

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

DIOGO CEDDIA PORTO SILVA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ERROS EM OFFSETS
LINEARES EM ECOBATÍMETROS MULTIFEIXE**

Niterói – Rio de Janeiro

2019

DIOGO CEDDIA PORTO SILVA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE ERROS EM OFFSETS
LINEARES EM ECOBATÍMETROS MULTIFEIXE**

Projeto Final apresentado ao curso de
Graduação em Geofísica, na Universidade
Federal Fluminense, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Arthur Ayres Neto.

Coorientador: Vitor Bravo Pimentel.

Niterói – Rio de Janeiro

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P839a Porto silva, Diogo Ceddia
Análise e simulação de erros em offsets lineares em
ecobatímetros multifeixe / Diogo Ceddia Porto silva ; Arthur
Ayres Neto, orientador ; Vitor Bravo Pimentel, coorientador.
Niterói, 2019.
127 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica)-
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências,
Niterói, 2019.

1. Ecobatímetro multifeixe. 2. Erros. 3. Offsets lineares.
4. Sensores. 5. Produção intelectual. I. Ayres Neto, Arthur,
orientador. II. Bravo Pimentel, Vitor, coorientador. III.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

BANCA EXAMINADORA

Arthur Ayres Neto, PhD

Universidade Federal Fluminense – UFF

Hélio Heringer Villena, PhD

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Gilberto Dias, PhD

Universidade Federal Fluminense – UFF

Aprovado em 16/12/2019.

*Dedico esse trabalho a minha família, as pessoas que mais amo e admiro.
O suporte, compreensão e motivação recebidos desde o princípio foram meus alicerces.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à minha família por todo suporte e apoio incondicionais;

Ao meu orientador Arthur Ayres Neto por toda paciência, orientação e conhecimento acadêmico;

Ao meu coorientador Vitor Bravo Pimentel por toda disponibilidade ímpar, apoio, motivação e conhecimento;

Aos professores José Antônio Baptista Neto e Gilberto Dias, que me introduziram no mundo da geofísica marinha;

Ao LAGEMAR, que me proporcionou os primeiros contatos com essa área incrível de estudos;

E a todas as pessoas que contribuíram para minha formação em geofísica, sejam colegas de turma, de instituto, amigos e demais professores.

RESUMO

Um sonar é definido como um equipamento remoto, capaz de utilizar o som para detectar e localizar objetos. O sonar analisado neste trabalho é o ecobatímetro multifeixe, que foi desenvolvido para adquirir dados batimétricos e acústicos, a fim de realizar mapeamentos marinhos mais eficientes e precisos. Esse tipo de sonar compõe um sistema que reúne diversos sensores, e sua calibragem e alinhamento são fundamentais para obter dados batimétricos de alta qualidade. Esse ganho em eficiência possui desvantagens: quanto mais preciso são os sensores, mais difíceis são de calibrar. Visto isso, esse trabalho irá abordar o funcionamento e a acústica básica do equipamento multifeixe, para que seja possível o aprofundamento em análises simuladas de erros lineares de *offset*. As simulações serão feitas no software CARIS HIPS and SIPS versão 11.2.3, onde serão induzidos erros de posicionamento do MRU (*roll*, *pitch* e *heave*), do transdutor e do sistema de coordenadas em relação ao sistema de coordenadas da embarcação, e foi constatado que a medição da profundidade é afetada.

Palavras chave: ecobatímetro multifeixe, análise de erros, *offsets*, sensores.

ABSTRACT

A sonar is defined as a remote equipment, capable of utilizing sound to detect and localize objects. The sonar analyzed in this monography is the multibeam echo sounder, that was developed to acquire bathymetric data, in order to improve the precision and efficiency of marine mapping. This kind of sounder is compound by a system that include several sensors. It's calibration and alignment are fundamental for high quality data acquirement. This efficiency gain does not come without drawbacks: the more precise the sensors are, the hardest is to calibrate them. Therefore, this aim to understand the basic acoustic operation of the multi beam echo-sounder, to understand the errors associated to linear offset measurements. A simulation was done using software HIPS and SIPS version 11.2.3, where gradative misalignments were inputted. As a result, misalignments of the MRU (*roll, pitch e heave*), transducer and coordinate system related to de ship's coordinates were done and was verified that it influences depth measurements.

Keywords: Multibeam echo-sounder, error analysis, offsets, sensors.

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquematisação da propagação de um feixe em meios de diferentes densidades 'n'. Lei de Snell. Fonte: Knight, Randall; Física: Uma abordagem Estratégica. 2ª edição, volume 2, 2009.....	22
Figura 2 - Termoclina e haloclina dispostas em perfil que relaciona a propriedade física e a profundidade. Fonte: Jones and Barlett, Invitation to Oceanography, 2003, slide 37.....	24
Figura 3 – Esquematisação de uma sondagem multifeixe. Fonte: GSS – GEOSPACE SURVEY SERVICES, 2016.	27
Figura 4 - Esquematisação de como o multifeixe realiza o cálculo da profundidade. Fonte: Rob Hare 1995.....	29
Figura 5 - Esquematisação da largura de banda de um feixe. Fonte: OHI, 2005.	31
Figura 6 - Relação entre absorção (a), frequência e temperatura. Fonte: OHI, 2005.....	33
Figura 7 - geometria do feixe. Fonte: L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000.	36
Figura 8 - Atitude da embarcação. Fonte: PAULO e HOLMES, 2011.	37
Figura 9 - Geometria do heave induzido.....	44
Figura 10 - Calibração do offset linear along-track. Fonte: Dunnewold, 1998.	44
Figura 11 - Calibração do offset linear across-track. Fonte: Dunnewold, 1998.....	45
Figura 12 – No Estreito de Bransfield, as Ilhas Shetland do Sul. No marcador vermelho, a Baía Rei George.....	46
Figura 13 - Baía Rei George. Em vermelho, linhas de navegação da batimetria.	47
Figura 14 - Fluxograma de processamento da superfície de referência.....	48
Figura 15 - Fluxo de processamento das superfícies com erro induzido.....	49
Figura 16 - Campos configurados do arquivo de vessel.....	50
Figura 17 - Sistema de coordenadas da embarcação estabelecidos pela CARIS e utilizado no software CARIS HIPS and SIPS. Fonte: CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2.	51
Figura 18 - Superfície de referência finalizada. Escalas horizontal e vertical em metros.....	53
Figura 19 - Grau causado pela falta da correção de maré na superfície de referência.	53
Figura 20 - Posição do slice na superfície simulada, com +20m de erro em X do sistema de posicionamento. EM amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.....	54
Figura 21 - Posição do slice na superfície de referência. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.....	54
Figura 22 - Nuvem de pontos resultantes de alteração linear de offset no eixo X, de +20m.Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.	55
Figura 23 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.	56
Figura 24 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.	56
Figura 25 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.	57
Figura 26 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.	57
Figura 27 - Posição do slice na superfície de referência e na superfície com 20 metros de erro em X. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.	58
Figura 28 - Nuvem de pontos explicando o fenômeno dos degraus. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical. Em amarelo, o fundo interpretado pelo CUBE como verdadeiro.	58
Figura 29 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.	59

Figura 30 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.	60
Figura 31 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.	60
Figura 32 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.	60
Figura 33 – Estrutura em formato de depressão relativa. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.....	61
Figura 34 - Estrutura multiplicada, resultando em artefato. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.	61
Figura 35 - Nuvem de pontos evidenciando a multiplicação de estruturas, acarretada pela dupla detecção. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical. Em amarelo, o fundo interpretado pelo CUBE como verdadeiro.	61
Figura 36 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.....	62
Figura 37 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.....	63
Figura 38 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.....	63
Figura 39 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.....	63
Figura 40 - Exemplo de estrutura a ser analisada, a qual foi traçado perfil (linha azul) e analisado o subset editor (linha amarela). Escala horizontal em metros.	64
Figura 41 - Nuvem de pontos que evidencia a dupla detecção da estrutura escarpada da Figura 40. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.....	64
Figura 42 - Perfil da estrutura escarpada da Figura 40, demonstrando as diferentes detecções de fundo das superfícies com +1m (linha amarela), +10m (linha laranja) e +20m (linha vermelha) em relação à superfície de referência (linha preta).	65
Figura 43 - Superfície de referência.	66
Figura 44 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +1m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	67
Figura 45 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +10m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	67
Figura 46 – Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +20m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	68
Figura 47 – Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no sistema de posicionamento.....	69
Figura 48 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no sistema de posicionamento.....	69
Figura 49 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+20m induzidos no sistema de posicionamento.....	70
Figura 50 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X, sob mesma escala, no sistema de posicionamento.	70
Figura 51 – Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no sistema de posicionamento.....	71
Figura 52 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no sistema de posicionamento.....	72

Figura 53 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no sistema de posicionamento.....	72
Figura 54 - Em amarelo e paralelo às linhas de navegação, o slice do Subset Editor. Exemplo de estrutura com escarpa em formato de degrau. Escala horizontal em metros.	73
Figura 55 - Nuvem de pontos evidenciando dupla detecção, que ocasiona degrau na região da escarpa. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.	74
Figura 56 - Superfície de referência.	74
Figura 57 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +1m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	75
Figura 58 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +10m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	75
Figura 59 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +20m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.	76
Figura 60 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no sistema de posicionamento.	76
Figura 61 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no sistema de posicionamento.	77
Figura 62 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no sistema de posicionamento.	77
Figura 63 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no sistema de posicionamento.	78
Figura 64 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no sistema de posicionamento.....	79
Figura 65 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no sistema de posicionamento.....	79
Figura 66 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no sistema de posicionamento.....	80
Figura 67 - Exemplo de estrutura a qual foi traçado um perfil (em azul). Escala horizontal em metros.	81
Figura 68 - Perfil marcado pela Figura 67, mostrando as diferentes detecções do fundo marinho das superfícies com +1m (linha amarela), +10m (linha laranja) e +20m (linha vermelha) de erro, em relação à superfície de referência (linha preta).	81
Figura 69 - Heave induzido, em formato de swell. Em amarelo, slice do Subset Editor. À direita, superfície com 20 metros de erro induzido em X. Escala em metros.....	82
Figura 70 - Nuvem de pontos evidenciando as ondulações observadas na Figura 69. Legendas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.	82
Figura 71 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície simulada com +20m de erro em X do MRU) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.....	83
Figura 72 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no MRU.	84
Figura 73 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no MRU.	84
Figura 74 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+20m induzidos no MRU.	85
Figura 75 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+20m induzidos no MRU.	85

Figura 76 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X, sob mesma escala, no MRU.....	85
Figura 77 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no MRU.	86
Figura 78 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no MRU.	87
Figura 79 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no MRU.	87
Figura 80 - Residuais da superfície de referência subtraída da superfície com +20m de erro em Y, no posicionamento linear do MRU.	89
Figura 81 - Superfície diferença em relação ao erro no eixo X, de magnitude +20m, no MRU.....	90
Figura 82 - Superfície diferença em relação ao erro no eixo Y, de magnitude +20m, no MRU.....	90
Figura 83 - Módulo Attitude Editor plotando as curvas de roll (amarelo) e pitch (verde) simultaneamente, para um mesmo intervalo temporal.....	91
Figura 84 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no MRU.	91
Figura 85 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no MRU.	92
Figura 86 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no MRU.	92
Figura 87 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no MRU.....	93
Figura 88 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no MRU.	94
Figura 89 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no MRU.	94
Figura 90 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no MRU.	95
Figura 91 - Superfície diferença mostrando o residual da superfície com +20m de erro no eixo Z do MRU. Representação das curvas de nível da batimetria pela linha preta.	96
Figura 92 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+1m induzidos no MRU.	97
Figura 93 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+10m induzidos no MRU.	97
Figura 94 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+20m induzidos no MRU.	98
Figura 95 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Z, sob mesma escala, no MRU.....	98
Figura 96 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Z+1m de erro no MRU.	99
Figura 97 – Superfície com +20m de erro no eixo X do transdutor. Escalas horizontal e vertical em metros.	100
Figura 98 - Superfície com -20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento. Escalas horizontal e vertical em metros.	100
Figura 99 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no transdutor.....	101
Figura 100 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no transdutor.	101
Figura 101 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+m induzidos no transdutor.	102
Figura 102 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X, sob mesma escala, no transdutor.	102
Figura 103 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no transdutor.	103
Figura 104 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no transdutor.	104
Figura 105 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no transdutor.	104

Figura 106 - Superfície com +20m de erro no eixo Y do transdutor. Escalas horizontal e vertical em metros.	106
Figura 107 - Superfície com -20m de erro no eixo Y do sistema de navegação. Escalas horizontal e vertical em metros.	106
Figura 108 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no transdutor.	107
Figura 109 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no transdutor.	107
Figura 110 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no transdutor.	108
Figura 111 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no transdutor.	108
Figura 112 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no transdutor.	109
Figura 113 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no transdutor.	110
Figura 114 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no transdutor.	110
Figura 115 – Perfil que foi utilizado para avaliar erros no eixo Z.	112
Figura 116 – Perfil mostrando a superfície com +10m de erro no sistema de posicionamento (linha azul), +10m de erro no transdutor (linha vermelha) e superfície de referência (linha preta). Ambos os erros no eixo Z.	112
Figura 117 - Exemplo de linha, no Attitude Editor. Em verde, as oscilações de pitch. Em amarelo, as de Roll. No quadro superior, é evidente que o roll oscila em torno de 1 grau, enquanto o pitch oscila em torno de 0 graus. No quadro inferior, é notável que o roll se comporta de duas formas distintas: primeiramente oscilando em torno de 1 grau e, depois, oscilando em torno de 0 graus. Tal efeito é causado por alguma forçante (vento ou maré) sobre a embarcação.	116
Figura 118 – Offsets da embarcação Almirante Maximiano. Fonte: relatório de offsets medidos da embarcação Almirante Maximiano. Seapath Stb corresponde ao posicionamento do sistema de navegação. Tx e Rx são, respectivamente, o transmissor e o receptor do sinal batimétrico.	117

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
2. Objetivo.....	17
3. Revisão Bibliográfica.....	18
3.1. A Física da Propagação do Som na Água.....	18
3.2. Propriedades Físicas da Água do Mar.....	22
3.2.1. Parâmetros.....	24
3.2.2. Instrumentação.....	24
3.3. Marés.....	25
3.4. O Ecobatímetro Multifeixe.....	26
3.4.1. Sistema e Funcionamento.....	26
3.4.2. A Equação do sonar.....	32
3.5. Sensores de Movimento.....	37
3.6. Erros de Levantamento.....	39
4. Área de Estudo.....	46
5. Metodologia.....	48
6. Resultados.....	53
6.1. Superfície de referência.....	53
6.2. Simulação e Análise de Erros em <i>offsets</i> Lineares do Sistema de Navegação.....	54
6.2.1. Alteração no Eixo X do Sistema de Navegação.....	54
6.2.2. Alteração no Eixo Y do Sistema de Navegação.....	73
6.2.3. Alteração no Eixo Z do Sistema de Navegação.....	81
6.3. Simulação e análise de erros em <i>offsets</i> lineares do MRU.....	82
6.3.1. Alteração no Eixo X do MRU.....	82
6.3.2. Alteração no Eixo Y do MRU.....	89
6.3.3. Alteração no Eixo Z do MRU.....	96
6.4. Simulação e análise de erros em <i>offsets</i> lineares do Transdutor.....	100
6.4.1. Alteração no Eixo X do Transdutor.....	100
6.4.2. Alteração no Eixo Y do Transdutor.....	106
6.4.3. Alteração no Eixo Z do Transdutor.....	112

7. Discussões.....	113
7.1. Sistema de Posicionamento.....	113
7.2. MRU.....	115
7.3. Transdutor.....	117
7.4. Comparação com outros trabalhos.....	118
8. Conclusões e continuidade de pesquisa.....	119
9. Referências.....	121
10. Bibliografia consultada.....	123
11. Outras fontes.....	123
Anexo A.....	124
Anexo B.....	125
Anexo C.....	126

1) INTRODUÇÃO

Historicamente, o mapeamento marinho sempre foi utilizado para o desenvolvimento de povos e nações (Lopes et al., 2002). Seus métodos, que evoluíram do fio de prumo à batimetria multifeixe, tem como principal objetivo a segurança da navegação e todas as atividades marítimas (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000), tanto costeiras quanto oceânicas, no que tange à investigação científica, proteção ambiental, gestão de zonas costeiras, exploração e aproveitamento de recursos marinhos, delimitação de fronteiras marítimas, defesa marítima, implantação de cabos submarinos/oleodutos, construção de obras de engenharia tais como portos (Hell & Öiås, 2014; Lopes et al., 2002; Tang, Zhou, Liu, & Du, 2005) e operações navais em geral. Tais atribuições são responsabilidade do hidrógrafo, e se baseiam atualmente na coleta sistemática de dados que, devidamente adquiridos e processados, geram informações batimétricas, geológicas, maregráficas, fluviométricas, topo-geodésicas, oceanográficas e geofísicas (Ramos, 2007), em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais (OHI, 2005). A obtenção desses dados é entendida, de acordo com a Portaria nº 121/2003 do Comando da Marinha, como a execução de um Levantamento Hidrográfico, tendo finalidade científica ou não.

Para a realização das atividades é comum a utilização de sonares ativos, como sonares multifeixe, sonares monofeixe, perfiladores de subfundo e sonares de varredura lateral (Lurton, 2002). O sonar (*Sound Navigation and Raging*) multifeixe é a ferramenta fundamental para realizar levantamentos batimétricos, por possuir alta eficiência, precisão e ser capaz de varrer grandes áreas. Esse tipo de batimetria foi desenvolvido na década de 1960, pela marinha dos Estados Unidos, mas só após 1990 que sua utilização se voltou para o mercado e o mapeamento em águas rasas (Lopes et al., 2002). O ecobatímetro multifeixe possui capacidade de cobrir 100% do fundo marinho e, quando utilizado em conjunto com imagens de sonar de varredura lateral, conseguem ser ferramentas excelentes de detecção de feições e corpos marinhos. Quando propriamente operado, o desempenho da batimetria multifeixe sobrepõe a acurácia e a capacidade de cobertura do tradicional método monofeixe vertical (Godin, 1998). A utilização do multifeixe possibilitou uma navegação muito mais segura, e uma carta náutica muito mais confiável (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

O transporte marítimo, por exemplo, é responsável por mais de 80% do comércio internacional e depende de informações confiáveis de navegação e rotas. Para tal, é necessária

uma cobertura cartográfica náutica adequada e rigorosa das regiões portuárias, costeiras e adjacentes. A ausência dessas informações pode acarretar viagens mais longas, além de impedir o carregamento adequado dos navios, aumentando os custos e somando riscos. Inclusive, a Convenção SOLAS (*Safety Of Life At Sea*) considera inapto um navio de navegar caso ele não possua a bordo cartas náuticas necessárias para executar a rota definida (OHI, 2005). Para tal, dados recolhidos de levantamentos hidrográficos assumem grande importância, visto que estas ferramentas geofísicas são componentes fundamentais para a criação das cartas náuticas (Hell & Öiås, 2014; Lopes et al., 2002; Real & Ant, 2001). Estudos realizados por estados membros da OHI (Organização Hidrográfica Internacional) sugerem que a relação custo benefício dos programas hidrográficos é da ordem de 1:10, o que exalta a importância da geofísica submersa rasa. Em termos econômicos, o programa hidrográfico nacional de cada país é considerado um ‘bem público’, não servindo apenas aos interesses do mercado. Os dados gerados pelos estados membros do OHI prestam serviços a um governo central responsável, objetivando o desenvolvimento da economia nacional como um todo (OHI, 2005).

Em relação às obras de engenharia como portos, pontes e quebra-mares, os métodos acústicos – ferramenta fundamental do hidrógrafo – são capazes de estabelecer a espessura de camadas de sedimento e a profundidade da rocha matriz. Tais informações, associadas à geologia e aos parâmetros acústicos dos sedimentos, permitem a distinção de diferentes fundos marinhos (Tang et al., 2005), fornecendo informações de interesse estrutural para os engenheiros.

Neste trabalho será analisado o método de batimetria multifeixe, que é de grande utilidade e emprego no contexto descrito. Ele se baseia em mensurar profundidades, transmitindo um pulso acústico e recebendo seu ‘eco’, ou reflexão do fundo do mar (Lopes et al., 2002). Este método cria uma superfície tridimensional de alta resolução do fundo marinho, através de medições de profundidade, reunindo basicamente dados de propriedades físicas da água, maregráficos e estudos de propagação de ondas acústicas, sendo mais complexo do que o antecessor monofeixe (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Quando o método é aplicado em águas profundas (>1000m), a baixa resolução torna tolerável medições não tão precisas de profundidade e posicionamento. Em se tratando de águas rasas, onde a alta resolução é uma necessidade da navegação, dragagem e outras atividades, a calibração exata de seus sensores e do *offset* se torna essencial (Godin, 1998).

