ANA CRISTINA OLIVEIRA CANCORO DE MATOS

Implementação de modelos digitais de terreno
para aplicações na área de geodésia e geofísica
na América do Sul

São Paulo

2005

ANA CRISTINA OLIVEIRA CANCORO DE MATOS

Implementação de modelos digitais de terreno
para aplicações na área de geodésia e geofísica
na América do Sul

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Ênfase:

Informações Espaciais

Orientador:

Prof. Dr. Denizar Blitzkow

São Paulo

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Matos, Ana Cristina Oliveira Cancoro de
Implementação de modelos digitais de terreno para aplica -
coes na área de geodésia e geofísica na América do Sul /
A.C.O.C. Matos. -- São Paulo, 2005.
355 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Topografia 2.Geodésia geométrica 3.Geofísica aplicada
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Transportes II.t.

*Dedico esta tese aos muito amados Fernando (marido) e Edgard (pai);
e as maravilhosas mulheres que iluminam a minha vida:*

*Arminda (mãe - em memória),
Esther e Eunice (tias - em memória),
Eponina e Elza (tias),
Tatiana e Mariana (filhas).*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Denizar Blitzkow, pela orientação, incentivo em todas as fases do trabalho e pela amizade conquistada pelo convívio nestes cinco anos.

Aos Professores Dr. Jorge Pimentel Cintra, Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior, Dr. Nicola Paciléo Netto, pela ajuda e apoio sempre manifestados.

Às amigas Maria Cristina Barboza Lobianco e Dra. Ilce de Oliveira Campos, e ao colega Marcelo Antônio Nero pelo prazer da convivência e por toda a disponibilidade para auxiliar.

Aos estagiários Aquiles Farias Cravo, Patrícia Tozzini Ribeiro, Priscila Mercaldi Oliveira e Yuri Barboza Fang e ao Wellison Araújo, pela ajuda no trabalho de digitalização das folhas de bordo e cartas náuticas. Em especial à Maria Antonieta Rubião Rito de Freitas que, além de sua participação no trabalho de digitalização das folhas de bordo, teve a paciência e a competência de ajudar a conferir 142.297 pontos de batimetria.

À Arlete Tieko Ohata por ensinar-me a trabalhar com o programa Geomedia Professional.

Às competentes e simpáticas bibliotecárias Leonor Madalena Andrade, Regina Elena Pereira e Vilma Aparecida André.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Centro de Hidrografia da Marinha pela receptividade, pela orientação e pela cessão das folhas de bordo, cartas náuticas e dados do projeto LEPLAC. Em especial aos Capitães-de-Fragata Luiz Antônio Felix, Luiz Carlos Torres, Alexandre Borges Briones, à Capitão-Tenente Maria Fernanda Rezende Arentz, ao Primeiro-Sargento José Ferreira Xavier e ao Suboficial Antônio Menezes Cardoso.

Ao Instituto Geográfico Militar da Argentina, em especial ao Tcnl. Ing. Eduardo Lauría, por ceder a carta vetorizada da Argentina na escala 1:250.000 e as referências altimétricas.

A Dra. Maria Cristina Pacino da Universidade Nacional de Rosário e ao Enge-

nheiro Federico Mayer do Servicio de Hidrografia Naval pela cessão das cartas náuticas da Argentina.

Ao Instituto Geográfico Militar do Uruguai pela cessão do MDT obtido da digitalização de cartas 1:100.000.

À Coordenação de Geodésia (CGED) do Rio de Janeiro e à Gerência de Geodésia e Cartografia da Unidade Estadual de Goiás (GGCUE-GO).

Ao Eng. Luiz Fiori Ramos Casaroli do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias.

Ao GETECH por todo apoio, em especial ao Dr. J. Derek Fairhead e ao Graham Gifford.

À Célia Queiroz Correia pela ajuda na correção ortográfica.

Ao Fernando e aos meus sogros, Nísia e Gomes, pela compreensão e as palavras de incentivo.

Finalmente, aos meus amigos e em especial à amiga Heloísa por todo apoio emocional.

