallow water bathymetry.** 12th Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.

Adler-Golden, S. M., et al. (1999). **Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN 4.** SPIE Proceeding, Imaging Spectrometry V.

Anderson, G., et al. (1999). **FLAASH and MODTRAN4: state-of-the-art atmospheric correction for hyperspectral data.** Proceedings IEEE Aerospace Conference 4, leee.

Andrade, R. G., et al. (2010). **Análise de metodologias para correção atmosférica e estimativa do albedo da superfície usando imagens Landsat 5–TM.** Simpósio de Geotecnologias no Pantanal 3.

Baban, S. M. J. (1993). **"The evaluation of different algorithms for bathymetric charting of lakes using Landsat imagery."** International Journal of Remote Sensing 14(12): 2263-2273.

Benny, A. and G. Dawson (1983). **"Satellite imagery as an aid to bathymetric charting in the Red Sea."** The Cartographic Journal 20(1): 5-16.

Bernstein, L. S., et al. (2005). **A new method for atmospheric correction and aerosol optical property retrieval for VIS-SWIR multi-and hyperspectral imaging sensors: QUAC (Quick atmospheric correction),** DTIC Document.

Bonetti Filho, J. (2013). "**Alterações de usos e ocupação da terra na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição/Florianópolis através de imagens Landsat TM/5.** Allan de Oliveira de Oliveira Daniel Carazzai 2."

Brasileira., S. C. (2012). " **Nossa Visão das cores e o Espectro eletromagnético.**". Retrieved 08-10, 2012, from http://www.scb.org.br/fc/FC58_19.htm.

Bullard, R. K. (1983). "**Detection of marine contours from Landsat film and tape.**" Remote sensing applications in marine science and technology: 373-381.

Cabral, A. P. and M. L. Vianna (1993). "**Extração da batimetria através de dados TM-Landsat.**" Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7 (SBSR) 4: 94-104.

Camacho, M. A. (2006). **Depth analysis of Midway Atoll using QuickBird multi-spectral imaging over variable substrates**, DTIC Document.

Civco, D. and W. Kennard (1992). "**Satellite remote bathymetry: a new mechanism for modeling.**" Photogrammetric engineering and remote sensing 58(5): 545-549.

Cooley, T., et al. (2002). **FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation**, IEEE.

Chavez, P. (1989). "**Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images.**" Photogrammetric engineering and remote sensing 55: 1285-1294.

Danaher, T. J. and P. Smith (1988). **Applications of shallow water mapping using passive remote sensing.** Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone.

de Ledo, B. S., et al. (1989). **Fishery Production, Anthropogenic and Natural Stress in Conceição Lagoon, Santa Catarina Brazil**, NEMAR.

DHN (2011). "**Norman 25.**"

Edwards, A. J. (1999). **Applications of satellite and airborne image data to coastal management**. Paris, UNESCO.

Elachi, C. and J. Van Zyl (2006). **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**, John Wiley and Sons.

ENVI (2009). **ENVI Tutorial: ATmospherically Correction Multispectral Data Using the FLAASH Module**.

Foerstnow, L. P. and J. T. de Menezes (2011). **Aplicabilidade de imagens de satélite utilizando NDWI na determinação da batimetria da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XV-SBSR, Curitiba.

Froidefond, J. M., et al. (1990). **Relação entre Fatores de Reflectância Espectral e Parâmetros Hidrológicos da Lagoa da Conceição, SC**. O ecossistema da Lagoa da Conceição, FEPEMA: 101-111.

Gao, J. (2009). "**Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations.**" *Progress in Physical Geography* 33(1): 103-116.

Gonçalves, C. B., et al. (2009). **Estimativa de batimetria aplicando análise de componentes principais e dados Ikonos II**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 14 (SBSR), Natal.

Gray, D., et al. (1988). "**The marine remote sensing experience of the Australian surveying and land information group.**"

Gré, J. C. R. and N. O. Horn Filho (1999). **Caracterização textural dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.** O Ecossistema da Lagoa da Conceição, FEPEMA: 25-34.

Green, E. P., et al. (2000). **Remote sensing handbook for tropical coastal management.** Paris, UNESCO.

Gürtler, S., et al. (2009). "**Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ Landsat.**" Revista Brasileira de Cartografia 2(57).