Como o avanço tecnológico dos componentes do sistema, os multifeixes tornaram-se bem precisos (Cronin, Broadus, Reed, Office, & Space, 2000; Lopes et al., 2002), com os erros de integração e calibração do sistema assumindo maior importância. Quanto maior a resolução, mais difícil é calibrar os instrumentos (Godin, 1998). Para tal, é necessária a compreensão de erros associados aos levantamentos em si (Hughes Clarke, 2003). A análise e definição desses erros, principalmente no que tange aos erros lineares de *offset*, será estudada, simulada e comparada.

2) OBJETIVO

Conforme introduzido no capítulo anterior, neste trabalho serão abordados erros de calibração linear dos *offsets* da embarcação. Durante a montagem de um sistema multifeixe é necessário conhecer os *offsets* de montagem do equipamento, a fim de posicionar corretamente os feixes. Portanto, para compreender melhor a natureza destes erros, serão feitas simulações utilizando o software CARIS HIPS and SIPS, nas magnitudes de +1, +10 e +20 metros de erro em cada eixo (X, Y e Z) de cada sensor – Transdutor, MRU e Sistema de Posicionamento – em relação ao sistema de coordenadas da embarcação. Serão procedidas, também, análises comparativas: tridimensional, através das superfícies simuladas; bidimensional, através de perfis criados; estatísticas, através de histogramas e residuais; e superfícies diferença (superfície de referência reduzida da superfície simulada). Todas serão analisadas segundo uma progressão da magnitude do erro. Por fim, serão comparados o resultado e análise com outros autores.

3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1) A FÍSICA DA PROPAGAÇÃO DO SOM NA ÁGUA

É claro para todos que, ao mergulhar em um rio, lago ou mar, é possível escutar sons. Muitos animais, como por exemplo os cetáceos, utilizam o som para se comunicar por grandes distâncias, de até centenas de quilômetros (Hansen, 2014). Os equipamentos capazes de utilizar esse princípio acústico são chamados sonares, que permitem um sensoriamento remoto das atividades marinhas até determinada distância (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Para compreender os sonares, é necessário entender como o som se propaga na água. Sendo uma onda mecânica, sua propagação ocorre através de compressões paralelas em relação ao movimento da mesma (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000). É classificada como uma onda ‘P’ ou compressional, pois se move comprimindo o material na frente de onda e dilatando-o com seu passar. A água é um meio elástico, ou seja, a densidade do meio varia de acordo com a pressão. A onda P também pode ser definida como uma sucessão de compressões de frente de onda, que é definida genericamente como:

$$v = \lambda * f$$

Onde: v é a velocidade da onda em metros por segundo, λ é o comprimento da onda em metros e f é a frequência, em hertz. O período T da onda é definido como o inverso da frequência. A frequência é uma propriedade da fonte, invariável. Já o comprimento de onda varia de acordo com o meio o qual a onda percorre, alterando assim sua velocidade de propagação. A velocidade média do som na água é em torno de 1500m/s, podendo variar de acordo com os itens explicados na sessão 3.2 (propriedades físicas da água do mar – parâmetros). O tamanho da oscilação (tamanho da onda medido perpendicularmente) é sua amplitude, grandeza ligada diretamente à quantidade de energia acústica que ela carrega. Quanto maior a amplitude, maior a energia, que pode ser mensurada utilizando um hidrofone, através da medição da pressão de frente de onda acústica (OHI, 2005).

Conforme a onda sonora se propaga na água, as suas frentes de pressão não transferem energia para as moléculas seguintes de forma 100% eficiente, em processos conhecidos como

atenuação e dispersão, eventualmente se convertendo em calor. Isto ocorre devido a principalmente:

- 1) Comportamento elástico de algumas moléculas de sal, geralmente o sulfato de magnésio e o ácido bórico (Fisher & Simmons, 1977). Essa propriedade varia de acordo com a frequência utilizada, a velocidade de propagação na água e a natureza química de cada sal;
- 2) Parte da energia é usada para interações entre moléculas de associação ou dissociação (OHI, 2005);
- 3) Dispersão do sinal por bolhas de ar presentes na coluna d'água, onde cada bolha se comporta como uma heterogeneidade no meio. A presença das bolhas está mais associada à interação entre a embarcação e o mar, ao ambiente mais próximo da zona de costa e aos mares mais agitados. Entretanto também podem ser formados por chuva, processos biológicos e químicos (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000);
- 4) Cada pulso se propaga de forma esférica, podendo ser dissecado em ângulos sólidos, cada um portando determinada energia acústica definida pela fonte. Conforme o pulso se afasta da fonte, a área de cada ângulo sólido aumenta, diminuindo a quantidade de energia por unidade de área da onda. Tal processo é denominado Espalhamento Esférico (OHI, 2005);
- 5) Dispersão, causada por partículas na coluna d'água, como sedimentos em suspensão e a vida marinha. Nesse último caso, existe uma camada de plâncton, chamada DSL (*deep scattering layer*), que dispersa significativamente os raios e varia de profundidade ao longo do dia (OHI, 2005).

Todos esses fenômenos causam a perda da energia acústica, reduzindo a amplitude da onda. O conjunto desses efeitos é chamado de atenuação. A vantagem de utilizar ondas sonoras para investigação marinha (e não ondas de luz ou rádio) é a possibilidade de trabalhar com frequências mais baixas, que permitem uma maior penetração na coluna d'água devido à baixa atenuação (menor frequência, menores efeitos de atenuação). Por exemplo, um sonar operando com uma fonte de 12kHz perde cerca de metade de sua energia acústica ao percorrer aproximadamente 3000 metros (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Mais especificadamente, a velocidade da onda 'P' ou compressional é definida como:

$$V_p = \sqrt{\frac{\Psi}{\rho}},$$

Onde Ψ é o módulo elástico apropriado do material e ρ é a densidade do material, que no caso é a água (Geofísica de Exploração, 2009) Além disso, definimos o módulo elástico como:

$$\Psi = K + \frac{4}{3} * \mu ,$$

Onde K é o módulo volumétrico e μ é o módulo de cisalhamento ou rigidez (segundo parâmetro de Lamé). Entretanto, a água apresenta módulo de cisalhamento igual a zero, por ser um fluido. Dessa forma temos que, em se tratando da propagação da onda P na água,

$$V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}} .$$

O módulo volumétrico K descreve a elasticidade volumétrica, ou seja, o quanto um material se deforma volumetricamente quando submetido à uma força em todas as direções (hidrostaticamente). É a razão entre tensão volumétrica e deformação volumétrica, e é também o inverso da compressibilidade, medindo então a resistência que um material possui à compressão. Embora a densidade do meio seja inversamente proporcional à velocidade, conforme a densidade aumenta o material se torna mais resistente à compressão – ou seja, o módulo volumétrico aumenta. Portanto, o K aumenta ou diminui mais rapidamente que ρ . Dessa forma, temos que quanto maior a ρ , maior o K e maior a V_p (Geofísica de Exploração, 2009).

Quando a onda se desloca no meio marinho, ela se choca com diferentes meios: variações de densidade na própria coluna d'água, topo da coluna d'água, o fundo oceânico e partículas em suspensão (sedimentos, vida marinha, etc).Essas interações são contrastes entre dois meios distintos (descontinuidade de impedâncias)(Hansen, 2014), com velocidades de propagação diferentes, podendo sofrer reflexão e/ou refração, conforme a Lei de Snell. O fenômeno da refração é a mudança da direção de propagação como resultado da variação da velocidade da onda, ao passar para um meio de diferente densidade. Quanto maior a densidade, maior a velocidade de propagação da onda no meio. Em incidências normais, não ocorre refração.

O coeficiente de reflexão \mathfrak{R} de uma onda acústica define o quanto de uma onda é refletida, quando há uma descontinuidade de impedância entre dois meios:

$$\mathfrak{R} = \frac{P_R}{P_I} = \frac{\rho_2 * c_2 - \rho_1 * c_1}{\rho_2 * c_2 + \rho_1 * c_1}$$

Onde P_R é a amplitude de pressão da onda refletida, P_I é a amplitude de pressão da onda incidente, c_1 é a velocidade de propagação do som no meio 1, c_2 é a velocidade de propagação no meio 2, ρ_1 é a densidade do meio 1 e ρ_2 é a densidade do meio 2. A amplitude de pressão de uma onda é a variação da pressão em um meio que a onda se propaga. A razão $\frac{P_R}{P_I}$ depende, principalmente, do tipo de fundo, do ângulo de incidência, da frequência acústica e das diferenças das impedâncias acústicas do meio (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000; OHI, 2005).

A impedância acústica é a resistência que um material ou meio impõe à propagação de uma onda mecânica. Considerando uma onda plana, temos que a impedância Z é definida como a razão entre a densidade do meio e a velocidade de propagação do som no mesmo:

$$Z = \rho * c$$

Sempre que um sinal acústico atinge uma interface que separa dois meios distintos fisicamente, parte da energia reflete e parte é transmitida para o segundo meio, refratando. Quando uma onda acústica toca o topo da coluna d'água ou o fundo marinho, ocorre uma mudança abrupta dos meios. O contraste de impedância é tão alto que a maior parte da energia é refletida (Lurton, 2002). Em se tratando do deslocamento de uma onda mecânica na água entre dois meios de diferentes densidades, é a impedância acústica que define a quantidade de energia transmitida e refletida:

$$A_{R1} = \frac{\frac{Z_1}{Z_2} - 1}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} * A_1$$

$$A_{T2} = \frac{2}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} * A_1$$

Onde A_{R1} é a amplitude do sinal refletido para o meio 1, A_{T2} é a amplitude do sinal transmitido para o meio 2, A_1 é a amplitude da onda de chegada, Z_1 é a impedância do meio 1 e Z_2 é a impedância do meio 2. Podemos estabelecer também o coeficiente de reflexão \mathfrak{R} para todos os ângulos de incidência θ_i em função de uma relação de impedâncias Z_1 e Z_2 (Ayres, 2016):

$$\mathfrak{R} = \frac{\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \sqrt{1 - \left(\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 - 1\right) * \tan^2 \theta_i}}{\left(\frac{z_2}{z_1}\right) + \sqrt{1 - \left(\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 - 1\right) * \tan^2 \theta_i}}$$

3.2) PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA DO MAR

A variável mais importante na sísmica rasa é a velocidade do som. Sua distribuição no oceano influencia todos os outros fenômenos acústicos, sendo determinada pela densidade da água – que varia de acordo com a temperatura, salinidade e pressão no meio (Etter, 2003). Para realizar uma sondagem, é necessário um conhecimento preciso da velocidade de propagação da onda acústica na água (Lopes et al., 2002). Em sistemas monofeixe, onde a propagação ocorre idealmente de forma vertical, é suficiente estabelecer um valor médio para a velocidade de propagação na água. Entretanto, equipamentos multifeixe emitem feixes oblíquos, que estão sujeitos à refração devido às camadas na coluna d'água com diferentes propriedades físicas (OHI, 2005).

O trajeto de um raio oblíquo na água costuma ser tortuoso, pois refrata em camadas de diferentes densidades, de acordo com a Lei de Snell (Figura 1):

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{C_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{C_2}$$

Onde: θ_1 corresponde ao ângulo de incidência; θ_2 ao ângulo de refração; C_1 à velocidade do som na primeira camada; C_2 à velocidade do som na segunda camada. A densidade está sujeita à alguns parâmetros, analisados a seguir.

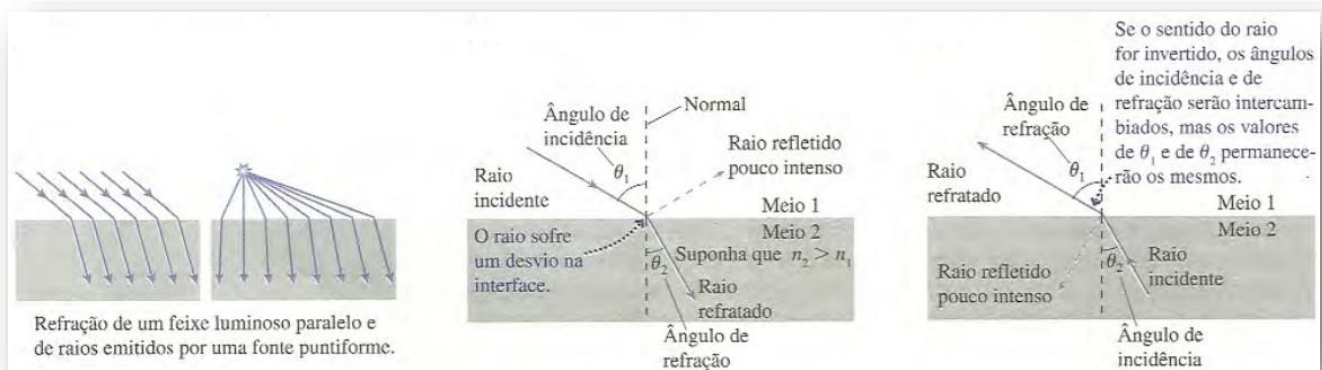


Figura 1 - Esquematização da propagação de um feixe em meios de diferentes densidades 'n'. Lei de Snell. Fonte: Knight, Randall; Física: Uma abordagem Estratégica. 2ª edição, volume 2, 2009.

3.2.1) Parâmetros

- Temperatura

Corresponde ao grau de agitação das moléculas que, quando menos agitadas (menor temperatura) ficam mais próximas, propagando mais rapidamente ondas acústicas. A temperatura na água varia de acordo com as estações do ano, a posição geográfica, a hora do dia (Pickard e Emery, 1990) e a profundidade. O aumento da profundidade acarreta uma diminuição complexa e dinâmica da temperatura, principalmente na região da termoclina. Esta é um intervalo de profundidade onde a temperatura varia bruscamente por unidade de profundidade. Essa região é mais comum em baixas latitudes, pela influência do aquecimento superficial da água. A variação da temperatura é a componente mais relevante para a determinação da velocidade da água até o limite inferior da termoclina (Figura 2) (OHI, 2005; Ramos, 2007).

A velocidade de propagação do som na água é muito afetada pela temperatura, visto que a variação de 1 grau Celsius gera aproximadamente uma diferença de 4,5m/s. Esse erro acontecendo em uma camada de 50m de espessura, resultaria em uma medição de profundidade apresentando aproximadamente 15cm de erro (OHI, 2005).

- Salinidade

Mensura a quantidade de sais dissolvidos na água, em partes por milhão. A salinidade padrão do mar é em torno de 35‰, e uma variação de 1‰ na salinidade acarreta em uma variação de 1,3m/s na velocidade de propagação do som (OHI, 2005). A salinidade não é mensurada diretamente, mas sim estimada. Seu valor costuma ser estimado através de estações CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*), através da condutividade elétrica, temperatura e profundidade.

Assim como a termoclina, existe também uma camada que é marcada por um elevado gradiente vertical de salinidade: a haloclina (Figura 2). Esta situa-se entre massas de água com diferentes salinidades, comum por exemplo em ambientes estuarinos, podendo portanto possuir comportamento mais dinâmico na foz de rios (Ramos, 2007).

- Pressão

É a força exercida em todas as direções a um corpo ou partícula. Após a termoclina, a pressão é a variável mais relevante para a determinação da velocidade de propagação do som

na água. Ela aumenta em 1.6 m/s a cada 10 ATM, que correspondem a aproximadamente 100 metros de profundidade. Em grandes profundidades, a pressão possui grande influência (OHI, 2005).

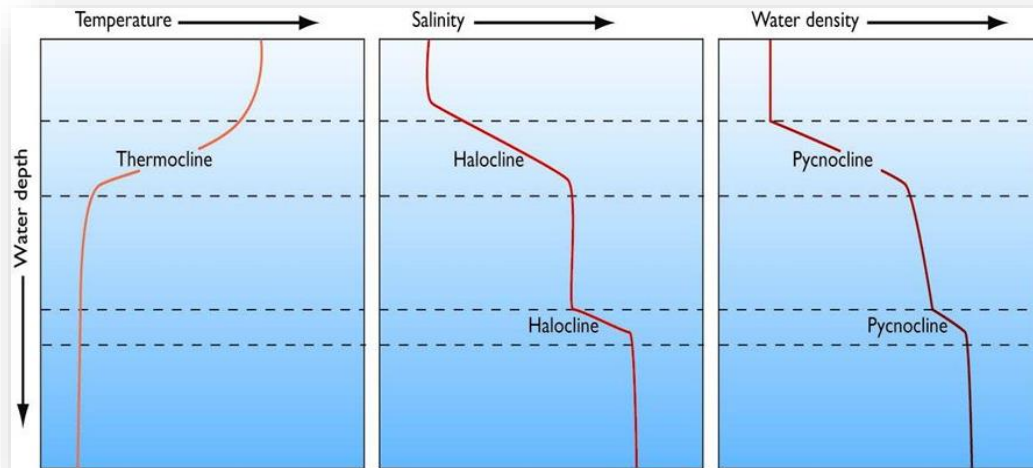


Figura 2 - Termoclina e haloclina dispostas em perfil que relaciona a propriedade física e a profundidade. Fonte: Jones and Barlett, *Invitation to Oceanography*, 2003, slide 37.

3.2.3) Instrumentação

Para definir a estratigrafia da coluna d'água, calcular as refrações e estabelecer corretamente o trajeto de cada feixe, é comum a utilização de um SVP (*Sound Velocity Profile*). O equipamento necessita ser calibrado para a pressão atmosférica ambiente, para então ser colocado na água, a fim de se estabilizar na temperatura ambiente (em torno de 15 minutos) e ser lançado, preferencialmente em velocidade constante, até o fundo. Ele possui um par de emissor e receptor separados em uma distância definida d , de forma que a velocidade do som naquele espaço é medida repetidamente. Este dado é associado com a informação de profundidade medida por um sensor de pressão embutido no perfilador de velocidade do som (OHI, 2005). Dessa forma, é gerado um gráfico com toda variação de velocidade de propagação do som na água, em função da profundidade, de acordo com a equação

$$c = 2 * d \div \Delta t$$

Outro equipamento que possibilita o cálculo da velocidade das camadas da coluna d'água é o CTD (acrônimo para *conductivity, temperature e depth*), que possui sensores de condutividade, temperatura e pressão. Com essas informações é possível, de forma empírica, calcular a velocidade de propagação do som na água. Existem diversas equações para a

resolução da velocidade como, por exemplo, a equação de Coppens (Coppens, A. B., 1981; OHI, 2005):

$$C(Z, T, S) = 1449,05 + T * (4,57 - T * (0,0521 - 0,00023 * T)) + \\ + (1,333 - T * (0,0126 - 0,00009 * T))(S - 35) + \Delta Z,$$

Onde T é a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), S é a salinidade em partes por milhão (ppm), Z é a profundidade em quilômetros, e ΔZ seu erro associado, estabelecido como:

$$\Delta Z \approx 16,3 * [Z * (1 - 0,0026 * \cos(2\phi))] + 0,18 * [Z * (1 - 0,0026 * \cos(2\phi))]^2,$$

Onde ϕ corresponde à latitude do levantamento.

3.3) MARÉS

A batimetria, uma ferramenta hidrográfica, é o somatório de medições de profundidade. Para estabelecer o nível médio do mar, é necessário conhecer as oscilações maregráficas na região (Ramos, 2007). O nível do mar instantâneo é resultado da soma de 3 fatores: o nível do mar médio naquela região, a influência maregráfica e fatores meteorológicos. A maré é uma resposta gravitacional relativa às posições do sol e da lua, que alteram o nível d'água de forma cíclica. São consideradas ondas, por possuírem variações periódicas, amplitude, período (Tom Garrison, 2006). Fatores climáticos como vento, pressão atmosférica e temperatura atuam na superfície dos mares, gerando alterações irregulares e locais. Já o nível médio do mar é estabelecido como uma média das oscilações pelo período de no mínimo um ano (Ramos, 2007). Para estabelecer o nível de maré em um local, são utilizados marégrafos. Seus principais tipos são (IOC, 1985):

- Acústicos, que possuem precisão de 0,3 a 2cm;
- Pressão, que chegam a ter precisão de 0,02% da coluna d'água;
- Flutuador, que possui precisão de 1 a 10 cm;
- Radar (*Radio Detection and Ranging*), que chega a ter menos de 1 cm de precisão.