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação,
mas como uma oportunidade invejável para aprender a
influência libertadora da beleza do reino do espírito,
para seu próprio prazer pessoal e para proveito da
comunidade à qual seu futuro trabalho pertence.”*

Albert Einstein

RESUMO

O objetivo desse trabalho de tese foi a coleta de novas informações e a avaliação de dados disponíveis, visando a análise das melhores alternativas para a obtenção de um modelo digital de terreno (MDT) para a América do Sul. O modelo compreendeu a parte continental e oceânica, limitada pelas latitudes de 60° S a 25° N e longitudes de 100° W a 25° W. Na área continental foram usadas informações provenientes de cartas topográficas digitalizadas, do recente modelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e do modelo disponível DTM2002. Na área oceânica foram utilizadas informações de profundidade do DTM2002, de cartas náuticas em diferentes escalas, folhas de bordo e o projeto LEPLAC, para o Brasil, e de cartas náuticas na Argentina. O trabalho ensejou um processo intensivo e exaustivo de comparação dos modelos existentes (SRTM, DTM2002, GLOBE, GTOPO30, ETOPO2, JGP95E, TERRAINBASE e ETOPO5) e das novas informações disponíveis. No estudo do SRTM analisou-se 2.013 quadrículas de 1° X 1° da região continental, obtendo-se para cada quadrícula os valores máximo e mínimo da altitude com suas respectivas posições, o valor médio e o número de pontos sem informação, além da representação 3D e do histograma das altitudes. Foi também realizada a comparação das altitudes interpoladas do modelo SRTM com os pontos GPS implantados ao longo dos rios Madeira, Solimões e Amazonas e com RNs na grande São Paulo. Com os oito MDTs citados foram construídos perfis longitudinais e latitudinais de toda a área continental passando sobre a altitude máxima de cada quadrícula do SRTM. Os modelos SRTM, DTM2002, GLOBE, GTOPO30, ETOPO2 e ETOPO5 foram comparados entre si nos pontos da grade em comum. Além disso, foram realizadas comparações utilizando uma importante fonte de informação altimétrica representada pela rede de nivelamento geométrico. As análises realizadas resultaram na geração de três modelos alternativos de MDT para a América do Sul. A opção do espaçamento da malha para a construção do modelo foi proveniente da compatibilização entre a capacidade computacional e o resultado esperado nas diferentes aplicações de um MDT. Além disso, foram implementadas duas aplicações específicas importantes na área de exploração mineral e no cálculo das alturas geoidais: a correção de terreno e o efeito indireto.

ABSTRACT

The objective of this thesis has been to collect new information and to evaluate available data in order to provide arguments in the analysis for the derivation of the best DTM for South America. The continental and oceanic part of a block limited by latitudes 60° S and 25° N and longitudes 100° W and 25° W is the object of the model. In the continental area data derived from topographic maps, the recent Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and the available DTM2002 model were used. In the oceanic area the depth data from DTM2002, nautical maps of different scales, boarding maps and LEPLAC project were used in Brazil and nautical maps in Argentina. The activities involved an intensive process of comparison between the existing models (SRTM, DTM2002, GLOBE, GTOPO30, ETOPO2, JGP95E, TERRAINBASE e ETOPO5) and the new information. With respect to SRTM 2,013 blocks of 1° X 1° in the continental area were analysed, deriving for each block the maximum and minimum values for the height with the respective position, the mean value and the number of points without information. The 3D representation as well as the histogram of the heights for each block is also presented. The GPS points established along the Amazonas, Solimões and Madeira rivers in Amazonas on the BMs in São Paulo area were also compared with SRTM interpolated values. SRTM, DTM2002, GLOBE, GTOPO30, ETOPO2 and ETOPO5 were also compared between themselves in the common points of the grid. Besides, an important comparison were carried out with the first order levelling network. After the analysis were finished three different DTM were generated for South America. The grid spacing were select envisaged a compatibilization between computer capacity and the applications requirements. Finally, two specific applications for mineral exploration and geoid computation were implemented: the terrain correction and the indirect effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Exemplo de tomada das de fotos aéreas com recobrimento	44
Figura 2 -	Aparelho restituidor	44
Figura 3 -	Geometria de iluminação do sistema SAR	48
Figura 4 -	Processo de geração e processamento das imagens SAR	49
Figura 5 -	Ilustração da geometria de aquisição InSAR	50
Figura 6 -	Geometria InSAR	51
Figura 7 -	Localização das variáveis h , $\delta\theta$, R_1 e θ_o	53
Figura 8 -	Geração de imagens em 3D com interferometria de RADAR	54
Figura 9 -	LIDAR topográfico	56
Figura 10 -	Princípio de funcionamento do LIDAR	56
Figura 11 -	ABL - LIDAR batimétrico	57
Figura 12 -	SONAR	58
Figura 13 -	SONAR com multi-feixes	59
Figura 14 -	Imagem em 3D gerada usando SONAR com multi-feixes	59
Figura 15 -	SONAR de varredura lateral	60
Figura 16 -	Uma visualização geométrica de um RTI	64
Figura 17 -	Conjunto de pontos de uma amostra e <i>breaklines</i>	65
Figura 18 -	Uma vista em perspectiva do resultado no modelamento da superfície	65
Figura 19 -	Visualização da superfície de uma grade	66
Figura 20 -	Visualização discreta de uma grade	66
Figura 21 -	Perfil de uma superfície gerada pelo método de interpolação por média ponderada com inverso da distância	70
Figura 22 -	Diagrama de Voronoi e triangulação de Delaunay	71
Figura 23 -	Ponto a ser interpolado com relação a posições dos elementos da TIN	71