Heron, S. F. and W. J. Skirving (2004). "**Satellite bathymetry use in numerical models of ocean thermal stress.**" La Revista Gayana 68(2): 284-288.

Irish, R. (2008). "**Landsat 7 science data users handbook.**" Landsat Project Science Office 2008(21 October 2008).

Ji, M., et al. (2008). "**Mapping mangroves from high-resolution multispectral imagery: using Beilun Estuary, Guangxi, China as a case study.**" Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

Jupp, D. (1989). **Background and extension to depth of penetration(DOP) mapping in shallow coastal waters.**

Jupp, D. (1989). **Background and extension to depth of penetration(DOP) mapping in shallow coastal waters.** Proceeding of the symposium on remote sensing of coastal zona, Queensland.

Jupp, D. L. B., et al. (1985). "**Remote sensing for planning and managing the Great Barrier Reef of Australia.**" Photogrammetria 40(1): 21-42.

Krug, L. A., et al. (2005). "**Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do**

Estado do Paraná-Brasil. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 12: 3077-3084.

Levin, N. (1999). **Fundamentals of remote sensing.** Trieste, Italy, International Maritime Academy.

Liang, S., et al. (2001). "**Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods.**" *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 39(11): 2490-2498.

Lillesand, T. M., et al. (2004). **Remote sensing and image interpretation,** John Wiley & Sons Ltd.

Liu, S., et al. (2010). **Bathymetric ability of SPOT-5 multi-spectral image in shallow coastal water,** IEEE.

Liu, W. T. H. (2006). **Aplicações de sensoriamento remoto,** Underp.

Loomis Jr, M. J. (2009). **Depth derivation from the WorldView-2 satellite using hyperspectral imagery,** Naval Postgraduate School.

Lyzenga, D. R. (1978). "**Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features.**" *Applied Optics* 17(3): 379-383.

Lyzenga, D. R., et al. (2006). "**Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm.**" *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 44(8): 2251-2259.

Matthew, M. W., et al. (2000). **Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm.** AeroSense 2000, International Society for Optics and Photonics.

McFeeters, S. (1996). "**The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.**" *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-1432.

Mishra, D., et al. (2004). **"Bathymétrie Mapping Using IKONOS Multispectral Data."** GIScience and Remote Sensing 41(4): 301-321.

Moran, M. S., et al. (1992). **"Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output."** Remote sensing of Environment 41(2): 169-184.

Muehe, D., et al. (1989). **"Batimetria e algumas considerações sobre a evolução geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina."** Geosul 7(4): 32-44.

Muslim, A. and G. Foody (2008). **"DEM and bathymetry estimation for mapping a tide-coordinated shoreline from fine spatial resolution satellite sensor imagery."** International Journal of Remote Sensing 29(15): 4515-4536.

Nordman, M. E., et al. (1990). **"Water depth extraction from Landsat-5 imagery."** Environmental Research Institute of Michigan 2: 1129-1139.

Novo, E. M. L. M. (1992). **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, Edgard Blücher.

OHI (2008). **"Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos."**

Pereira, J. P. G. and J. G. d. V. B. Pereira (2008). **Ecobatimetria teoria e prática.** Campina Grande, Grafica Agenda.

Philpot, W. D. (1989). **"Bathymetric mapping with passive multispectral imagery."** Applied Optics 28(8): 1569-1578.

PNUMA, A. (2007). **GEO Brazil, water resources: component of a series of reports on the status and prospects for the environment in Brazil: executive summary.**

Polcyn, F., et al. (1970). **The measurement of water depth by remote sensing techniques**, DTIC Document.

Ribeiro, S. R. A., et al. (2008). **"ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADE A PARTIR DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO E DADOS IKONOS II MEDIANTE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS."** Boletim de Ciências Geodésicas 14(2).

Sabins, F. F. (1996). **Remote Sensing: Principles and interpretation**.

Schowengerdt, R. A. (2007). **Remote sensing: models and methods for image processing**, Academic Pr.

Shapiro, A. and S. Rohmann (2005). **"Summit-to-Sea mapping and change detection using satellite imagery: tools for conservation and management of coral reefs."** Revista de biología tropical 53: 185-193.

Stumpf, R. P., et al. (2003). **"Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types."** Limnology and Oceanography: 547-556.