Quando um levantamento hidrográfico é realizado, é necessário corrigir a diferença de altura da coluna d'água, relativa à maré. Para tal, é aplicada a equação (Ramos, 2007):

$$P_r = P_m(t) + D_m(t) - T_1(t)$$

Onde P_r é a profundidade reduzida, ou seja, excluindo os efeitos de maré; $P_m(t)$ é a profundidade medida, no instante t ; $D_m(t)$ é a profundidade do transdutor no instante t ; e $T_1(t)$, que é a correção da maré no instante t .

É comum, nos levantamentos hidrográficos, a área de levantamento ser grande o suficiente para conter mais de um nível de redução (NR). Entende-se por nível de redução um plano de referência que constitui a origem de contagem das profundidades e das alturas de maré. Para evitar com que haja 'degraus' entre zonas de diferentes NR, é feita uma subdivisão entre as áreas, chamado de zoneamento de maré, a fim de extrapolar e interpolar dados de maré relativo à um ou mais marégrafos na costa (Ramos, 2007).

3.4) O ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

3.4.1) Sistema e Funcionamento

Um SONAR (*Sound Navigation and Ranging*) é definido como um equipamento remoto, capaz de utilizar o som para detectar e localizar objetos (Gagg, 2016). Quando é necessária a busca total do fundo, o ecobatímetro multifeixe é o sonar mais adequado (OHI, 2005). O ecobatímetro multifeixe, que será abordado neste trabalho, configura um sonar ativo, e é um equipamento instalado em embarcações, capaz de adquirir grande volume de medições de profundidade. Como uma evolução do tradicional monofeixe, o multifeixe emite feixes oblíquos, com espaçamento de frações de graus entre si e aberturas superiores à 100 graus (Lopes et al., 2002), perpendiculares à embarcação, em formato de leque (Figura 3) (Godin, 1998). As vantagens do equipamento e a cobertura completa do fundo marinho, apresentando rendimento muito superior ao monofeixe. Cada feixe é precisamente definido em relação à

largura da banda, e dirige sua energia acústica em formato cônico. Também é conhecido como MBES (*MultiBeam Echo-sounding System*), que é um sistema composto por:

- Transdutor, que é uma célula piezoelétrica responsável pela emissão e recepção dos feixes acústicos. Converte o dado acústico em corrente elétrica, e vice-versa;
- *Transciever*, que controla o sinal emitido e recebido pelo transdutor;
- Unidade de integração e controle, que reúne e integra os dados de profundidade com os dados dos sensores auxiliares;

Esse sistema possui um conjunto de sensores auxiliares, que desempenham o papel de corrigir e posicionar as informações de profundidade (Hughes Clarke, 2003; L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000; OHI, 2005; Ramos, 2007). São eles:

- Sistema inercial, que controla os movimentos da embarcação;
- Sensor de velocidade do som, podendo ser um SVP (*Sound Velocity Profiler*) ou um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*);
- Sistemas de posicionamento, composto por GPS/DGPS;
- Sensor de cálculo do azimute da antena de posicionamento (*heading*);
- Sensor de velocidade do som da face do transdutor.

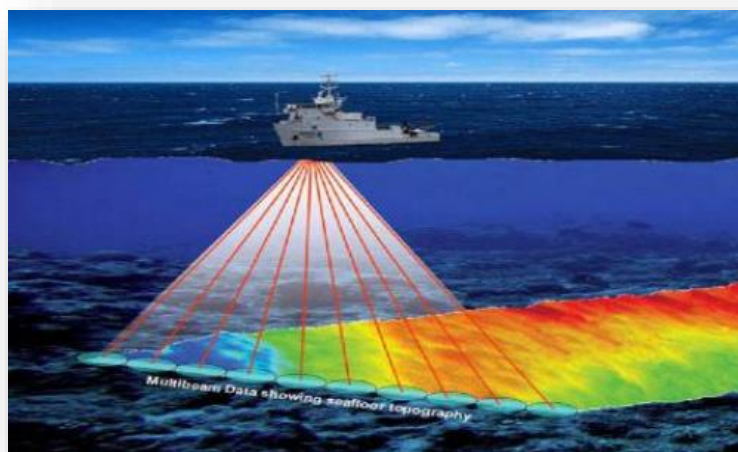


Figura 3 – Esquematização de uma sondagem multifeixe. Fonte: GSS – GEOSPACE SURVEY SERVICES, 2016.

O dado batimétrico bruto é a sucessão de registros de medições (*pings*) integrados com informações da profundidade, dada pelo transdutor e controlada pelo transreceptor; e das coordenadas de cada *ping* via GPS/DGPS (Krueger, 1999). O processamento básico do dado envolve a correção da medição de profundidade (SVC – *Sound Velocity Correction*) via SVP/CTD e sensor de velocidade do som na face do transdutor; e a correção de atitude via MRU (*Motion Reference Unit*) e sensor de cálculo de azimute da antena de posicionamento (*heading*). Cada *ping* possui um ângulo de incidência no assoalho oceânico, e sua localização depende da rota complexa que o feixe realiza na coluna d'água e da movimentação da embarcação. O SVC corrige a rota do feixe na coluna d'água, e o MRU e os sensores de *heading* e de variação azimutal da embarcação (*yaw*) corrigem os efeitos de balanço da embarcação. Dessa forma se torna possível a associação da coordenada de GPS/DGPS com a respectiva posição real do *ping* no fundo marinho (Gagg, 2016). Além disso, o dado batimétrico bruto traz consigo a informação da intensidade da energia acústica de retorno de cada *ping*. Essa intensidade de retorno (*Backscatter*) depende principalmente das propriedades refletivas do fundo, como será exposto na seção 3.4.2.

Um ecobatímetro multifeixe pode ser classificado quanto à instalação (OHI, 2005), podendo ser:

- Montado no casco;
- Bolha (*Blister*), onde o transdutor é montado em uma estrutura em formato de casco, para reduzir o efeito do fluxo d'água no transdutor;
- Gôndola, onde o transdutor é instalado em uma estrutura no formato de gôndola, sendo utilizado em sondagens mais profundas, objetivando o maior distanciamento entre o casco da embarcação (fonte de ruídos) e o transdutor;
- Rebocado;
- Portátil, que é de melhor utilização em fundos muito rasos.

Um ecobatímetro multifeixe tem como principais parâmetros (OHI, 2005):

- Potência, que determina a quantidade de energia emitida pelo transdutor. A potência deve ser mantida baixa, para evitar níveis elevados de reverberação. A profundidade de funcionamento de um ecobatímetro multifeixe depende da frequência utilizada, da duração do impulso e da potência transmitida. Além disso, a potência máxima é limitada pelo fenômeno chamado de cavitação. A cavitação ocorre quando a pressão acústica

direcionada para o oceano se aproxima da pressão hidrostática. O resultado desse fenômeno é o surgimento de bolhas de ar próximas ao transdutor;

- Ganho, que configura a amplificação do sinal e, conseqüentemente, do ruído. Existem diversos métodos matemáticos para a amplificação do ganho, que devem ser ajustados de acordo com a potência do equipamento.;
- Intensidade do registro, que é resultado direto da potência da fonte, da rugosidade do fundo, do ângulo de incidência do feixe (Coppens, 1976; Tang et al., 2005) e do contraste de impedância;
- Comprimento do pulso, que é definido de acordo com a profundidade. Para aumentar a resolução vertical (ideal para áreas rasas), é necessário que se diminua o comprimento do pulso;
- *Draft*, que é a distância do equipamento em relação ao fundo marinho;
- Velocidade de propagação do som na água.

Os ecobatímetros emitem um curto pulso sonoro, ou *ping*, e recebe seu retorno. O tempo de emissão e recepção é medido, chamado de *two way travel time*, ou ‘tempo duplo de viagem’ (TWTT). O TWTT mede o tempo de ida e vinda do sinal. A velocidade do som na água é mensurada, utilizando o princípio descrito na seção 3.2.3. Tendo o tempo de trânsito e a velocidade de propagação no meio, é possível adquirir a distância da embarcação ao fundo (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000; Lopes et al., 2002). Na prática, o transdutor não se situa no nível d’água, mas sim submerso. Então, é necessária a correção da distância *d* (*draft*) (Figura 4) entre a coluna d’água e o transdutor – o ‘calado do transdutor’ ou *Waterline Height*, segundo o CARIS HIPS and SIPS (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, 2019). Dessa forma, temos que:

$$\text{Profundidade} = \left(\text{velocidade} * \frac{1}{2} * \text{TWTT} \right) + d$$

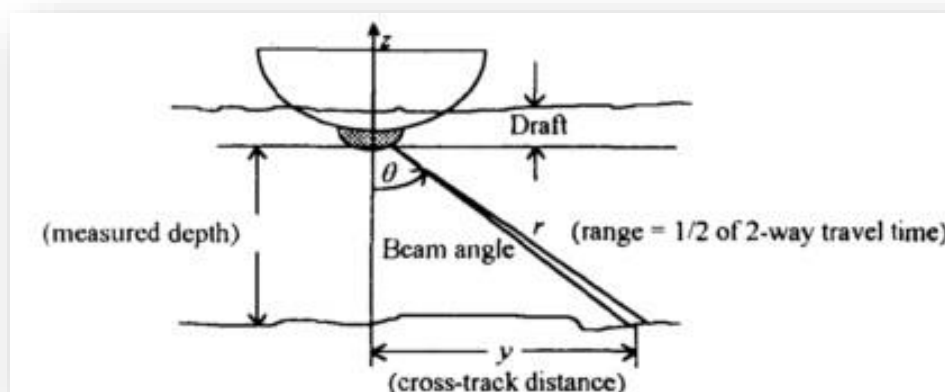


Figura 4 - Esquemática de como o multifeixe realiza o cálculo da profundidade. Fonte: Rob Hare 1995.

É importante ressaltar que os feixes são submetidos à uma complexa estratigrafia da coluna d'água, sofrendo desvios. Para estabelecer a profundidade, é feito um cálculo de correção pela média geométrica da velocidade do som entre as camadas (Hare, 1995).

Para cada *ping*, diversos dados de profundidade são coletados (Hare, 1995). É importante então ressaltar que a batimetria multifeixe cria uma malha, com determinada densidade de dados. O equipamento opera com disparos em intervalos definidos, e a velocidade da embarcação é fundamental para definir a densidade da malha de dados e a qualidade do levantamento. Portanto, existe um intervalo mínimo temporal entre os disparos (*TA*), que preserva aproximadamente uma densidade mínima de dados para o levantamento, em função da velocidade da embarcação (OHI, 2005):

$$TA = \left(\frac{P}{V}\right) * \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Onde *P* é a profundidade, *V* é a velocidade da embarcação e ϕ é o ângulo entre os feixes. O *TA* é dado em milissegundos, e representa o tempo mínimo recomendado entre cada disparo. Ou seja: quanto maior a velocidade da embarcação, menor é o *TA* e maior é a quantidade de disparos por unidade de tempo.

Para que um ecobatímetro envie um pulso de forma precisa, controlada e repetitiva, são utilizadas células piezoelétricas para emissão e recepção do som. Esta célula de cerâmica, quando excitada através de uma corrente elétrica, sofre uma alteração de tamanho imediata, gerando oscilações– ondas mecânicas. De forma reversa, o som recebido através de suas frentes de pressão altera a condição da célula, fazendo-a gerar uma voltagem de retorno. A célula piezoelétrica é componente principal do transdutor, e suas dimensões definem a área superficial de transmissão e recepção do sinal (OHI, 2005).

Para estabelecer a direção de propagação de um *ping* de um sonar, é necessário que o tamanho da célula piezoelétrica seja muito maior que seu comprimento de onda λ . A relação de diretividade de cada feixe é a razão $\frac{\lambda}{D}$, onde *D* é o diâmetro do transdutor em graus. Assim, torna-se compreensível que, para levantamentos rasos de alta resolução, é necessário uma frequência (*f*) muito elevada, para que se abaixe muito o comprimento de onda ($v = \lambda * f$), diminuindo a relação $\frac{\lambda}{D}$ e tornando o sinal mais diretivo (Hansen, 2014).

Como mencionado anteriormente, toda onda possui uma frequência – propriedade inerente da fonte. Esse parâmetro determina o alcance e penetração do sinal nos sedimentos,

devido à atenuação ser proporcional à frequência. Quanto maior a frequência, mais elevada será a atenuação e, por tanto, menor o alcance e penetração das ondas acústicas no subfundo. Em se tratando de reflexão no fundo oceânico para obter dados de profundidade, uma lama menos densa no fundo poderia se comportar como refletor ou não, dependendo da frequência utilizada. Poderia, portanto, mascarar o real dado de profundidade. Para profundidades inferiores à 100 metros, por exemplo, utilizam-se normalmente frequências superiores à 200kHz nos ecobatímetros multifeixe (OHI, 2005).

Cada feixe possui uma largura, que depende da dimensão do transdutor e da frequência acústica utilizada. Se considerarmos f_0 a frequência de ressonância (potência máxima de sinal transmitido), f_1 , f_2 as frequências correspondentes à metade de f_0 , então a largura da banda é definida por $B_w = f_2 - f_1$ (Figura 5) (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

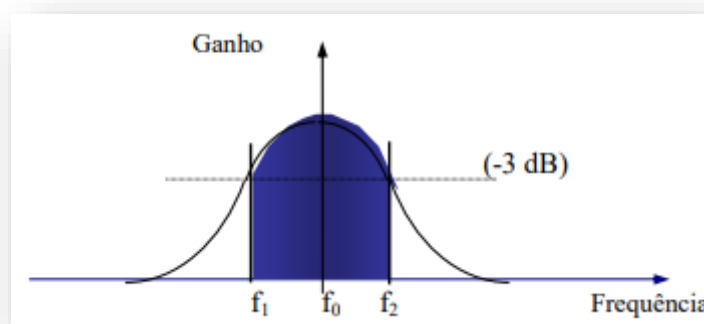


Figura 5 - Esquemática da largura de banda de um feixe. Fonte: OHI, 2005.

Para otimizar a potência transmitida, f_1 e f_2 devem possuir valores mais próximos possíveis da frequência de ressonância, tendo assim uma largura de banda pequena (OHI, 2005).

Um importante fator, citado anteriormente, que define a qualidade do sinal, é o comprimento ou duração do impulso (τ), que determina a quantidade de energia transmitida para o meio. Quanto maior o comprimento do pulso, mais energia é direcionada para o alvo e, conseqüentemente, o alcance do ecobatímetro multifeixe será maior. A desvantagem de um impulso maior é a diminuição da resolução vertical de estruturas próximas. Uma relação que define a boa discriminação do eco em relação a sinais externos (relação sinal ruído) é (Hansen, 2014):

$$B_w \geq \frac{1}{\tau}$$

3.4.2) A Equação do Sonar

A equação do sonar mede a eficiência e performance que um sonar possui, representada por *EE* (*Echo Excess*), onde todas as medidas são feitas em decibéis. Essa equação estima a intensidade do eco de retorno no transdutor ou hidrofone (Etter, 2003). A equação do sonar também é uma ferramenta que quantifica a relação sinal ruído do sonar (Ainslie & Morfey, 2005). Um decibel (dB) é uma grandeza adimensional, feita para medir níveis de intensidades sonoras a partir de valores de referência. Casualmente, pode ser considerada como uma unidade de ‘volume’. É definida como:

$$\beta = (10dB) * \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ ou } \beta = (10dB) * \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right),$$

Onde I é a intensidade medida e I_0 a intensidade de referência. Analogamente, a mesma razão pode ser feita com a potência P medida e a potência de referência P_0 .

Caso I seja igual à I_0 , $\beta = (10dB) * \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_0} \right) = 10 * \log_{10}(1) = 0 \text{ dB}$. Dessa forma, é possível obter números negativos de decibéis, quando $I < I_0$.

A equação do sonar é descrita como (OHI, 2005):

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI) + BS - DT,$$

Onde:

- *SL* (*Source Level*): Corresponde ao ‘nível de transmissão’, que é a intensidade do sinal acústico gerado pela fonte transmissora. É definido como:

$$SL = 10 * \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_{REF}} \right)$$

Onde I_1 é a intensidade da onda plana do sinal acústico da fonte, e I_{REF} corresponde à intensidade de referência. Ambas 1 metro do transmissor, no eixo acústico de transmissão.

- *TL* (*Transmission Loss/Perda de Transmissão*): Existem duas formas de perda de transmissão:

- a) Espalhamento esférico: é a perda de intensidade acústica, proporcional ao quadrado da distância da fonte. O pulso acústico, ao ser emitido, se propaga de forma esférica e em todas as direções. Conforme a onda se afasta da fonte, a esfera aumenta, reduzindo a quantidade de energia acústica em relação à área (Coppens, 1976);
- b) Absorção de energia pelo meio: perda de energia acústica causada pelo relaxamento de moléculas de sal, variando de acordo com a temperatura e a frequência (Fisher & Simmons, 1977); e pela perda de associação e dissociação de moléculas na coluna d'água.

O TL está multiplicado por 2 na equação do sonar, por causa do trajeto de ida e volta do sinal (TWTT).

A intensidade (I) é definida como $I = \frac{P}{A}$, onde P é a potência da fonte e A é a área da frente de onda. Conforme a onda se espalha, a área aumenta, reduzindo assim a intensidade, enquanto a potência inicial pode ser absorvida e espalhada parcialmente pelo meio. As perdas de transmissão são dadas por:

$$TL = 20 * \log_{10}(r + ar)$$

Onde r é a distância da fonte e a é o coeficiente de absorção, que varia de acordo com a frequência da fonte e a temperatura. Como pode ser observado na Figura 6, a partir de 100 kHz a temperatura se torna variável fundamental para a determinação do coeficiente de absorção (OHI, 2005).

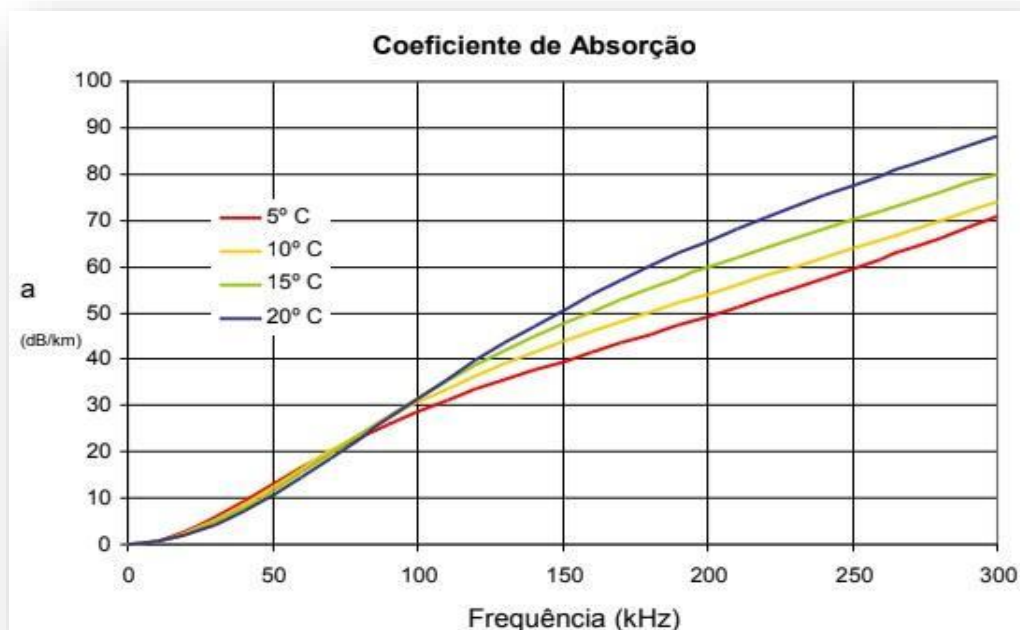


Figura 6 - Relação entre absorção (a), frequência e temperatura. Fonte: OHI, 2005

A *Transmission Loss* também pode ser medida diretamente, como:

$$TL = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{Intensidade do sinal à 1m da fonte}}{\text{Intensidade do sinal no alvo}} \right)$$

• NL (*Noise Level*): Varia de acordo com o espectro do nível de ruído no ambiente (N_0 , em decibéis) e com a largura de banda (w) do transdutor. O NL é medido omnidirecionalmente. O ruído ambiente pode ser gerado por qualquer fonte, como tráfego marítimo, ondas marinhas, outras atividades sísmicas da própria vida marinha e até pelos componentes eletrônicos do próprio sistema do sonar. O nível de ruído estabelece o alcance máximo de um sonar, pois em distâncias muito grandes as perdas de transmissão tornam o sinal de retorno fraco, na mesma intensidade dos ruídos. Assim, o sinal de interesse se torna cada vez indistinguível do ruído, limitando a eficiência do método (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000). O NL é definido como:

$$NL = N_0 + 10 * \log_{10}(w)$$

• DI (*Directivity Index*): A propagação acústica, como dito anteriormente, ocorre de forma esférica. Mesmo com o transdutor emitindo energia nas direções de interesse, parte dessa energia é espalhada omnidirecionalmente, sem nenhum valor para a obtenção do dado de profundidade. O índice de diretividade mede quanto dessa energia está sob a área efetiva de propagação, a qual vai realmente fornecer o dado de batimetria desejado. Logo, o DI é medido como:

$$DI = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{intensidade no eixo acústico de propagação } (I)}{\text{intensidade omnidirecional } (I_0)} \right)$$

Onde as intensidades são medidas na mesma distância e com a mesma potência de fonte. A intensidade é a razão da potência sobre a área, logo:

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{\frac{P}{A}}{\frac{P}{A_0}} \right) = \left(\frac{A_0}{A} \right),$$

Onde A_0 corresponde à área total de superfície da esfera relativa à propagação da onda, e A corresponde à área do ângulo sólido (S) de interesse acústico. Dessa forma, temos que:

$$DI = 10 * \log_{10}\left(\frac{4\pi R^2}{S}\right)$$

Na equação do sonar, o termo $-(NL - DI)$ merece atenção. O NL mede, como dito anteriormente, a intensidade do ruído omnidirecionalmente. Quando se subtrai o DI do NL , o que está ocorrendo é a eliminação teórica da intensidade do ruído externo ao lóbulo principal.