Figura 24 - Interpolação de vizinho natural	71
Figura 25 - Esquema de pesos usado na interpolação de vizinho natural	72
Figura 26 - Perfil de uma superfície gerada pelo método de interpolação vizinho natural	72
Figura 27 - Superfície de tendência em duas dimensões	73
Figura 28 - Perfil de uma superfície gerada pelo método de interpolação mínima curvatura	75
Figura 29 - Perfil de numa superfície gerada pelo método de krigagem	77
Figura 30 - ITRF x WGS84	82
Figura 31 - Elipsóide e geóide	84
Figura 32 - Relação entre altitude elipsoidal (h), ortométrica (H) e altura geoidal (N)	84
Figura 33 - Tipos de altitudes conforme a superfície e direção	85
Figura 34 - Diferença entre altitude ortométrica e geométrica	85
Figura 35 - Altitude nivelada	86
Figura 36 - Número Geopotencial	87
Figura 37 - Preamar e baixa-mar	89
Figura 38 - Diagrama da estação maregráfica de Búzios	90
Figura 39 - Maré semidiurna	94
Figura 40 - Maré diurna	94
Figura 41 - Marés mistas	95
Figura 42 - Maré desigualdades diurnas	95
Figura 43 - Fontes dos dados do modelo GTOPO30	108
Figura 44 - Fonte dos dados do Modelo de GLOBE	109
Figura 45 - Fonte dos dados do Modelo de ETOPO2	111
Figura 46 - Modelo de Smith e Sandwell (1997)	112
Figura 47 - Fonte dos dados do Modelo de ACE	114
Figura 48 - Superfície de altitudes no Panamá pelo modelo ACE e DTM2002	116

Figura 49 - Representação artística do ônibus espacial durante a missão do projeto SRTM	117
Figura 50 - Área de cobertura da missão SRTM	118
Figura 51 - Quadrícula N00W067 - Picos da Neblina e 31 de Março	120
Figura 52 - Quadrícula S23W045 - Pedra da Mina e Agulhas Negras	121
Figura 53 - Quadrícula S28W069 - Bonete	122
Figura 54 - Quadrícula S33W071 - Cerro Aconcágua	123
Figura 55 - Perfil longitudinal - Quadrícula N00W050	124
Figura 56 - Perfil latitudinal - Quadrícula N00W050	125
Figura 57 - Quadrícula N00W050 - SRTM	126
Figura 58 - Quadrícula N00W050 - DTM2002	126
Figura 59 - Perfil longitudinal - Pico da Neblina	129
Figura 60 - Perfil longitudinal - Pico 31 de março	130
Figura 61 - Perfil longitudinal - Pico da Agulhas Negras	131
Figura 62 - Perfil longitudinal - Pico da Pedra da Mina	132
Figura 63 - Picos andinos	134
Figura 64 - Quadrícula S34W070 - Pico Tupungato	136
Figura 65 - Quadrícula S33W071 - Pico Aconcágua	137
Figura 66 - Quadrícula S28W069 - Pico Bonete	138
Figura 67 - Quadrícula S25W069 - Pico Llullaico	139
Figura 68 - Quadrícula S23W068 - Pico Lincancábur	140
Figura 69 - Quadrícula S19W069 - Pico Sajama	141
Figura 70 - Quadrícula S17W068 - Pico Illimani	142
Figura 71 - Quadrícula S16W069 - Pico Illampu	143
Figura 72 - Quadrícula S17W072 - Pico Misti	144
Figura 73 - Quadrícula S16W073 - Pico Coropuna	145
Figura 74 - Quadrícula S11W077 - Pico Yerupaja	146