Tedesco, A. (2003). **Estimativa de profundidades utilizando imagens de alta resolução apoiadas por dados de levantamento batimétrico.**

Tedesco, A. and A. S. Centeno (2003). **"Utilização de imagens Ikonos para estimativa de profundidades."**

Tripathi, N. and A. Rao (2002). **"Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using IRS-1D LISS-III data."** International Journal of Remote Sensing 23(6): 1013-1025.

Vanderstraete, T., et al. (2003). **"Remote sensing as a tool for bathymetric mapping of coral reefs in the Red Sea (Hurghada-**

Egypt)." Belgeo: Belgisch Tijdschrift voor Geografie= Belgeo: Revue belge de Géographie= Belgeo: Belgian Journal of Geography 2003(3).

Warne, D. K. (1978). "**Landsat as an aid in the preparation of hydrographic charts.**" Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 44(8): 1011-1016.

Yarbrough, L. and G. Easson (2003). **Comparison of techniques for deriving bathymetry from remotely sensed data.**

Zainal, A., et al. (1993). "**Monitoring marine ecological changes on the east coast of Bahrain with Landsat TM.**" Photogrammetric engineering and remote sensing 59(3): 415-421.

Zani, H., et al. (2009). "**Batimetria fluvial estimada através de geoestatística em dados orbitais: estudo de caso no rio Paraguai com o sensor ASTER.**" Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14 (SBSR): 1055-1062.

ANEXO A

METADATOS DA IMAGEM.

PROPRIEDADE	VALOR
GROUP	L1_METADATA_FILE
GROUP	METADATA_FILE_INFO
ORIGIN	Image courtesy of the U.S. Geological Survey
REQUEST_ID	0101304027415_00001
PRODUCT_CREATION_TIME	2013-04-03T14:18:43Z
STATION_ID	EDC
LANDSAT7_XBAND	1
GROUND_STATION	EDC
LPS_PROCESSOR_NUMBER	8
DATEHOUR_CONTACT_PERIOD	119417
SUBINTERVAL_NUMBER	4
END_GROUP	METADATA_FILE_INFO
GROUP	PRODUCT_METADATA
PRODUCT_TYPE	L1T
ELEVATION_SOURCE	GLS2000
PROCESSING_SOFTWARE	LPGS_12.1.4
EPHEMERIS_TYPE	DEFINITIVE
SPACECRAFT_ID	Landsat7
SENSOR_ID	ETM+
SENSOR_MODE	SAM
ACQUISITION_DATE	2001-07-13
SCENE_CENTER_SCAN_TIME	13:01:05.4578290Z
WRS_PATH	220
STARTING_ROW	79
ENDING_ROW	79
BAND_COMBINATION	123456678
PRODUCT_UL_CORNER_LAT	-26.4710025

PRODUCT_UL_CORNER_LON	-50.3699614
PRODUCT_UR_CORNER_LAT	-26.4401808
PRODUCT_UR_CORNER_LON	-47.9668124
PRODUCT_LL_CORNER_LAT	-28.4073941
PRODUCT_LL_CORNER_LON	-50.3588657
PRODUCT_LR_CORNER_LAT	-28.3739292
PRODUCT_LR_CORNER_LON	-47.9134922
PRODUCT_UL_CORNER_MAPX	562800000
PRODUCT_UL_CORNER_MAPY	-2928000000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPX	802500000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPY	-2928000000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPX	562800000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPY	-3142500000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPX	802500000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPY	-3142500000
PRODUCT_SAMPLES_PAN	15981
PRODUCT_LINES_PAN	14301
PRODUCT_SAMPLES_REF	7991
PRODUCT_LINES_REF	7151
PRODUCT_SAMPLES_THM	7991
PRODUCT_LINES_THM	7151
BAND1_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B1.TIF
BAND2_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B2.TIF
BAND3_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B3.TIF
BAND4_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B4.TIF
BAND5_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B5.TIF
BAND61_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B6_VCID_1.TIF
BAND62_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B6_VCID_2.TIF
BAND7_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B7.TIF
BAND8_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_B8.TIF
GCP_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_GCP.txt