• BS (*Backscattering Strength*/Força de Retroespalhamento): Quando um *ping* alcança o assoalho oceânico, é dito que esta parte do fundo foi insonificada. Nesse processo, parte da energia acústica é absorvida pelo fundo, dependendo de seu material (rocha, areia, etc). O restante da energia acústica é refletido e dispersado, e somente uma fração dessa reflexão volta pela mesma direção de ida (*backscatter*, ou retroespalhamento). Esta porção de energia que retorna diretamente para a célula piezoelétrica, dividida por unidade de área, corresponde à força de retroespalhamento. Essa variável depende exclusivamente tanto das propriedades refletivas, representada pelo logaritmo da retrodifusão intrínseca por unidade de área (*Backscatter Index* ou SB), quanto da área efetiva de retrodifusão (A), que corresponde à área total insonificada, sujeita a refletir ou absorver a energia acústica. A força de retroespalhamento é definida como (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000; OHI, 2005; Tang et al., 2005):

$$BS = SB + 10 * \log_{10} * A$$

Entretanto, há uma distinção entre as áreas efetivas de retrodifusão, visto que *pings* emitidos na vertical ensonificam diferentes tamanhos de área, comparados à *pings* com diferentes ângulos de incidência no alvo. Os limites da área de retrodifusão são definidos pela geometria do feixe na vertical do transdutor (*nadir*), especificadamente pela largura do feixe transmitido na direção longitudinal (*along track*), θ_T , e pela largura do feixe recebido na direção transversal (*across track*), θ_R . Fora da vertical do transdutor, a área de retrodifusão é limitada pela largura do feixe, θ_T , e pelo comprimento do impulso transmitido, τ (Figura 7) (OHI, 2005):

$$BS = \begin{cases} SB + 10 * \log_{10}(\theta_T * \theta_R * R^2) \\ SB + 10 * \log_{10}\left(\frac{c * \tau}{2 * \text{sen}\theta} * \theta_T * R\right) \end{cases}$$

Onde, respectivamente, temos a equação de constrição por largura do feixe acima e, abaixo, por comprimento de pulso. Temos que c representa a velocidade do som na água, θ o ângulo do feixe em relação à vertical e R como a distância entre o transdutor e o alvo no leito do mar (Tang et al., 2005). Já SB é definido como:

$SB = (-15 \pm 10)dB$, quando $\theta = 0^\circ$ (incidência vertical), e

$SB = (-30 \pm 10)dB * \cos^2\theta$, para incidências oblíquas de $\theta > 10 - 25^\circ$.

As medidas apresentam variação de $\pm 10dB$ por depender da rugosidade do fundo.

A força de retroespalhamento pode também ser medida diretamente, como:

$$BS = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{Intensidade do eco à 1m do alvo}}{\text{Intensidade incidente}} \right)$$

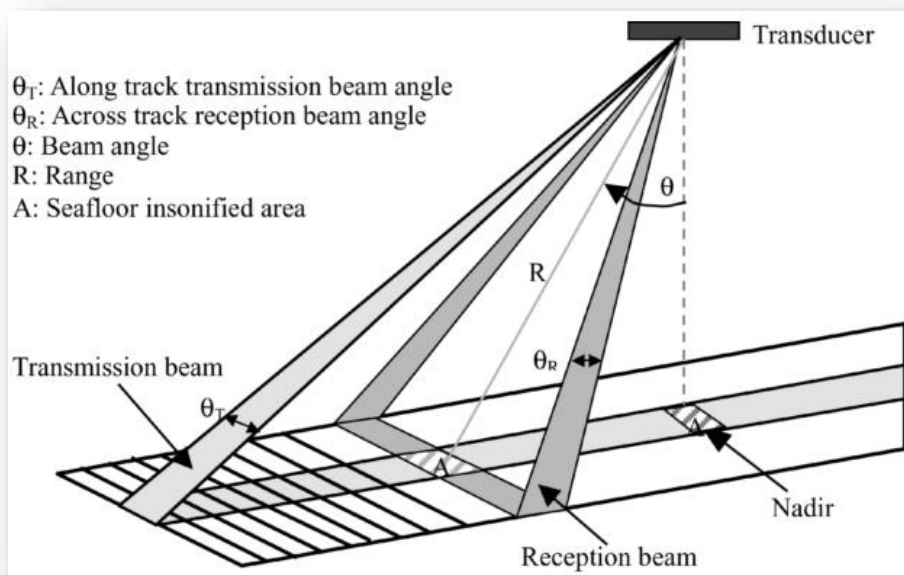


Figura 7 - geometria do feixe. Fonte: L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000.

• DT (*Detection Threshold*/Limiar de Detecção): é um parâmetro definido pelo sistema, que estabelece o nível mínimo de intensidade de sinal que o sonar vai receber.

3.5) SENSORES DE MOVIMENTO

A embarcação possui uma movimentação no espaço tridimensional, resultado da interação com a ondulação do oceano. Essa movimentação da embarcação altera o vetor do sonar (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000), portanto a determinação da posição com alta precisão só tem sentido quando se realiza a determinação correta da ordenação espacial e temporal (Krueger, 1999). A ordenação temporal consiste na integração correta do sistema, que não será o alvo deste capítulo. A correção das profundidades observadas, assim como seu posicionamento do movimento da plataforma de sondagem, significaram uma melhoria considerável na qualidade e exatidão dos levantamentos hidrográficos (OHI, 2005). No total, são 6 movimentos possíveis que uma embarcação pode executar, sendo 3 de rotação e 3 de translação (Krueger, 1999). Para compreender a dinâmica de movimentação da embarcação, é necessário estabelecer os eixos ortogonais em relação à embarcação (X, Y, Z). O centro do plano cartesiano é preferencialmente o centro de massa da embarcação (Ferreira, 2013), conforme a Figura 8:

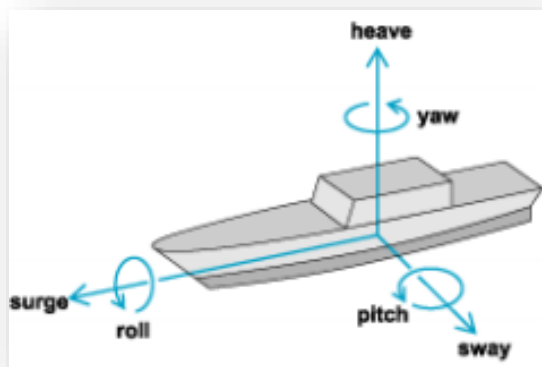


Figura 8 - Atitude da embarcação. Fonte: PAULO e HOLMES, 2011.

Chama-se de atitude da embarcação o conjunto das 3 rotações em relação a cada eixo de referência (X, Y, Z) (Figura 8). Então, segundo Ferreira (2013) temos que:

- Rotação da embarcação em torno do eixo X, que é chamada de balanço ou *roll*. O balanço será positivo quando o estibordo/boreste rotacionar em direção à água.
- Rotação da embarcação em torno do eixo Y, que é chamada de cabeceio ou *pitch*. O cabeceio será positivo quando a proa rotaciona para fora d'água.

- Rotação da embarcação em torno do eixo Z, que é chamada de guinada, *yaw* ou *gyro*. A guinada é positiva nas rotações de sentido horário.

Já os movimentos de translação em torno de XYZ são corrigidos via GNSS, com exceção do *heave*. São eles:

- Translação longitudinal no eixo X, que é chamada de *surge*;
- Translação transversal no eixo Y, que é chamada de *sway*;
- Translação vertical no eixo Z, chamada de arfagem, afundamento paralelo ou *heave*.

Para obter os dados da atitude da embarcação, são utilizados sensores inerciais, compostos por giroscópios e/ou acelerômetros. O acelerômetro funciona medindo acelerações em torno do centro de massa da embarcação (VRU – *Vertical Reference Unit*), e o giroscópio determina rotações em torno do mesmo centro de massa. Esses dados são convertidos, através das leis de movimento de Newton, para dados de atitude que, por conseguinte, permitem analisar a situação de equilíbrio da embarcação (Ferreira, 2013). O VRU é o local escolhido na embarcação, preferencialmente no centro de massa ou próximo a ele, onde são realizadas as medidas de *roll*, *pitch* e *heave*. Os sistemas de posicionamento e navegação da embarcação são responsáveis pelos registros de latitude, longitude e *heading*, associados aos registros de *surge*, *sway* e *yaw* (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Para além dos 6 tipos de movimento da embarcação, é necessário conhecer o *heading*, ou proa, que é usualmente adquirido através de duas antenas GNSS, instalada em uma linha de base e orientadas longitudinalmente. Esse método, que é usualmente superior à precisão dos sensores de proa (Ferreira, 2013), tem por finalidade estabelecer a posição da proa em relação à uma carta de referência (OHI, 2005), a fim de corrigir o *yaw* em relação à uma referência correta. Para realizar uma clara distinção entre *yaw* e *heading*, pode-se afirmar que *yaw* é a oscilação no eixo Z, enquanto o *heading* o ângulo entre o norte geográfico e o eixo X da embarcação (Godin, 1998).

Normalmente o transdutor, o VRU e as antenas de posicionamento são instaladas em diferentes locais da plataforma de aquisição. Portanto, as diferenças lineares dos *offsets* necessitam ser precisamente mensuradas em relação ao VRU – preferencialmente o centro de massa da embarcação, ou o mais próximo possível dele (Ferreira, 2013; OHI, 2005).

3.6) ERROS DE LEVANTAMENTO

O controle do posicionamento dinâmico de uma embarcação sempre representou uma das maiores dificuldades em Levantamentos Hidrográficos, em razão da dificuldade de se efetuar medições repetidas, para um posterior ajustamento ou melhoria da precisão (Ferreira, 2013). O estudo e compreensão dos erros auxiliam e indicam onde podem haver melhorias de sistema, a fim de aumentar a precisão do método (Hare, 1995). Os possíveis erros apresentados em um levantamento hidrográfico, utilizando um ecobatímetro multifeixe, se manifestam de duas formas: alterando o posicionamento do feixe e/ou alterando a profundidade do mesmo. Nem todos os erros geram ambos os tipos de alterações. Existem diferentes tipos de erros sistemáticos, que se comportam de formas distintas. Os erros angulares de *offset*, como os de atitude, geram erros cíclicos, com um padrão de oscilação, enquanto os erros lineares de *offset*, como calibração de sensores, apresentam erros de natureza constante (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Segundo o Manual de Hidrografia da OHI, os erros para determinação da profundidade podem ser de três tipos:

- Grosseiros, que corresponde aos cometidos pelas máquinas, por defeitos de componentes eletrônicos ou mecânicos;
- Sistemáticos, que são deficiências do sistema em compensar erros fixos ou desvios nas medições (erros que variam de acordo com condições operacionais). Em geral correspondem aos erros de atitude, desalinhamento do transdutor e do VRU e incerteza dos ângulos de montagem. Essa categoria de erros que será o foco do trabalho, que podem ser corrigidos e removidos;
- Aleatórios, que podem apenas ser analisados utilizando técnicas estatísticas.

Os erros sistemáticos podem ocorrer principalmente por (Dunnewold, 1998; Godin, 1998; Hare, 1995; L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000; OHI, 2005):

- A. Velocidade do som incorreta, assim como variações inesperadas dela;
- B. Erros angulares na calibração do *roll*, *pitch* e *yaw*;
- C. Erro no alinhamento do VRU ao sistema de coordenadas da embarcação;
- D. Devido à variação dinâmica do calado;
- E. *Time delay* entre sensores;

F. *Offset* estático incorreto do sistema de antenas, navegação e transdutor em relação às coordenadas da embarcação.

Todos os sensores do multifeixe e auxiliares são calibrados anteriormente ao levantamento (Hare, 2008). Uma comum rotina de calibração dos *offsets* angulares do *roll*, *pitch* e *yaw* é o *patch test* (Hughes Clarke, 2003), que soluciona em problemas definidos em ‘B’. O *patch test* checa e calibra esses sensores, assim como a sincronização temporal da associação de profundidade com posicionamento (Gueriot et al., 2000), que corresponde ao erro definido em ‘E’. O teste assume previamente que: os sensores estão devidamente alinhados no sistema de coordenadas da embarcação; os *offsets* de todos os sensores estão medidos corretamente; que a velocidade do som está devidamente calculada; e que o trajeto de cada feixe está corrigido de acordo com o SVC; e que a performance dos sensores não é significativamente afetada pela ‘dinâmica estrutural da embarcação’ (Hughes Clarke, 2003). Entende-se por ‘dinâmica estrutural do *vessel*’ o trabalho mecânico que a embarcação sofre, como consequência de ondas, mudanças de peso, torções. Sobre os erros de integração de sistema, é importante ressaltar que geram erros de medição temporal em relação à posição e orientação do sonar. Os erros de calibração angular de *roll*, *pitch* e *yaw* deformam a leitura da movimentação da embarcação, tanto pelo posicionamento quanto pela profundidade (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Os erros de velocidade do som, definidos em ‘A’, influenciam tanto no cálculo da profundidade quanto da posição, e são causados por cálculo incorreto dos perfis de velocidade do som. Podem ter como origem limitações do equipamento SVP ou CTD, erro na medição da profundidade, ou erros associados às variações físicas da água em determinado espaço temporal. Dessa forma, os feixes oblíquos sofrem alterações angulares (erro de posicionamento) e de velocidade (erro de profundidade), enquanto o feixe ortogonal ao transdutor sofre erro de profundidade mas, devido ao *pitch*, sofre também erro de posicionamento (Hare, 1995).

Existem outras fontes de erro, como por exemplo oriundas das limitações dos sensores. O sensor de *heave*, por exemplo, é limitado por filtros de bandas (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000). Esses filtros não conseguem detectar oscilações de ondas de longo período (maior que 15s) (Hughes Clarke, 2003).

O erro de variação dinâmica do calado, definido em 'D', É acarretada por principalmente consumo de água e combustível (*load*), e afeta a aferição da profundidade. Como estabelecido anteriormente, é fundamental estabelecer o calado do transdutor (*transducer draught* (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000)) ou *draft* dinâmico (Hare, 1995)), ou seja, a distância vertical entre o transdutor e a coluna d'água (*d*). A variação dessa altura causa uma medição errônea de profundidade, e é definida por (Hare, 1995):

$$\text{Draft dinâmico} = \text{draught} - \text{squat} - \text{load}$$

Onde *Draught* é a profundidade do transdutor, medida com a embarcação em repouso; o *squat*, ou assentamento, é a diferença vertical da embarcação em movimento e parada; e o *load*, ou calado dinâmico, é a profundidade do calado da embarcação, em função da variação de peso da embarcação. O *load* pode mudar de forma não linear com o tempo (Hare, 1995) e têm como origem os seguintes eventos (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000):

- Assentamento da embarcação, definido como alterações de calado devido à, principalmente, alterações de velocidade da embarcação, que acarreta um aumento de pressão relativa, criando um efeito de aquaplanagem;
- Alterações de peso na plataforma de sondagem, ocasionadas por principalmente uso de combustível, estoque de água potável, mudanças de equipamento dentro da embarcação e atividades de lastro;
- Mudanças na densidade da água, relativo principalmente a áreas estuarinas, ou em situações que a embarcação transita entre rios, mares e estuários. A mudança de densidade gera uma alteração no peso da embarcação, que altera o calado do transdutor;
- Calibração incorreta do sensor de *heave*, resultando em medições errôneas de profundidade;
- Mudanças de calado do transdutor causadas por constante elevação ou *trim* da embarcação. Isso ocorre devido ao sensor de *heave* não conseguir detectar tais variações, por elas serem de longo período. Tais efeitos variam de acordo com o *load* e o *squat*.

► Erro no alinhamento do VRU ao sistema de coordenadas da embarcação.

O *patch test* analisa o desalinhamento dos sensores em relação a eles próprios, mas não os alinha em relação ao eixo do Z. Caso desalinhamento do VRU em relação ao sistema de

coordenadas da embarcação ocorra (erro definido em 'C'), dois tipos de erros podem existir(Hare, 1995):

- Erros dinâmicos angulares: o desalinhamento *roll/pitch* em relação ao eixo Z causará *crosstalk* entre os sensores de *roll* e *pitch*. A relação entre esses parâmetros é dada por (Hughes Clarke, 2003; L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000):

$$\text{sen}(\Psi') = \cos(\gamma) * \text{sen}(\Psi) - \text{sen}(\gamma) * \text{sen}(\theta)$$

$$\text{sen}(\theta') = \cos(\gamma) * \text{sen}(\theta) - \text{sen}(\gamma) * \text{sen}(\Psi)$$

Onde Ψ' é o *roll* errôneo, Ψ é o *roll* verdadeiro, γ é o ângulo de desalinhamento do VRU em relação ao eixo Z (ou erro de desalinhamento *yaw* (Hughes Clarke, 2003)), θ' é o *pitch* errôneo e θ é o *pitch* verdadeiro. Erros desta natureza afetam a aferição do *roll* e *pitch* verdadeiros, e possuem natureza cíclica. São erros dinâmicos, ou seja, variam de acordo com a posição da embarcação – no caso, de acordo com os valores de *roll* e *pitch*. Se caracteriza, também como um erro de média zero. O imageamento é deformado, proporcionalmente ao ângulo do feixe, apresentando declive de fundo e alteração na profundidade, posicionamento e insonificação de fundo (L-3 Communication SeaBeam Instrument, 2000).

Duas coisas podem ser observadas segundo as equações anteriores:

1. Caso haja ausência de movimento em um dos eixos (X ou Y), o sinal será atenuado pelo cosseno do erro γ ;
 2. Quando existe movimento nos dois eixos (X e Y), ocorre *crosstalk* em função do seno do erro γ .
- Erros estáticos angulares: A embarcação pode possuir em repouso naturalmente um *trim* – uma inclinação constante e positiva em *pitch*. Caso isso ocorra, haverá um constante *roll* referente ao *crosstalk*. Entretanto, se esse *trim* for em função da velocidade da embarcação, acarretará desvio em *roll* em função da velocidade da embarcação. Se isso for notado, o levantamento há de ser interrompido para realizar novamente calibração e posterior *patch test* (Hughes Clarke, 2003).

Os sensores de *roll*, *pitch* e *yaw* são independentes do transdutor/sistema de posicionamento e, por isso, necessitam ser calculados apenas uma vez por *ping* – ou seja, se configuram como um erro estático e de posicionamento.

É procedimento padrão calibrar linearmente os *offsets* antes de cada levantamento a fim de evitar esse tipo de erro (Hare, 1995). Caso a localização de cada sensor em relação ao sistema de coordenadas da embarcação estiver incorretamente medida, ocorrerão erros de medição (erro definido em 'F'). Esses erros possuem natureza linear, pois não há nenhum desalinhamento angular envolvido (*roll*, *pitch* e *yaw*). Esses erros de posicionamento se manifestam tanto de forma estática quanto dinâmica (Hughes Clarke, 2003):

- Estática: o erro se comportará gerando alterações estáticas verticais e horizontais no posicionamento do dado.
- Dinâmica: se comporta de forma variável, de acordo com a movimentação da embarcação. Devido a esse efeito, cada informação de detecção será ligeiramente diferente, pois o erro não apresenta magnitude constante. Entretanto, ao se lidar com águas rasas (até aproximadamente 35m de profundidade), a leitura do erro tende a ser considerada como constante (Hughes Clarke, 2003).