Figura 75 -	Quadícula S10W078 - Pico Huascarán	147
Figura 76 -	Quadícula S03W079 - Pico Sangay	148
Figura 77 -	Quadícula S02W079 - Pico Chimborazo	149
Figura 78 -	Quadícula S01W079 - Pico Cotopaxi	150
Figura 79 -	Quadícula N00W078 - Pico Cayambe	151
Figura 80 -	Quadícula N02W077 - Pico Huila	152
Figura 81 -	Quadícula N04W076 - Pico Tolima	153
Figura 82 -	Quadícula N10W074 - Pico Cristóbal Colón	154
Figura 83 -	Perfil longitudinal - Quadícula N02W063	157
Figura 84 -	Perfil longitudinal - Quadícula N00W070	158
Figura 85 -	Perfil longitudinal - Quadícula S03W063	159
Figura 86 -	Perfil longitudinal - Quadícula S06W072	160
Figura 87 -	Perfil longitudinal - Quadícula S01W063	161
Figura 88 -	Perfil longitudinal - Quadícula S02W064	162
Figura 89 -	Perfil latitudinal - Quadícula S02W060	163
Figura 90 -	Perfil longitudinal - Quadícula S04W061	164
Figura 91 -	Perfil latitudinal - Quadícula S04W064	165
Figura 92 -	Perfil longitudinal - Quadícula S03W056	166
Figura 93 -	Estações GPS próximas ao Rios Madeira, Amazonas e Solimões	171
Figura 94 -	RNs da região da grande São Paulo	172
Figura 95 -	Áreas de cartas digitalizadas para o modelo SAM_1mv2	176
Figura 96 -	Topografia e batimetria do modelo SAM_1mv2	177
Figura 97 -	Histogramas das diferenças em altitudes	182
Figura 98 -	Histogramas das diferenças em altitudes entre -50 a +50 m	183
Figura 99 -	Distribuição das RNs do Brasil	188
Figura 100 -	Distribuição das RNs da Argentina	189
Figura 101 -	Distribuição das cartas náuticas	191

Figura 102 - Distribuição das folhas de bordo	194
Figura 103 - Projeto LEPLAC	196
Figura 104 - Distribuição do projeto LEPLAC	198
Figura 105 - Distribuição das cartas náuticas da Argentina	199
Figura 106 - Divisões de áreas de interpolação	202
Figura 107 - Resultado final do SAM_1mv2 para a região oceânica	203
Figura 108 - Área 1 - Histogramas com todas as sondagens	207
Figura 109 - Área 1 - Histogramas com sondagens até 250 m	207
Figura 110 - Área 2 - Histogramas com todas as sondagens	208
Figura 111 - Área 2 - Histogramas com sondagens até 250 m	208
Figura 112 - Área 3 - Histogramas com todas as sondagens	209
Figura 113 - Área 3 - Histogramas com sondagens até 250 m	209
Figura 114 - Área 4 - Histogramas com todas as sondagens	210
Figura 115 - Área 4 -Histogramas com sondagens até 250 m	210
Figura 116 - Área 5 -Histogramas com todas as sondagens	211
Figura 117 - Área 5 - Histogramas com sondagens até 250 m	211
Figura 118 - Área 6 - Histogramas com todas as sondagens	212
Figura 119 - Área 6 - Histogramas com sondagens até 250 m	212
Figura 120 - Área 7 - Histogramas com todas as sondagens	213
Figura 121 - Área 7 - Histogramas com sondagens até 250 m	213
Figura 122 - Área 8 - Histogramas com todas as sondagens	214
Figura 123 - Área 8 - Histogramas com sondagens até 250 m	214
Figura 124 - Área 9 - Histogramas com todas as sondagens	215
Figura 125 - Área 9 - Histogramas com sondagens até 250 m	215
Figura 126 - Área 10 - Histogramas com todas as sondagens	216
Figura 127 - Área 10 - Histogramas com sondagens até 250 m	216
Figura 128 - SAM_1mv2 - Imagem em 3D da área 5	217