METADATA_L1_FILE_NAME	LE72200792001194EDC00_MTLold.txt
CPF_FILE_NAME	L7CPF20010701_20010930_09
END_GROUP	PRODUCT_METADATA
GROUP	MIN_MAX_RADIANCE
LMAX_BAND1	191600
LMIN_BAND1	-6200
LMAX_BAND2	196500
LMIN_BAND2	-6400
LMAX_BAND3	152900
LMIN_BAND3	-5000
LMAX_BAND4	157400
LMIN_BAND4	-5100
LMAX_BAND5	31060
LMIN_BAND5	-1000
LMAX_BAND61	17040
LMIN_BAND61	0
LMAX_BAND62	12650
LMIN_BAND62	3200
LMAX_BAND7	10800
LMIN_BAND7	-350
LMAX_BAND8	243100
LMIN_BAND8	-4700
END_GROUP	MIN_MAX_RADIANCE
GROUP	MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QCALMAX_BAND1	255.0
QCALMIN_BAND1	1.0
QCALMAX_BAND2	255.0
QCALMIN_BAND2	1.0
QCALMAX_BAND3	255.0
QCALMIN_BAND3	1.0
QCALMAX_BAND4	255.0
QCALMIN_BAND4	1.0

QCALMAX_BAND5	255.0
QCALMIN_BAND5	1.0
QCALMAX_BAND61	255.0
QCALMIN_BAND61	1.0
QCALMAX_BAND62	255.0
QCALMIN_BAND62	1.0
QCALMAX_BAND7	255.0
QCALMIN_BAND7	1.0
QCALMAX_BAND8	255.0
QCALMIN_BAND8	1.0
END_GROUP	MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP	PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND1	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND2	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND3	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND4	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND5	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND61	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND62	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND7	CPF
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND8	CPF
CORRECTION_METHOD_BIAS	IC
BAND1_GAIN	H
BAND2_GAIN	H
BAND3_GAIN	H
BAND4_GAIN	H
BAND5_GAIN	H
BAND6_GAIN1	L
BAND6_GAIN2	H
BAND7_GAIN	H

BAND8_GAIN	L
BAND1_GAIN_CHANGE	0
BAND2_GAIN_CHANGE	0
BAND3_GAIN_CHANGE	0
BAND4_GAIN_CHANGE	0
BAND5_GAIN_CHANGE	0
BAND6_GAIN_CHANGE1	0
BAND6_GAIN_CHANGE2	0
BAND7_GAIN_CHANGE	0
BAND8_GAIN_CHANGE	0
BAND1_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND2_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND3_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND4_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND5_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND6_SL_GAIN_CHANGE1	0
BAND6_SL_GAIN_CHANGE2	0
BAND7_SL_GAIN_CHANGE	0
BAND8_SL_GAIN_CHANGE	0
SUN_AZIMUTH	38.3715332
SUN_ELEVATION	30.1057566
OUTPUT_FORMAT	GEOTIFF
END_GROUP	PRODUCT_PARAMETERS
GROUP	CORRECTIONS_APPLIED
STRIPING_BAND1	NONE
STRIPING_BAND2	NONE
STRIPING_BAND3	NONE
STRIPING_BAND4	NONE
STRIPING_BAND5	NONE
STRIPING_BAND61	NONE
STRIPING_BAND62	NONE
STRIPING_BAND7	NONE

STRIPING_BAND8	NONE
BANDING	N
COHERENT_NOISE	Y
MEMORY_EFFECT	N
SCAN_CORRELATED_SHIFT	N
INOPERABLE_DETECTORS	N
DROPPED_LINES	N
END_GROUP	CORRECTIONS_APPLIED
GROUP	PROJECTION_PARAMETERS
REFERENCE_DATUM	WGS84
REFERENCE_ELLIPSOID	WGS84
GRID_CELL_SIZE_PAN	15000
GRID_CELL_SIZE_THM	30000
GRID_CELL_SIZE_REF	30000
ORIENTATION	NUP
RESAMPLING_OPTION	CC
MAP_PROJECTION	UTM
END_GROUP	PROJECTION_PARAMETERS
GROUP	UTM_PARAMETERS
ZONE_NUMBER	22
END_GROUP	UTM_PARAMETERS
END_GROUP	L1_METADATA_FILE
END	