O mais significativo erro dinâmico é o erro de *heave* induzido. A atitude da embarcação gera naturalmente um *heave* induzido h_i , conforme a Figura 9. O cálculo do *heave* real do transdutor h_t , considerando o *heave* medido pelos sensores no VRU h_m , é feito da seguinte forma:

$$h_t = h_m + h_i$$

Portanto, erros de posicionamento no espaço XYZ do VRU (dX, dY, dZ), que contêm os sensores de *roll* (r) e *pitch* (p), geram um erro de *heave* induzido, definido como:

$$IH_{error} = -dX * \text{sen}(p) + dY * \text{sen}(r) * \cos(p) + dZ(1 - \cos(r) * \cos(p))$$

Dessa forma, o erro de *heave* induzido é claramente dinâmico, visto que varia de acordo com medições de atitude. Em se tratando de levantamentos em águas rasas, onde a frequência de *ping* é muito maior que o período do *roll* e do *pitch*, o IH_{error} é praticamente idêntico para todos os feixes, tanto externos quanto internos (Hughes Clarke, 2003).

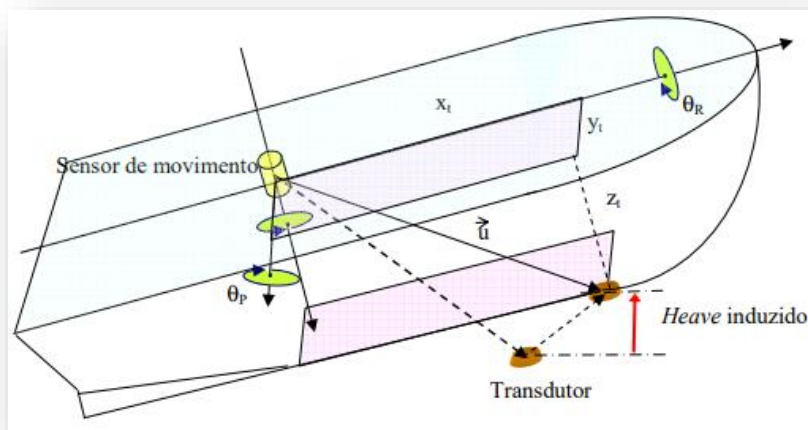


Figura 9 - Geometria do heave induzido.

Segundo Dunnewold (1998), em se tratando de erros definidos em 'F', os *offsets* dos sensores de movimento, posicionamento e transdutor são medidos no momento que todo o sistema é instalado na embarcação. E, também, é possível que haja erros sistemáticos nos eixos X, Y e Z, na magnitude de 1:1, ou seja: um erro de 1cm de *offset* acarreta 1cm de erro nas devidas coordenadas. Similar ao *patch test*, existe um procedimento para correção de erros em *offsets* lineares, no que diz respeito ao posicionamento do transdutor e do sistema de posicionamento, em relação ao sistema de coordenadas da embarcação. Foi definido por Dunnewold (1998) dos métodos para identificação dos erros de *offset* lineares:

- *Offset along-track* (*offset* na direção proa-popa): realizar duas linhas de mesma direção e sentidos opostos, uma em cima da outra, com a mesma velocidade, transpassando algum objeto. Será encontrado erro similar à calibração do *pitch* no *patch test*. O erro é igual à metade da distância do objeto deslocado (Figura 10).

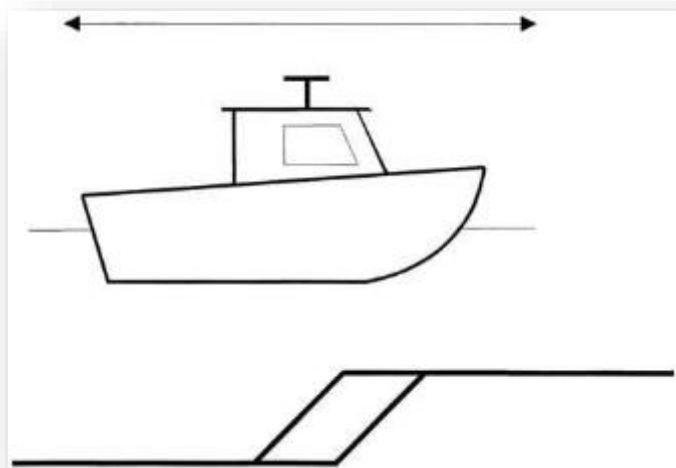


Figura 10 - Calibração do *offset* linear along-track. Fonte: Dunnewold, 1998.

- *Offset across-track* (*offset* na direção bombordo-estibordo): realizar duas linhas de mesma direção e sentidos opostos, paralelas e em mesma velocidade, de forma que cada linha fique à esquerda e à direita de algum objeto. O resultado será o deslocamento do objeto, e o erro será igual à metade da distância medida entre os objetos (Figura 11).

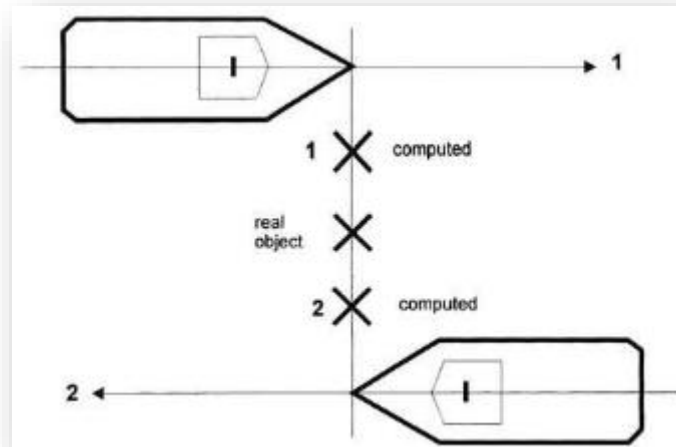


Figura 11 - Calibração do offset linear across-track. Fonte: Dunnewold, 1998.

4) ÁREA DE ESTUDO

Os dados coletados nesse trabalho são da localidade das Ilhas Shetland do Sul, mais especificadamente na Baía do Rei George. A expedição responsável pela coleta dos dados foi a Operação Antártica XXXIII (OPERANTAR XXXIII), através da embarcação polar Almirante Maximiano, e em conjunto com a Universidade Federal Fluminense, pelo projeto MUDANÇAS GLOBAIS E VARIABILIDADE CLIMÁTICA EM ESCALA DO QUATERNÁRIO NA ANTÁRTICA MARÍTIMA E PENÍNSULA ANTÁRTICA: PARÂMETROS GEOFÍSICOS, SEDIMENTOLÓGICOS E BIOGEOQUÍMICOS, coordenado por Rosemary Vieira e vinculado ao CNPq.

A Baía Rei George, uma das baías da Ilha Rei George, faz parte das Ilhas Shetland do Sul (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Localiza-se ao norte do Estreito de Bransfield, na Península Antártica. As linhas de navegação dos dados levantados, localizados geograficamente na Baía Rei George, estão conforme Figura 13. O contexto de estudo é um ambiente glaciomarinho, ou seja, caracteriza-se pela interação entre os processos de ambientes glaciais e marinhos. A disposição e movimentação das geleiras são fatores fundamentais na escultura do relevo observado neste tipo de ambiente (Viana, 2014). Os dados batimétricos coletados nesse local indicaram uma topografia bem heterogênea, com grandes declives e variação de profundidade (195-450m).

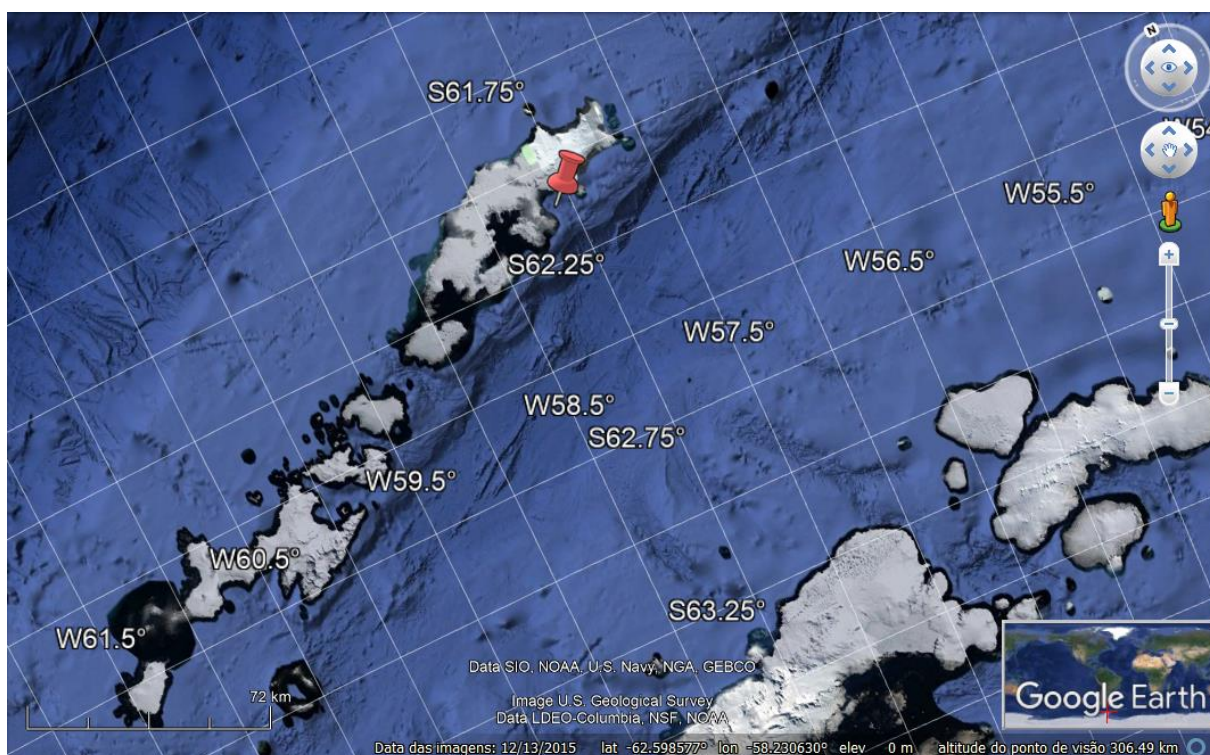


Figura 12 – No Estreito de Bransfield, as Ilhas Shetland do Sul. No marcador vermelho, a Baía Rei George.

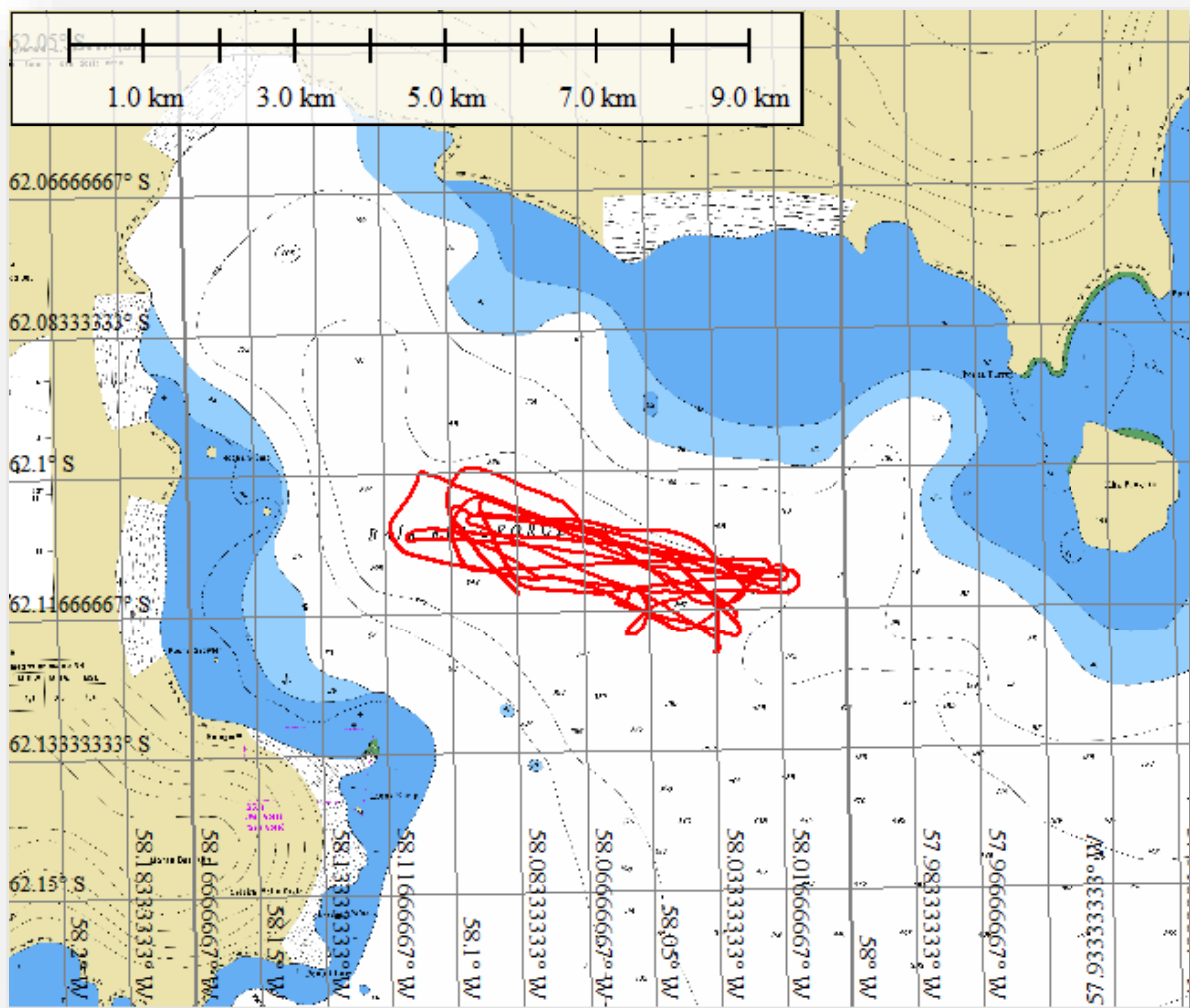


Figura 13 - Baía Rei George. Em vermelho, linhas de navegação da batimetria.

5) METODOLOGIA

Para aquisição, foi utilizado um ecobatímetro EM 302 da Kongsberg, destinado a águas profundas. Opera na frequência de 30kHz, e é capaz de varrer até 5,5 vezes a profundidade (EM 302 Product Specification). Todos os *offsets* lineares foram referenciados em relação a MRU.

Para realizar simulação linear do transdutor, sistema de posicionamento e MRU, foi realizado processamento dos dados utilizando o software HIPS and SIPS na versão 11.2.3. Portanto, foram criadas uma superfície de referência e demais simuladas, para comparar a natureza dos erros inseridos.

O fluxograma de processamento da superfície de referência está descrito como abaixo, segundo norma BPMN (*Business Process Modeling Notation*) (Figura 14):

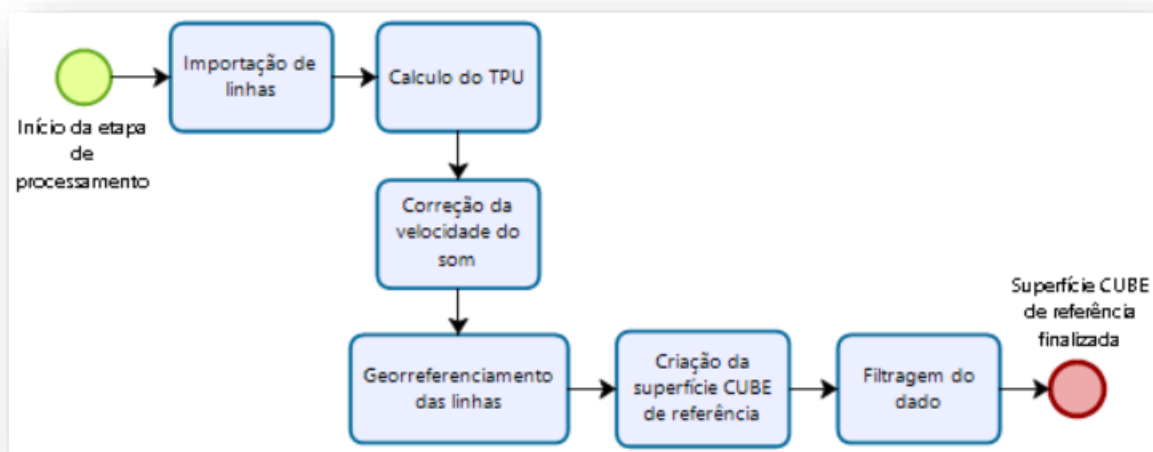


Figura 14 - Fluxograma de processamento da superfície de referência.

Não houve correção de maré no dado, visto que as profundidades do dado antártico foram entre 200 e 450 metros. Entretanto, em trabalho de regiões correlatas, foi constatado que a amplitude de maré é de aproximadamente 2 metros (Vidal, Berrocoso, & Fernández-Ros, 2012).

Na etapa do TPU (*Total Propagated Uncertainty*) todos os erros totais propagados são calculados.

Para simular *offsets* lineares do transdutor, é necessário realizar novamente o *Sound Velocity Correction* (SVC), utilizando o algoritmo da Kongsberg. Portanto, para ter absolutamente o mesmo algoritmo de processamento aplicado em todos os dados (de referência e simulados), foi escolhido refazer o SVC inclusive na superfície de referência. Este

procedimento consiste em corrigir a diretividade de cada feixe, considerando estratificações na coluna d'água ocasionadas por diferentes velocidades (CARIS HIPS and SIPS 10.4 User Guide).

A etapa de georreferenciamento das linhas consiste em transformar o dado bruto baseado no tempo (*range and angle*) para dado de profundidade referenciado geograficamente (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2). As etapas de cálculo do TPU, correção de velocidade do som e georreferenciamento das linhas acontecem através da mesma ferramenta, a *Georeference Bathymetry*.

Para a superfície de referência e as simuladas, foi estabelecido uma resolução de 3 metros para a superfície gerada via algoritmo CUBE. A camada escolhida para ser analisada é a *depth*, por considerar igualmente todos os pings, independente de profundidade (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2).

A filtragem do dado foi realizada em duas etapas: a aplicação de uma filtragem automática e a checagem manual do filtro automático, procedido de filtragem manual. Existem diversos filtros automáticos; entretanto, devido a presença de degraus na batimetria – ocasionados pela ausência de correção de maré – optou-se por realizar apenas um filtro baseado no desvio padrão. O desvio padrão da superfície foi analisada através da camada *Std Dev*, no CARIS HIPS and SIPS, e foi definido eliminar dados com desvio padrão maior que 2 metros. Desta forma os pontos espúrios foram, em sua maioria, eliminados. Como não houve correção de maré, degraus na superfície foram esperados, encontrados e preservados para maior veracidade com a aquisição deles.

Para realizar as simulações lineares de *offset*, foi utilizado o seguinte fluxo de processamento (Figura 15):

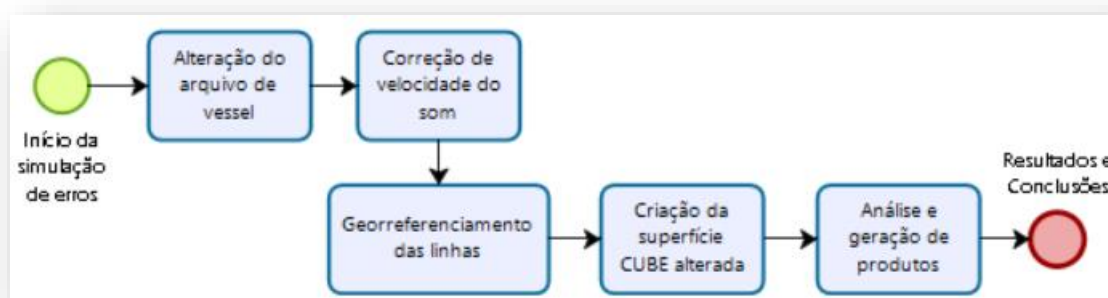


Figura 15 - Fluxo de processamento das superfícies com erro induzido.