Figura 129 - ETOPO5 - Imagem em 3D da área 5	217
Figura 130 - SAM_1mv2 - Imagem em 3D da área 10	218
Figura 131 - ETOPO5 - Imagem em 3D da área 10	218
Figura 132 - SAM_1mv2 - Região de ϕ_G -1° a 0° e λ_G de -49° a -48°	219
Figura 133 - DTM2002 - Região de ϕ_G -1° a 0° e λ_G de -49° a -48°	219
Figura 134 - SAM_1mv2 - Região de ϕ_G -24° a -22° e λ_G de -44° a -42°	220
Figura 135 - DTM2002 - Região de ϕ_G -24° a -22° e λ_G de -44° a -42°	220
Figura 136 - Histograma da diferença entre o SAM_1mv2 e o DTM2002	221
Figura 137 - Diferenças superiores a 50 m	223
Figura 138 - Correção de terreno	226
Figura 139 - Perfil gravimétrico através da montanha Madera no Texas	227
Figura 140 - Zonas e compartimentos de Hammer (1939)	228
Figura 141 - As 255 quadriculas utilizadas para a integração da correção de terreno	233
Figura 142 - Localização dos pontos que não foram considerados na CT	234
Figura 143 - Correção de terreno para o modelo SAM_30s	235
Figura 144 - Correção de terreno para o modelo SAM_1mv1	236
Figura 145 - Correção de terreno para o modelo SAM_1mv2	237
Figura 146 - Correção de terreno para o modelo DTM2002	238
Figura 147 - Correção de terreno para o modelo GLOBE	239
Figura 148 - Correção de terreno para o modelo GTOPO30	240
Figura 149 - Correção de terreno para o modelo ETOPO2	241
Figura 150 - Correção de terreno para o modelo JGP95E	242
Figura 151 - Correção de terreno para o modelo TERRAINBASE	243
Figura 152 - Correção de terreno para o modelo ETOPO5	244
Figura 153 - Geóide e co-geóide	245
Figura 154 - Efeito indireto para o modelo SAM_30s	248
Figura 155 - Efeito indireto para o modelo ETOPO5	249

Figura 156 - Exemplo: Informações do marégrafo Angra dos Reis	277
Figura 157 - Exemplo: Informações do marégrafo Itajaí	278
Figura 158 - Divisão de sub-áreas em amplitude de Galheta à Paranaguá	281
Figura 159 - Divisão de sub-áreas em amplitude de Paranaguá à Ponta do Felix ..	281
Figura 160 - Divisão de sub-áreas em fase de Galheta à Paranaguá	283
Figura 161 - Divisão de sub-áreas em fase de Paranaguá à Ponta do Felix	283
Figura 162 - Divisão final de sub-áreas	283
Figura 163 - Tipos de navegação	284
Figura 164 - Divisão em sub-áreas proposta pela Marinha	286
Figura 165 - Divisão em sub-áreas pela primeira proposta	287
Figura 166 - Divisão final de sub-área	288
Figura 167 - Diferença entre o método da Marinha e a primeira proposta	289
Figura 168 - Diferença entre o método da Marinha e a segunda proposta	290
Figura 169 - Lançamento da profundidade estabelecida pela Marinha para as FB ..	322
Figura 170 - Marés de sizígia e marés de quadratura	352
Figura 171 - Elementos das marés	353
Figura 172 - Planos de referências de marés	355

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Bandas de RADAR	47
Tabela 2 -	ITRS e ICRS	81
Tabela 3 -	Componentes astronômicos	93
Tabela 4 -	Constantes harmônicas selecionadas para estação maregráfica de Búzios	93
Tabela 5 -	Parâmetros de translação de sistemas de coordenadas	100
Tabela 6 -	Precisão altimétrica absoluta estimada para as fontes do GLOBE	103
Tabela 7 -	Fontes do modelo do TERRAINBASE	106
Tabela 8 -	Porcentagem de utilização das fontes para as áreas continentais	111
Tabela 9 -	Área de cobertura da missão SRTM	117
Tabela 10 -	Picos mais altos do Brasil	128
Tabela 11 -	Localização das altitudes máximas nos modelos	128
Tabela 12 -	Picos andinos	135
Tabela 13 -	Comparação entre modelos para a parte continental	168
Tabela 14 -	Comparação estatística entre os modelos	168
Tabela 15 -	Estações GPS próximas a margem do Rio Madeira	173
Tabela 16 -	Estações GPS próximas a margem dos rios Solimões e Amazonas	173
Tabela 17 -	RNs na Grande São Paulo	174
Tabela 18 -	Mapa Índice de 1994 (região nordeste)	178
Tabela 19 -	Mapa Índice de 1994 (região norte)	179
Tabela 20 -	Mapa Índice de 1994 (região centro-oeste)	179
Tabela 21 -	Mapa Índice de 1994 (região sudeste)	180
Tabela 22 -	Mapa Índice de 1994 (região sul)	180
Tabela 23 -	Comparação entre modelos para a parte continental	181

Tabela 24 - Comparação estatística entre os modelos	181
Tabela 25 - Porcentagens das comparações das RNs para o Brasil	186
Tabela 26 - Resultados estatísticos dos modelos para o Brasil	186
Tabela 27 - Porcentagens das comparações das RNs para a Argentina	187
Tabela 28 - Resultados estatísticos dos modelos para a Argentina	187
Tabela 29 - Número de pontos de batimetria das cartas náuticas	192
Tabela 30 - Folhas de bordo do litoral de Estado de São Paulo	193
Tabela 31 - Folhas de bordo digitalizadas	193
Tabela 32 - Projeto LEPLAC	197
Tabela 33 - Cartas náuticas digitalizadas da Argentina	200
Tabela 34 - Áreas oceânicas interpoladas	201
Tabela 35 - Comparação entre modelos	221
Tabela 36 - Diferença entre os valores das cartas e os interpolados	222
Tabela 37 - Zonas de Hammer	229
Tabela 38 - Pontos eliminados da quadrícula 50 do modelo SAM_1mv1.	232
Tabela 39 - Número de pontos eliminados nos MDT e suas respectivas quadrículas.	232
Tabela 40 - Correção de terreno obtidas por vários MDT	232
Tabela 41 - Efeito indireto obtido para vários MDT	247
Tabela 42 - Marégrafos do Brasil	266
Tabela 43 - Nível de Redução	269
Tabela 44 - Marégrafos da Argentina	272
Tabela 45 - Levantamento dos marégrafos referenciados a Imbituba	276
Tabela 46 - Divisão de sub-áreas em função de Z_o (Amplitude)	281
Tabela 47 - Divisão de sub-áreas em função de fase	282
Tabela 48 - Rota dos navios	284
Tabela 49 - Linhas de divisórias das sub-áreas	285
Tabela 50 - Divisão de sub-áreas em função de Z_o (Amplitude) para a primeira	

proposta	288
Tabela 51 - Linhas de divisórias das sub-áreas para a primeira proposta	289
Tabela 52 - Especificação mínima para o levantamento hidrográfico	292
Tabela 53 - Informações das cartas náuticas e folhas de bordo do Brasil	294
Tabela 54 - Informações das cartas náuticas da Argentina	313
Tabela 55 - Erro aceitável no solo	320
Tabela 56 - Desvio padrão, coeficiente de confiança e probabilidade de ocorrência	321
Tabela 57 - Análise Estatística do SRTM	324