Atribuir erros lineares no dado significa alterar valores de *offset* diretamente no arquivo de *vessel*. O arquivo de *vessel* corresponde às configurações lineares e angulares da disposição

dos sensores na embarcação (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2). Portanto, o arquivo de *vessel* necessita estar definido corretamente; pois posteriormente é aplicada a correção de velocidade do som da Kongsberg, que utiliza informações contidas no mesmo. Então, os seguintes campos do arquivo de *vessel* foram preenchidos, utilizando o módulo *Vessel Editor* (Figura 16):

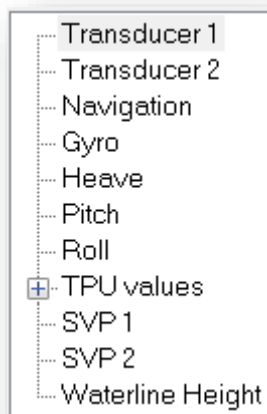


Figura 16 - Campos configurados do arquivo de *vessel*.

Os campos *SVP1* e *SVP2* correspondem ao transmissor e receptor da informação batimétrica respectivamente, que contém valores de *X*, *Y*, *Z*, *roll*, *pitch* e *heading* do alinhamento do transdutor. Todas estas informações são encontradas no header do dado bruto, assim como o *Waterline Height*, que corresponde à profundidade (valor positivo) do transdutor em relação a linha d'água. Os demais campos permanecem zerados, com exceção do *TPU values* que é preenchido com valores necessários para o cálculo do TPU, que não é relevante para a presente análise (HIPS and SIPS Technical Note Sound Velocity Correction Kongsberg EM Data; CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2).

Para realizar alterações de *offset* linear no sistema de posicionamento, foi alterado o campo *Navigation*. Entretanto, para alterações no eixo *Z* do sistema de posicionamento, foi utilizado o campo *Waterline Height*. A razão deste decorrer é que a alteração em *Z* no campo *Navigation* é utilizada para computar maré via GPS; portanto, para realizar alterações no eixo *Z*, deve-se utilizar o campo *Waterline Height* (opção escolhida) ou alterar em *Z* a altura do transdutor (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2).

Para realizar alterações de *offset* linear no MRU, é utilizado o campo *heave*.

Para realizar alterações de *offset* linear no transdutor, é utilizado o campo *SVP1* (transmissor) e *SVP2* (receptor). Ambos campos devem ser igualmente alterados, para mover o transmissor e receptor conjuntamente (HIPS and SIPS Technical Note Sound Velocity Correction Kongsberg EM Data).

Refazer a velocidade do som segundo o algoritmo da Kongsberg é necessário, pois é fundamental estabelecer precisamente a posição Z do transdutor, que define sua altura em relação às camadas da estratificação da água. Por isso é justificada a nova configuração no arquivo de vessel da embarcação, onde foram estabelecidos os valores de offset do transdutor para o SVC.

No georreferenciamento das linhas não é mais necessário calcular o erro total propagado do dado, pois já foi calculado anteriormente.

Para gerar cada superfície com alterações de offsets lineares, é necessário alterar as configurações no arquivo de *vessel* e realizar o SVC novamente, através da ferramenta *Georeference Bathymetry*. As alterações foram realizadas no transdutor, no sistema de navegação e no MRU, nos eixos X, Y e Z. O software CARIS HIPS and SIPS considera X o eixo sentido bombordo-estibordo, sendo positivo para estibordo, e Y o sentido proa-popa, sendo positivo para frente. Z é um vetor definido como positivo para baixo (CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2) (Figura 17).

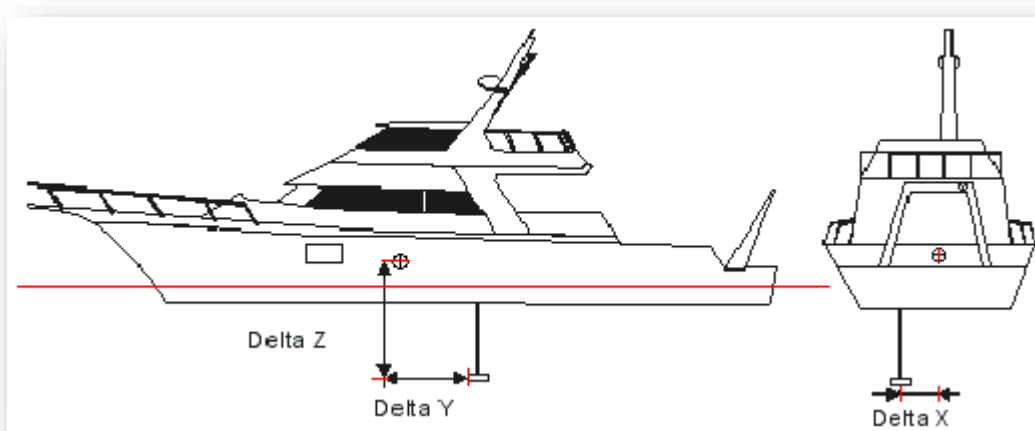


Figura 17 - Sistema de coordenadas da embarcação estabelecidos pela CARIS e utilizado no software CARIS HIPS and SIPS. Fonte: CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2.

Na etapa de análise e geração de produtos foi realizada criação de superfícies de +1, +10 e +20 metros de erro em cada eixo separadamente e em cada sensor (transdutor, MRU e navegação) separadamente. A partir destes produtos, foram geradas superfícies diferença, que são o residual da subtração da superfície de referência com uma superfície simulada. Os residuais foram, também, exportados em ASCII através da ferramenta *Compute Statistics*, módulo do CARIS HIPS and SIPS e, utilizando a linguagem de programação Python, foram feitos gráficos e análises estatísticas.

Cada erro foi gerado individualmente, com gradação de 1, 10 e 20 metros positivos para cada eixo e sensor. Nos dados antárticos, a finalidade foi gerar erros gradativos para compreender a natureza de comportamento do erro. As análises foram feitas através da avaliação visual da superfície, da nuvem de pontos (*Subset Editor*), perfil (*Digitizer Profile*), visualizador 3D e análise estatística. O critério de avaliação consistiu na avaliação do deslocamento de superfícies e estruturas, assim como a deformação delas, criação de artefatos e comportamento estatístico.

6) RESULTADOS

6.1) Superfície de referência

A superfície de referência foi gerada a partir do fluxograma de processamento da Figura 14, e seu resultado está abaixo (Figura 18):

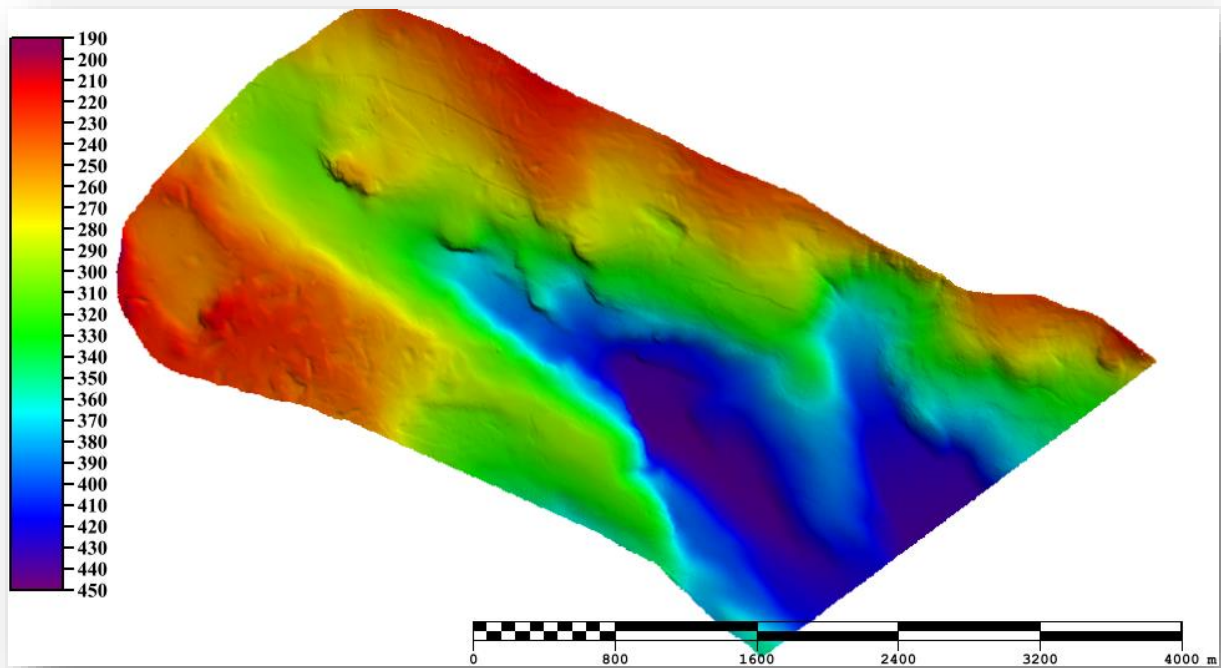


Figura 18 - Superfície de referência finalizada. Escalas horizontal e vertical em metros.

Como não houve correção de maré, degraus foram observados, medidos e mantidos durante o processamento. Foi observado amplitudes de maré variando entre 1 e 3 metros. A Figura 19 mostra um exemplo de degrau, com amplitude de 2.5-3m, maior observada no dado.

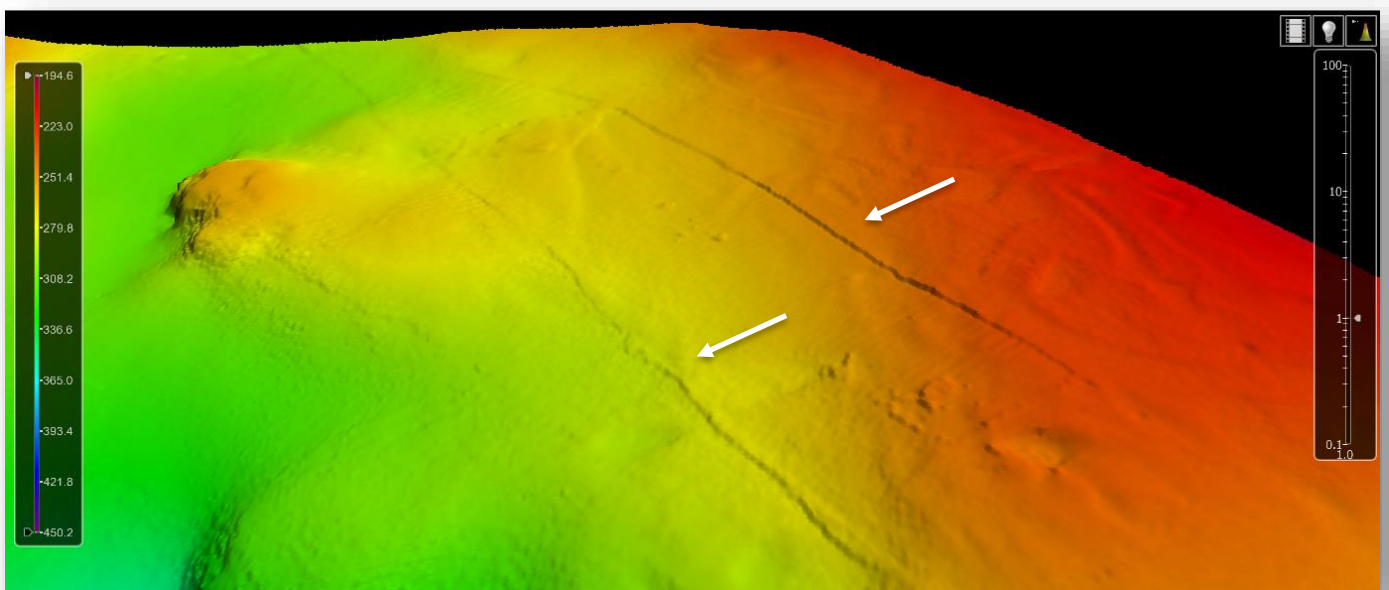


Figura 19 - Degrau causado pela falta da correção de maré na superfície de referência.

6.2) Simulação e Análise de Erros em *offsets* Lineares do Sistema de Navegação

6.2.1) Alteração no Eixo X do Sistema de Navegação

Ao transladar o sistema de navegação de uma linha em torno do eixo X, toda a superfície gerada pela linha é deslocada horizontalmente no sentido do eixo. Se estivéssemos trabalhando com uma só linha, veríamos apenas um deslocamento em X da superfície no plano. Entretanto, um levantamento tradicional considera diversas intersecções de linhas de sentidos opostos e, inclusive, direções distintas. Este cenário realista é apresentado no dado antártico, sendo possível observar o comportamento do erro em uma malha de linhas.

Quando temos um conjunto de linhas aproximadamente paralelas e de sentidos iguais, observa-se que todo conjunto se desloca de forma igual, no eixo X, sem nenhuma deformação na superfície. Entretanto, quando se tem linhas aproximadamente paralelas e de sentidos opostos, ocorre uma dupla detecção do fundo marinho: cada conjunto de linhas, separados pelo diferente sentido, desloca o dado no eixo X, mas com sinais opostos. Em outras palavras, é como se linhas de um sentido deslocassem em X, enquanto as linhas de sentido oposto deslocassem em -X.

Para compreender o real comportamento dos erros lineares de *offset* individualmente, foi utilizada uma superfície com 20 metros somados no eixo X. As alterações causadas nos dados foram:

- Rugosidade

Determinadas regiões do dado apresentaram diferente textura/rugosidade, como na Figura 20, quando comparados à superfície de referência (Figura 21).

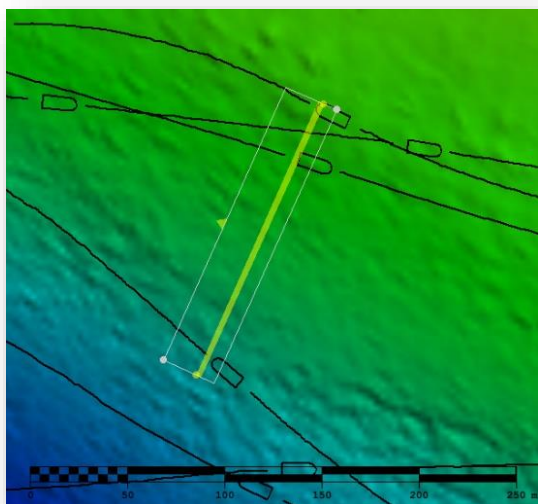


Figura 21 - Posição do slice na superfície de referência. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.

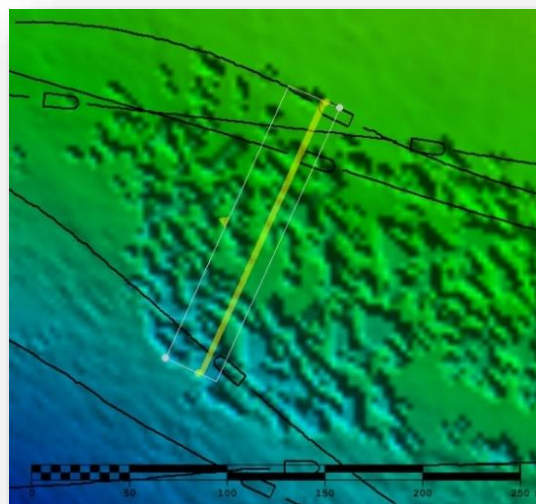


Figura 20 - Posição do slice na superfície simulada, com +20m de erro em X do sistema de posicionamento. EM amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.

Para compreender melhor o erro, foi realizada uma análise da nuvem de pontos, através da ferramenta *Subset Editor*, com *slice* conforme demonstrado na Figura 22, constatando o fenômeno de dupla detecção do fundo marinho:

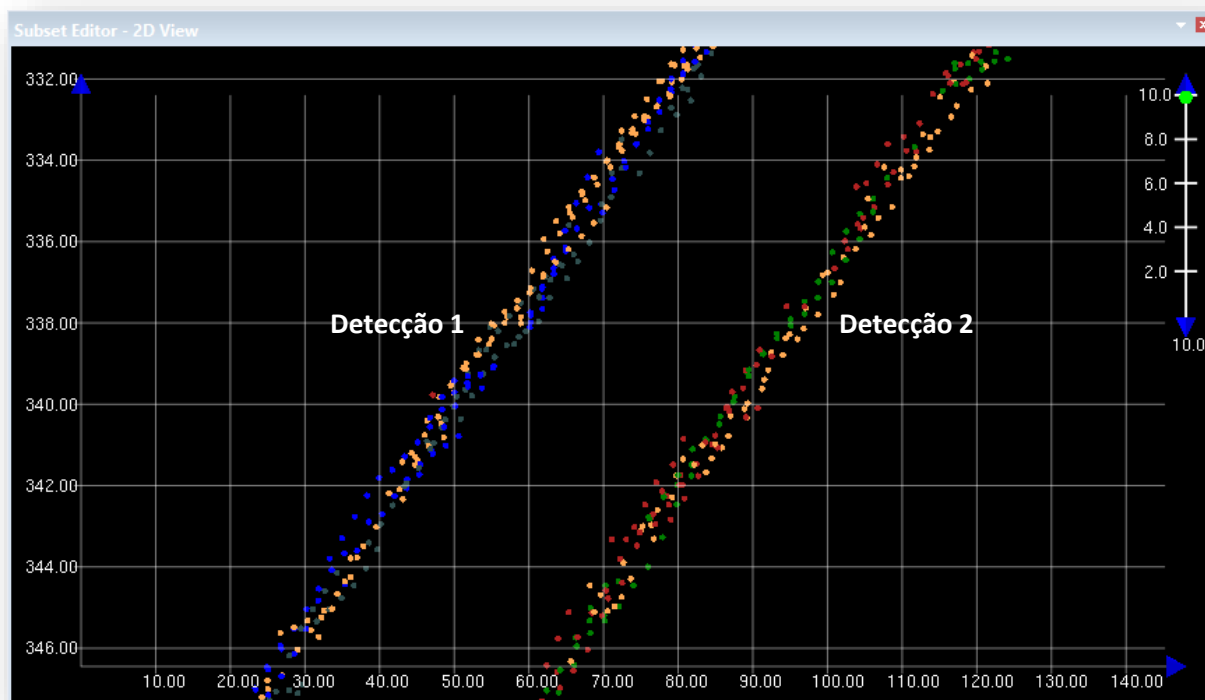


Figura 22 - Nuvem de pontos resultantes de alteração linear de offset no eixo X, de +20m. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exaço vertical.

Na Figura 22, cada cor corresponde a uma linha. No canto superior direito, está posicionada a barra de exaço vertical. Os eixos horizontal e vertical estão em metros. Ambas as detecções, 1 e 2, apresentam mesma quantidade de linhas e, visualmente, densidade de pontos muito similar. Como foi possível observar utilizando a ferramenta *Query* e o sentido das *track lines*, cada detecção está disposta por traçar um sentido: a detecção 1 ocorre nas linhas de direção aproximada leste para oeste, enquanto a detecção 2 ocorreu com as linhas de direção aproximada oeste para leste. A linha de cor amarela ocorre em ambas as detecções, pois corresponde a apenas uma linha que “foi e voltou” pela mesma região – ambos os sentidos.

As linhas sofreram deslocamento em X de 20m. Entretanto, cada detecção deslocou o dado em 20 metros em sentidos opostos, totalizando 40 metros de separação entre as detecções. Esse erro de 40 metros é visível através da escala horizontal da Figura 22, em metros.

O efeito de rugosidade foi ocasionado pela dupla detecção: o algoritmo CUBE não conseguiu distinguir o fundo verdadeiro, ora registrando a detecção 1 como real, ora a detecção

2. Tal efeito teve ocorrência no dado como um todo, sendo mais evidenciada quando ambas as detecções apresentam densidade similar de dados: tanto a detecção 1 quanto a 2 possuem boa continuidade e densidade de dados – 3 linhas por detecção.

Para compreender os efeitos da rugosidade no ambiente tridimensional, foram geradas imagens no visualizador 3D do CARIS HIPS and SIPS. Foram utilizadas, para fins comparativos, a superfície de referência (Figura 23), superfície com +1m de erro em X (Figura 24), superfície com +10m de erro em X (Figura 25) e superfície com +20m de erro em X (Figura 26), sendo todas as superfícies simuladas no sistema de posicionamento.