LISTA DE SIGLAS

ACE	Altimeter Corrected Elevations
ADD	Antarctic Digital Database
ALB	Airborne Laser Bathymetry
AMS	Army Map Service
ANUDEM	Australian National University Digital Elevation Modeling
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
AUSLIG	Australian Surveying and Land Information Group
BHI	Bureau Hidrográfico Internacional
BM	Baixa-mares
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CIO	Conventional Internacional Origin
CNUDM	Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
CT	Correção de Terreno
DBDB5	Digital Bathymetric Data Base 5 minute
DBDBV	Digital Bathymetric Data Base, Variable-resolution
DCW	Digital Chart of the World
DEM	Digital Elevation Model
DGM	Digital Ground Model
DHM	Digital Height Model
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMA	Defence Mapping Agency
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DoD	U.S. Department of Defense
DORIS	Doppler Orbitography and Radio Positioning by Satellite

DQM	Desvio Quadrático Médio
DSG	Diretoria do Serviço Geográfico
DSM	Digital Surface Model
DTED	Digital Terrain Elevation Data
EDC	EROS Data Center
FB	Folha de Bordo
FFT	Fast Fourier Transform
FNOC	Navy Fleet Numerical Oceanographic Center
GETECH	Geophysical Exploration Technology
GLOBE	Global Land One-kilometer Base Elevation
GMT	Generic Mapping Tools
GSFC	Goddard Space Flight Center
GSI	Geographical Survey Institute
GTOPO30	Global Topographic Data
HWF&C	High Water Full and Change
IAG	International Association of Geodesy
IAS	Ice Altimetry System
IAU	International Astronomical Union
IBCAO	International Bathymetric Chart of the Artic Ocean
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation Service
IFSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IGM	Instituto Geográfico Militar
ILS	Internacional Latitude Service
IMW	International Map of the World
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

IRM	Internacional Reference meridian
IRP	Internacional Reference Pole
ITRFyy	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	Internacional Terrestrial Reference System
JGM	Joint Gravity Model
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LCR	Manaaki Whenua Landcare Research
LEPLAC	Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLR	Lunar Laser Ranging
MDA	Modelo Digital de Altura
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MHW	Mean High Water
MHWN	Mean High Water Neaps
MHWS	Mean High Water Springs
MIT	Massachusetts Institute Technology
MLW	Mean Low Water
MLWN	Mean Low Water Neaps
MLWS	Mean Low Water Springs
MN	Milhas Náuticas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVOCEANO	Naval Oceanographic Office
NGA	National Geo-spatial Intelligence Agency
NGDC	National Geophysical Data Center
NIMA	National Imagery and Mapping Agency

NMM	Nível Médio do Mar
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NR	Nível de Redução
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy
OSU	Ohio State University
PGGM	Programa de Geologia e Geofísica Marinha
PM	Preamares
PVCG	Problema de Valor de Contorno da Geodésia
RAR	Real Aperture RADAR
RMSE	Root Mean Square Error
RN	Referência de Nível
RTI	Rede Triangular Irregular
SAGP	South American Gravity Project
SAM	South American Model
SAR	Synthetic Aperture RADAR
SCAR	Scientific Committee on Antarctic Research
SGN	Servizio Geologico Nazionale
SHN	Servicio de Hidrografia Naval
SI	Sistema de Navegação Inercial
SLR	Satellite Laser Ranging
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangular Irregular Network
TNM	Topografia do Nível Médio
TSO	Topografia da Superfície Oceânica
USGS	United State Geological Survey

VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 1984
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	37
1.1	Considerações Gerais	37
1.2	Terminologia	39
1.3	Objetivos	39
1.4	Estrutura do Trabalho	41
2	FONTES DE DADOS PARA GERAÇÃO DE MDT.....	43
2.1	Introdução	43
2.2	Aerofotogrametria	43
2.3	RADAR	46
2.3.1	Introdução	46
2.3.2	Tipos de sistema de RADAR	47
2.3.3	Interferometria por RADAR	49
2.4	LIDAR	55
2.4.1	Introdução	55
2.4.1.1	LIDAR topográfico	55
2.4.1.2	LIDAR batimétrico	55
2.5	Sonar	57
2.5.1	Introdução	57
2.5.2	Tipos de Sonares	58
2.5.2.1	SONAR com feixe vertical	58
2.5.2.2	SONAR de varredura lateral	60