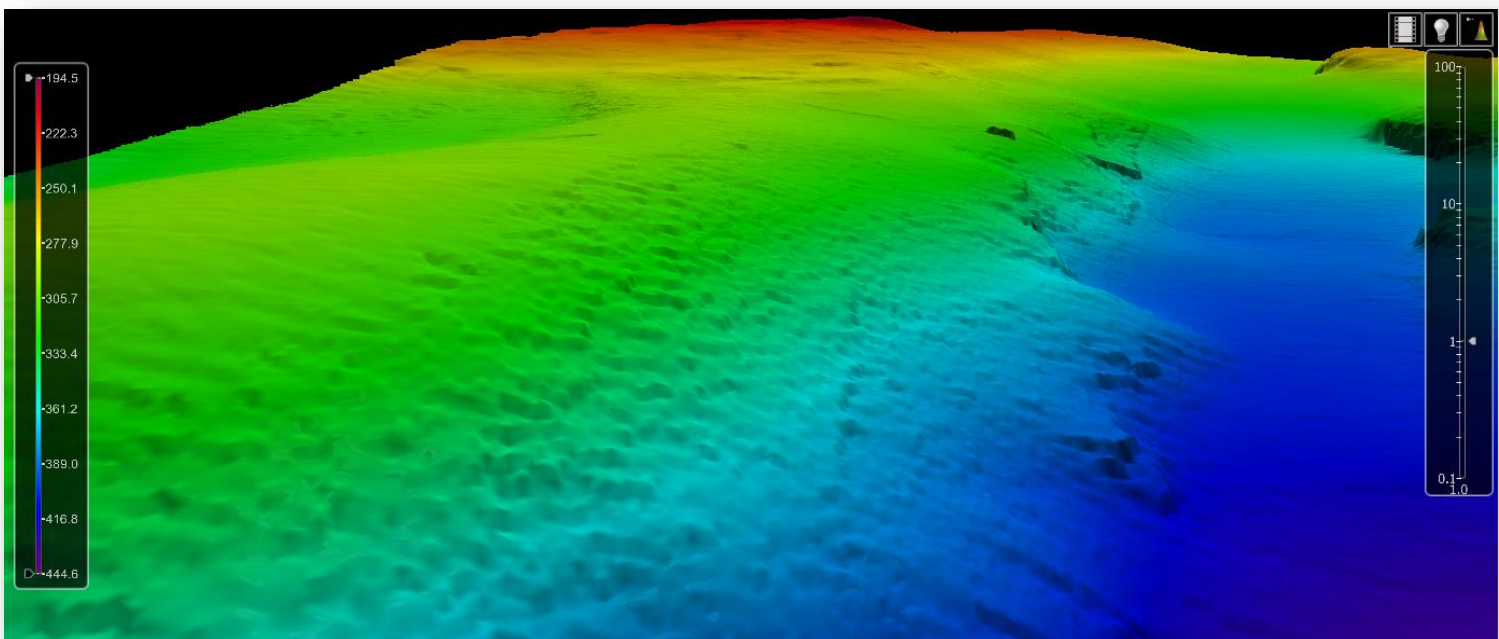


Figura 23 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.

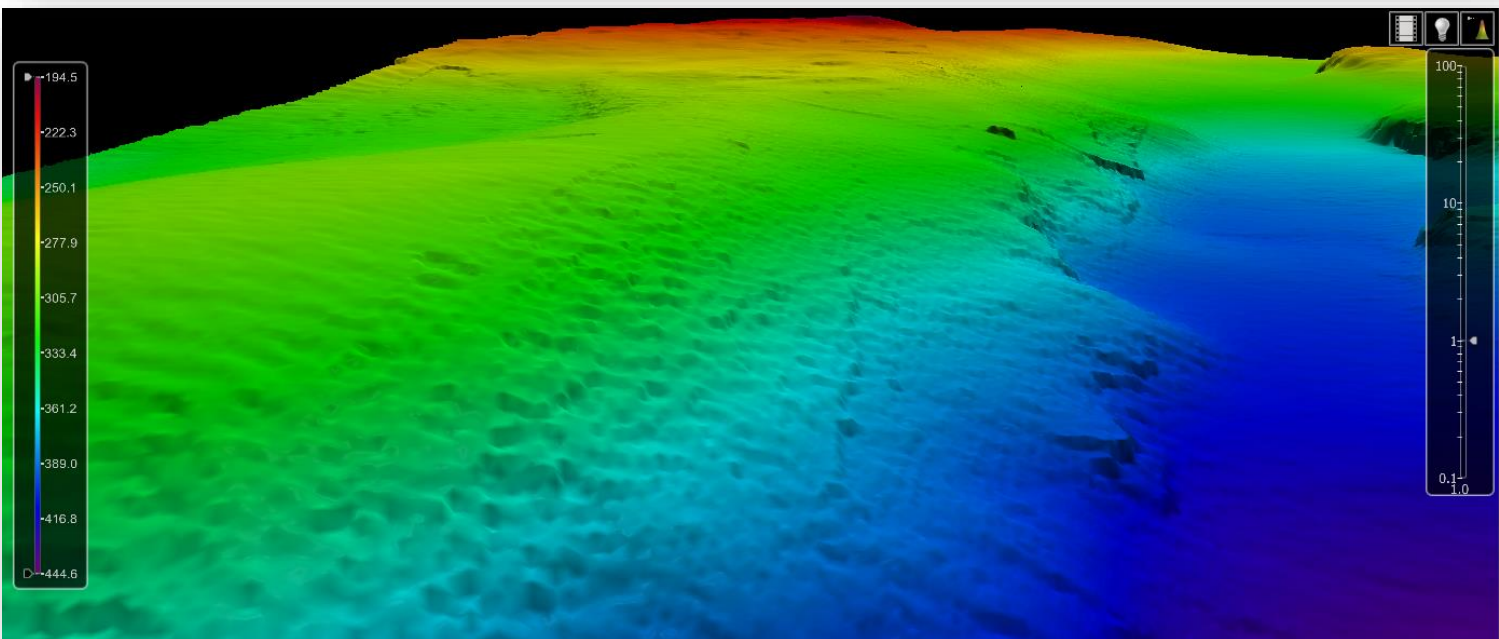


Figura 24 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.

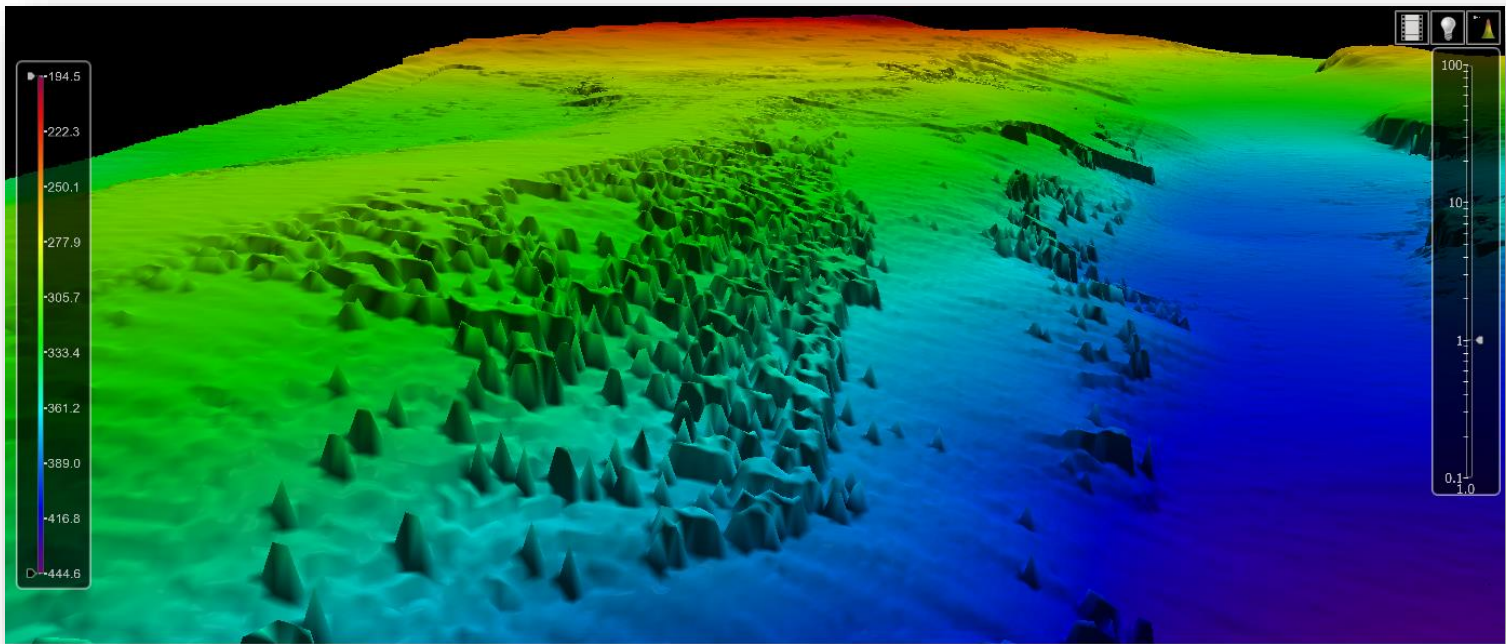


Figura 25 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.

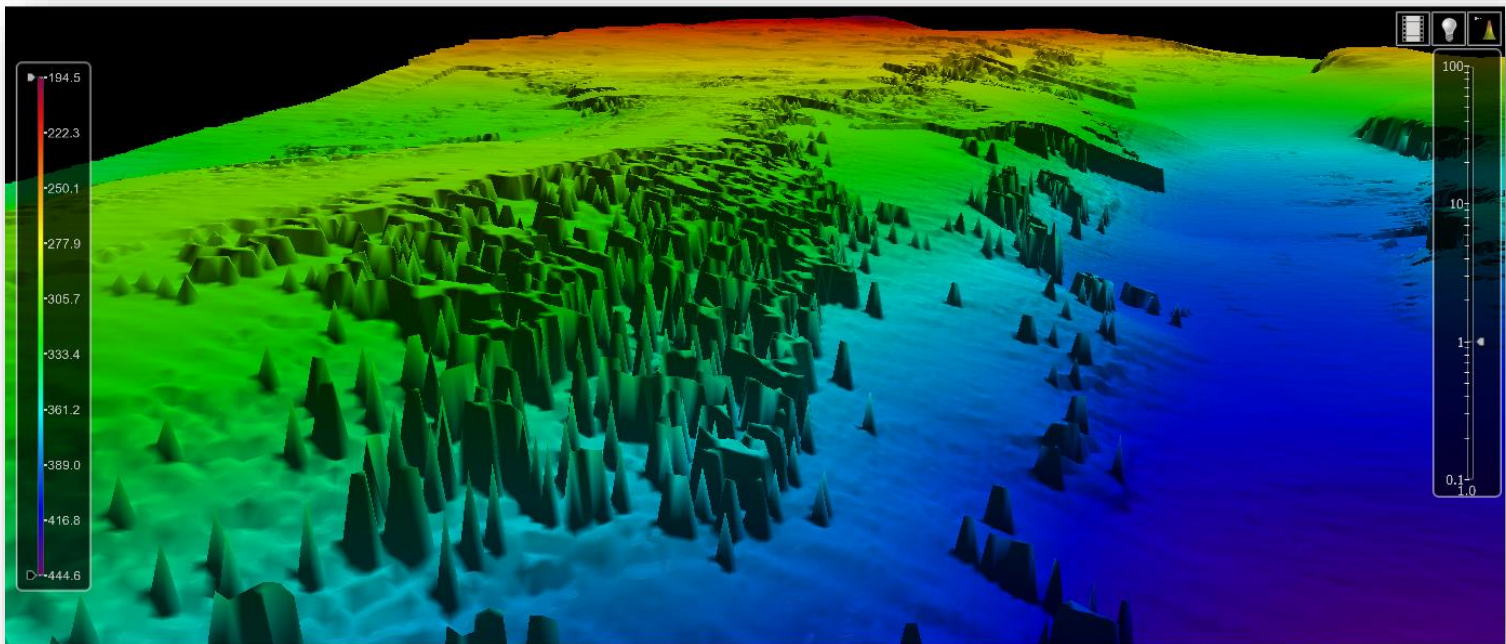


Figura 26 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou o fenômeno de rugosidade.

- Degraus

Outro efeito acarretado na superfície, como consequência da dupla detecção do fundo marinho, é o surgimento de degraus. Este efeito ocorre em regiões com distinta densidade de dados. Seu comportamento é similar a um degrau por diferença de maré. A Figura 27 evidencia os efeitos de degrau, ocasionado por diferente densidade de pontos entre as detecções, e a Figura 28 a nuvem de pontos delimitada pelo *slice*.

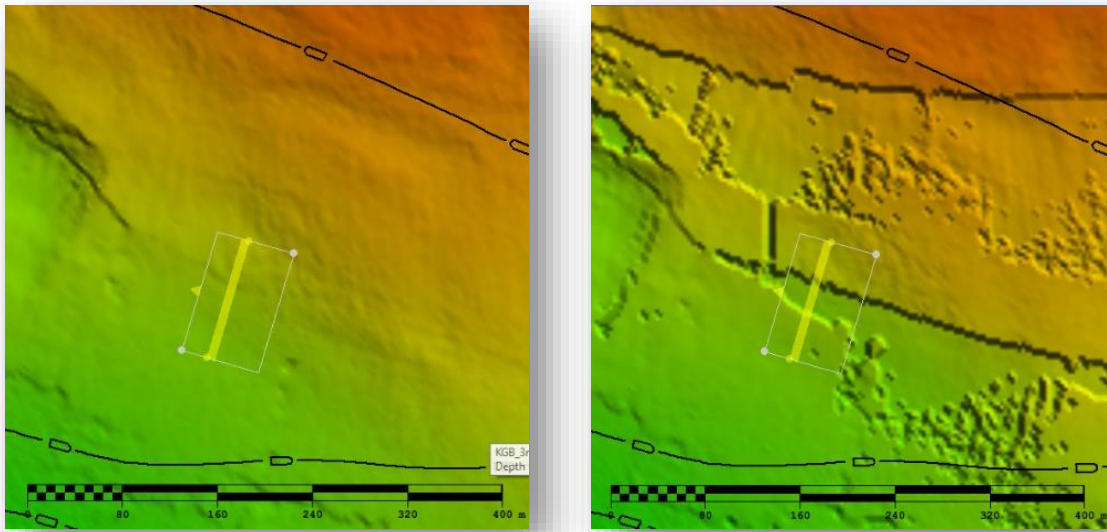


Figura 27 - Posição do slice na superfície de referência e na superfície com 20 metros de erro em X. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.

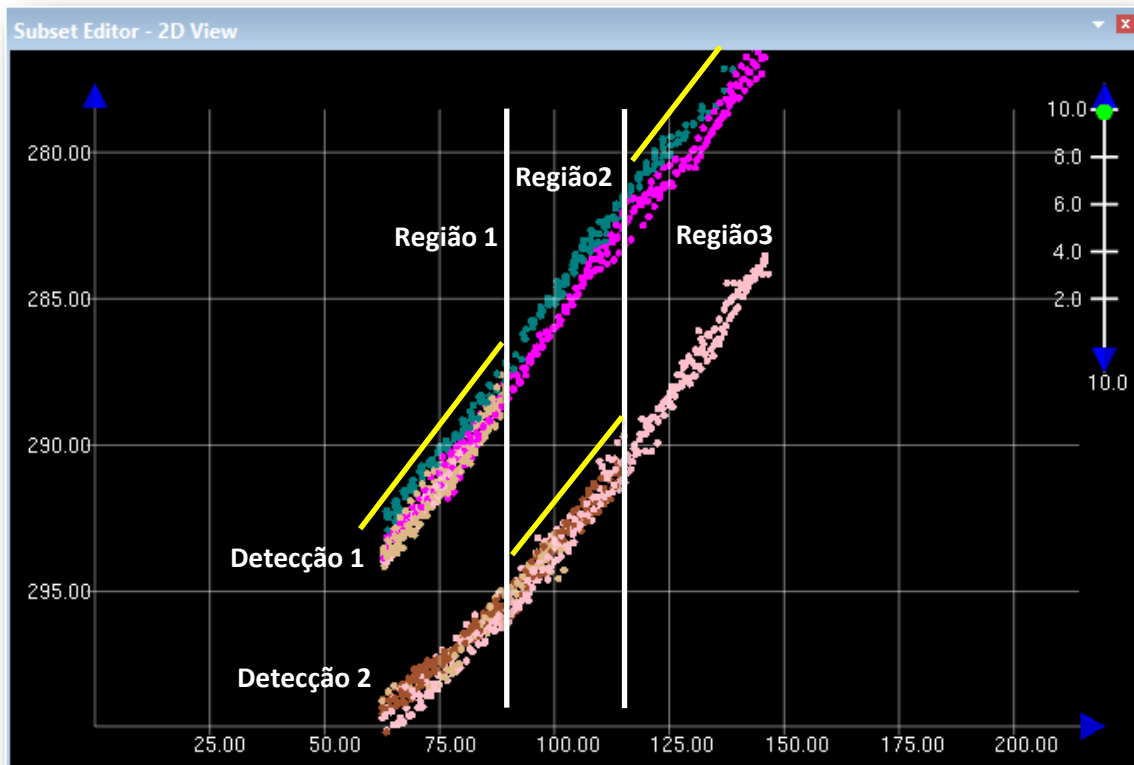


Figura 28 - Nuvem de pontos explicando o fenômeno dos degraus. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical. Em amarelo, o fundo interpretado pelo CUBE como verdadeiro.

Como é possível observar, ocorre um “degrau duplo” na Figura 28. No *Subset Editor* entende-se o porquê: o algoritmo CUBE detectou a Detecção 1 como fundo verdadeiro na Região 1 e Região 3, e a Detecção 2 como fundo verdadeiro somente na Região 2, acarretando do “duplo degrau”. A razão deste fenômeno reside no funcionamento do algoritmo CUBE – as regiões 1 e 3 apresentam maior quantidade de linhas e densidade de pontos na detecção 1 em relação à detecção 2; enquanto a região 2 apresenta maior densidade de pontos na detecção 2 do que na detecção 1. Cada linha é representada por uma cor distinta. Em amarelo (Figura 28), o fundo interpretado como verdadeiro pelo algoritmo CUBE foi traçado.

Uma consequência dos degraus que não foi possível observar no presente dado foi o surgimento de ‘feriados’: ausência de dado entre linhas de sondagem. Suponha que duas linhas, de mesma direção e sentidos opostos, possuam um encaixe muito próximo de seus feixes externos. Quando houver erro de *offset* linear em X maior que a metade da distância entre os extremos dos feixes externos, um feriado poderá surgir.

Para compreender os efeitos dos degraus no ambiente tridimensional, foram geradas imagens no visualizador 3D do CARIS HIPS and SIPS. Foram utilizadas, para fins comparativos, a superfície de referência (Figura 29), superfície com +1m de erro em X (Figura 30), superfície com +10m de erro em X (Figura 31) e superfície com +20m de erro em X (Figura 32), sendo todas as superfícies simulando no sistema de posicionamento.

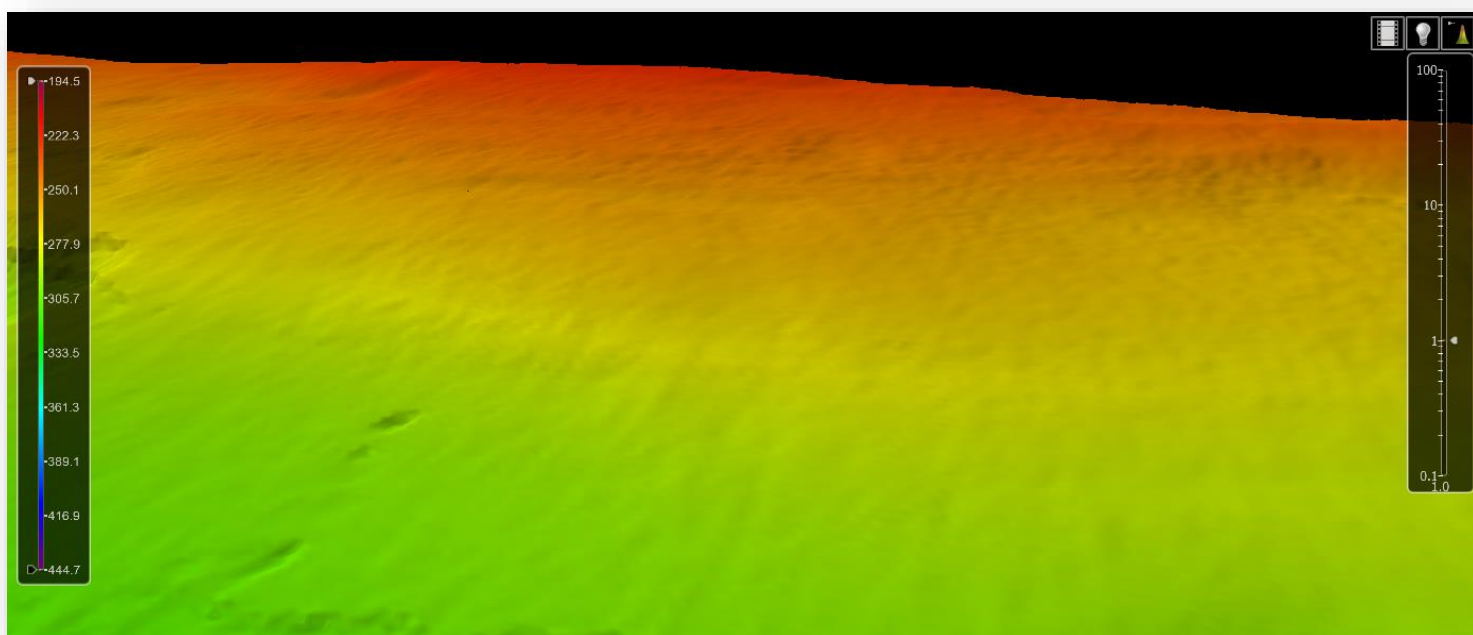


Figura 29 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.