3	REPRESENTAÇÃO E MODELAGEM.....	63
3.1	Introdução	63
3.2	Representação	64
3.2.1	Rede Triangular Irregular	64
3.2.2	Malha quadrada ou retangular	65
3.2.3	Curvas de nível	66
3.3	Modelagem matemática	67
3.3.1	Média das altitudes das amostras vizinhas	68
3.3.2	A triangulação de Delaunay e vizinho natural	70
3.3.3	Superfície de tendência	72
3.3.4	Série de Fourier	74
3.3.5	Superfície de mínima curvatura (<i>Spline</i>)	75
3.3.6	Krigagem	76
4	REFERENCIAL GEODÉSICO.....	79
4.1	Introdução	79
4.2	Referencial Planimétrico	79
4.3	Referencial Altimétrico	83
4.4	Nível de Referência das cartas náuticas	88
4.4.1	Maré	88
4.4.2	Cartas náuticas	89
4.4.3	Análise harmônica de marés	91
4.4.4	Métodos de classificação de maré	92
4.4.5	Classificação do NR	96
5	SOUTH AMERICAN MODEL (SAM).....	99
5.1	Introdução	99

5.2	Método de transformação de coordenadas	100
5.3	Modelos Globais	100
5.3.1	ETOPO5	104
5.3.2	TERRAINBASE	105
5.3.3	JGP95E	105
5.3.4	GTOPO30	107
5.3.5	GLOBE versão 1.0	109
5.3.6	ETOPO2	110
5.3.7	ACE	112
5.3.8	DTM2002	115
5.3.9	SRTM	116
5.4	Análise dos modelos	118
5.4.1	SRTM	118
5.4.2	Comparação com os picos mais altos do Brasil e dos Andes	127
5.4.3	Comparação entre os modelos na região Amazônica	155
5.4.4	Comparação entre os modelos	167
5.4.5	Comparação do SRTM com pontos GPS	168
5.5	Histórico do trabalho para América do Sul	174
5.5.1	Cartas digitalizadas para a área continental	177
5.5.1.1	Comparação das cartas digitalizadas	180
5.5.2	Comparação das RNs do Brasil e da Argentina	184
5.5.3	Região Oceânica	189
5.5.3.1	Cartas náuticas brasileiras	190
5.5.3.2	Folhas de bordo	191
5.5.3.3	LEPLAC	194
5.5.3.4	Cartas náuticas da Argentina	198

5.5.3.5	Geração da malha com os dados disponíveis	200
5.5.3.6	Comparação com modelos globais	204
6	APLICAÇÕES.....	225
6.1	Introdução	225
6.2	Correção de Terreno	225
6.3	Efeito indireto	245
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	251
	REFERÊNCIAS	257
	APÊNDICE A – ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS	265
	APÊNDICE B – TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS BATIMÉTRICOS DO NÍVEL DE REDUÇÃO PARA O NÍVEL MÉDIO LOCAL.....	275
B.1	Introdução	275
B.2	Redução de sondagem na área de Paranaguá - Método da Marinha	279
B.2.1	Estudo da divisão em amplitude e fase entre as estações maregráficas	280
B.2.2	Resultado final	283
B.3	Redução de sondagem na área de Paranaguá - Primeira proposta	286
B.3.1	Resultado final	288
B.4	Redução de sondagem na área de Paranaguá - Segunda proposta	290
B.4.1	Aplicação da segunda proposta às cartas náuticas do Brasil	291
B.4.2	Segunda proposta aplicada às cartas náuticas da Argentina	312
	APÊNDICE C – PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO DAS FOLHAS DE BORDO E DAS CARTAS NÁUTICAS ARGENTINAS	319
	APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO SRTM.....	323

ANEXO A – CONCEITOS BÁSICOS DE MARÉ.....	351
A.1 Marés de sizígia e marés de quadratura	351
A.2 Alguns conceitos relacionados com marés	351