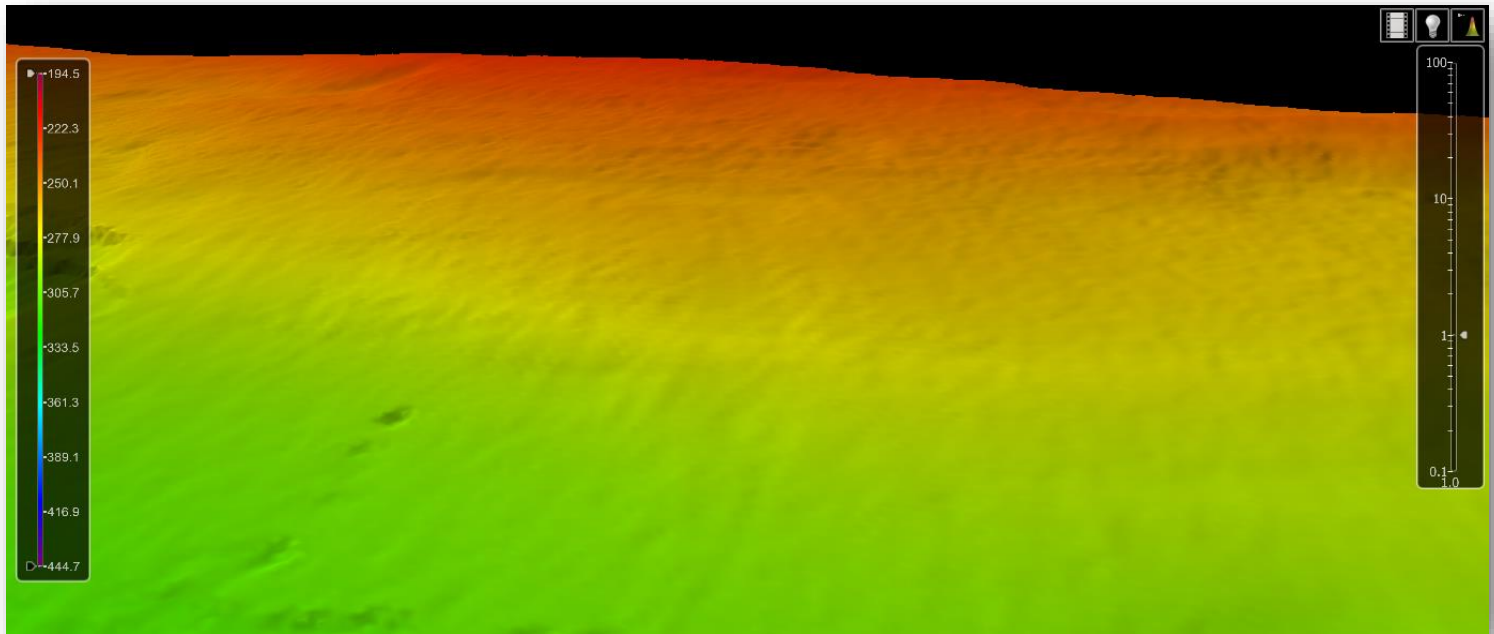


Figura 30 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.

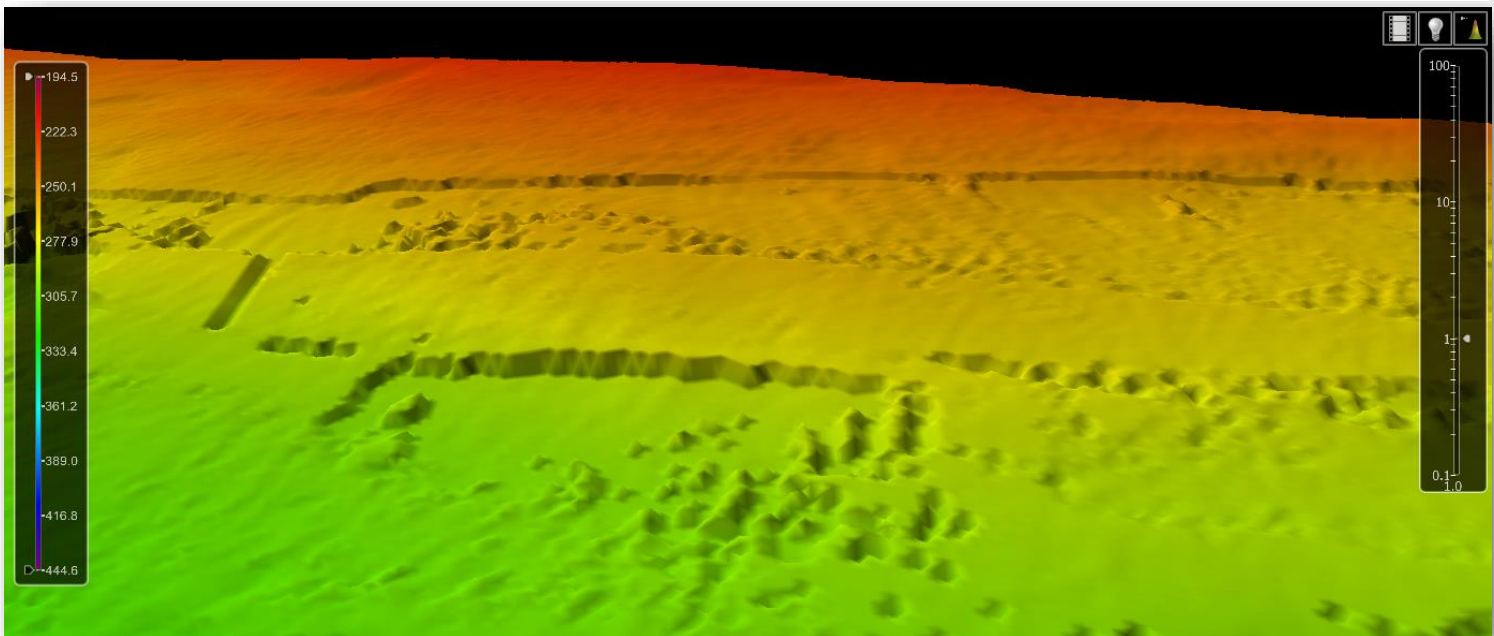


Figura 31 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.

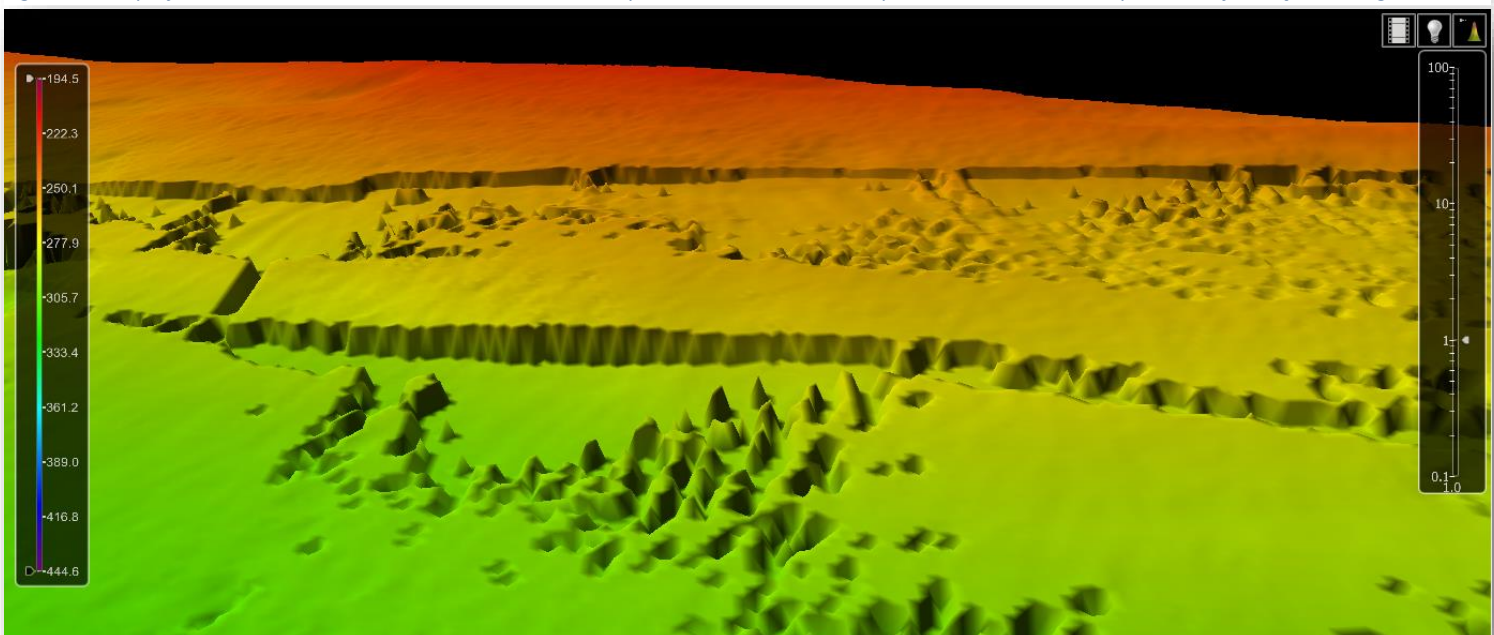


Figura 32 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou formação de degraus.

- Multiplicação de estruturas

Analisemos o seguinte artefato (Figura 34), gerado a partir de uma estrutura no dado (Figura 33):

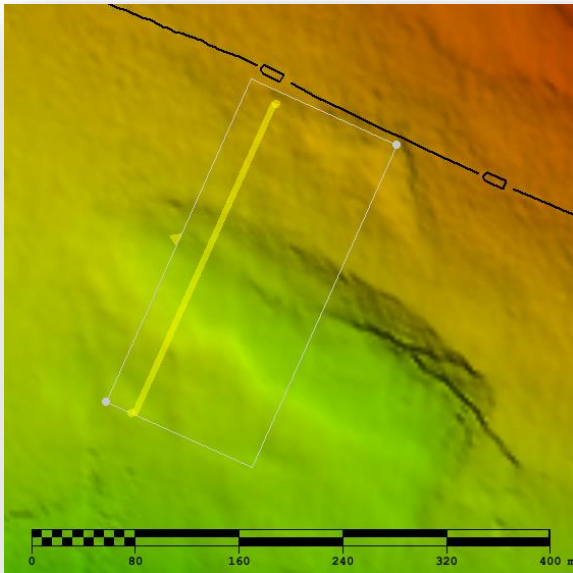


Figura 33 – Estrutura em formato de depressão relativa. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.

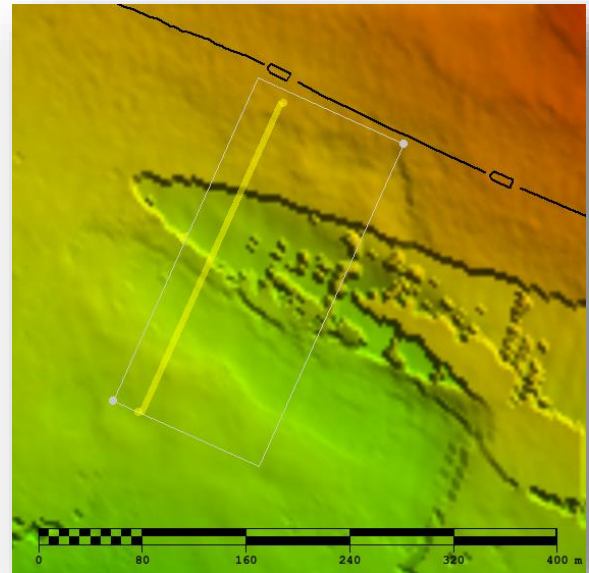


Figura 34 - Estrutura multiplicada, resultando em artefato. Em amarelo, o slice do Subset Editor. Escala horizontal em metros.

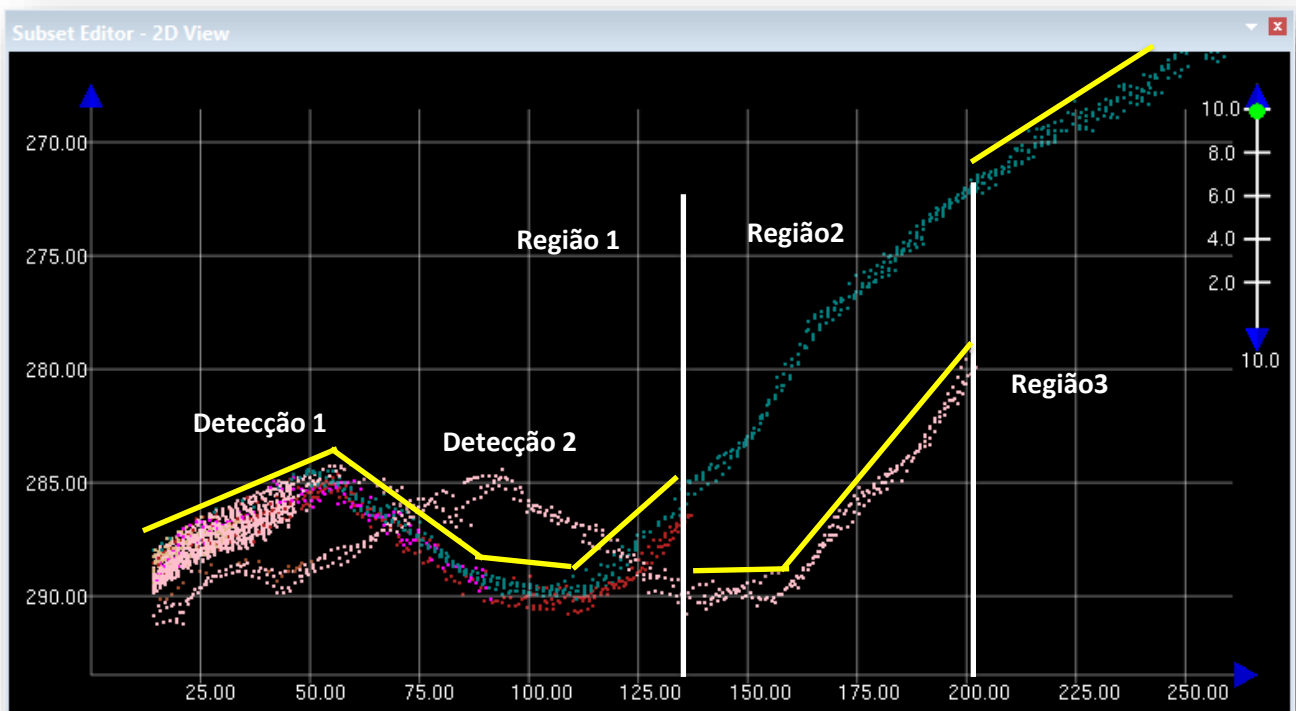


Figura 35 - Nuvem de pontos evidenciando a multiplicação de estruturas, acarretada pela dupla detecção. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical. Em amarelo, o fundo interpretado pelo CUBE como verdadeiro.

Visivelmente, ocorreu uma multiplicação de uma feição já existente, presente da Figura 33, sob o formato de uma pequena depressão. No *Subset Editor* (Figura 35) observamos que as detecções 1 e 2 detectaram a feição deslocadamente, em torno de 40m de diferença – ou seja, cada detecção deslocou a estrutura em 20m, em X e -X respectivamente. Na região 1, a detecção 1 prevaleceu como verdadeira pelo algoritmo CUBE, por conter maior densidade de dados. Na região 2, a detecção 2 foi registrada como o fundo verdadeiro, causando um degrau entre as regiões 1 e 2. Na região 3, a detecção 1 volta a ser identificada como a verdadeira, visto a ausência da detecção 2. Portanto, um outro degrau é formado entre as regiões 2 e 3. A linha amarela (Figura 35) demonstra o fundo interpretado pelo CUBE como verdadeiro.

Na Figura 34, é observado a presença de artefato de rugosidade, dentro do artefato da depressão. Novamente, isso ocorre devido a densidade de informação das detecções 1 e 2 serem muito similares (Figura 35, região 2), fazendo com que o algoritmo CUBE assumira ora a detecção 1, ora a detecção 2 como verdadeira – evidenciado na região 2.

Para compreender os efeitos da multiplicação de estruturas no ambiente tridimensional, foram geradas imagens no visualizador 3D do CARIS HIPS and SIPS. Foram utilizadas, para fins comparativos, a superfície de referência (Figura 36), superfície com +1m de erro em X (Figura 37), superfície com +10m de erro em X (Figura 38) e superfície com +20m de erro em X (Figura 39), sendo todas as superfícies simulando no sistema de posicionamento.

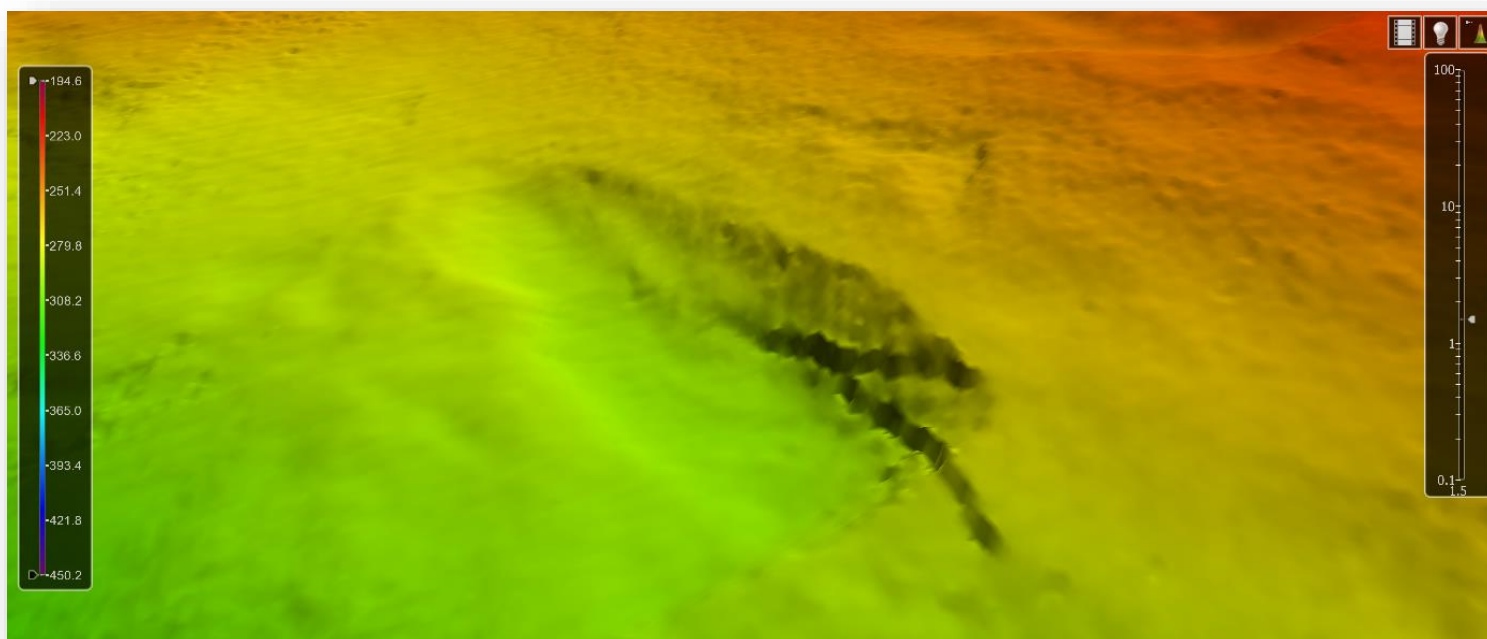


Figura 36 - Superfície de referência no visualizador 3D em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.

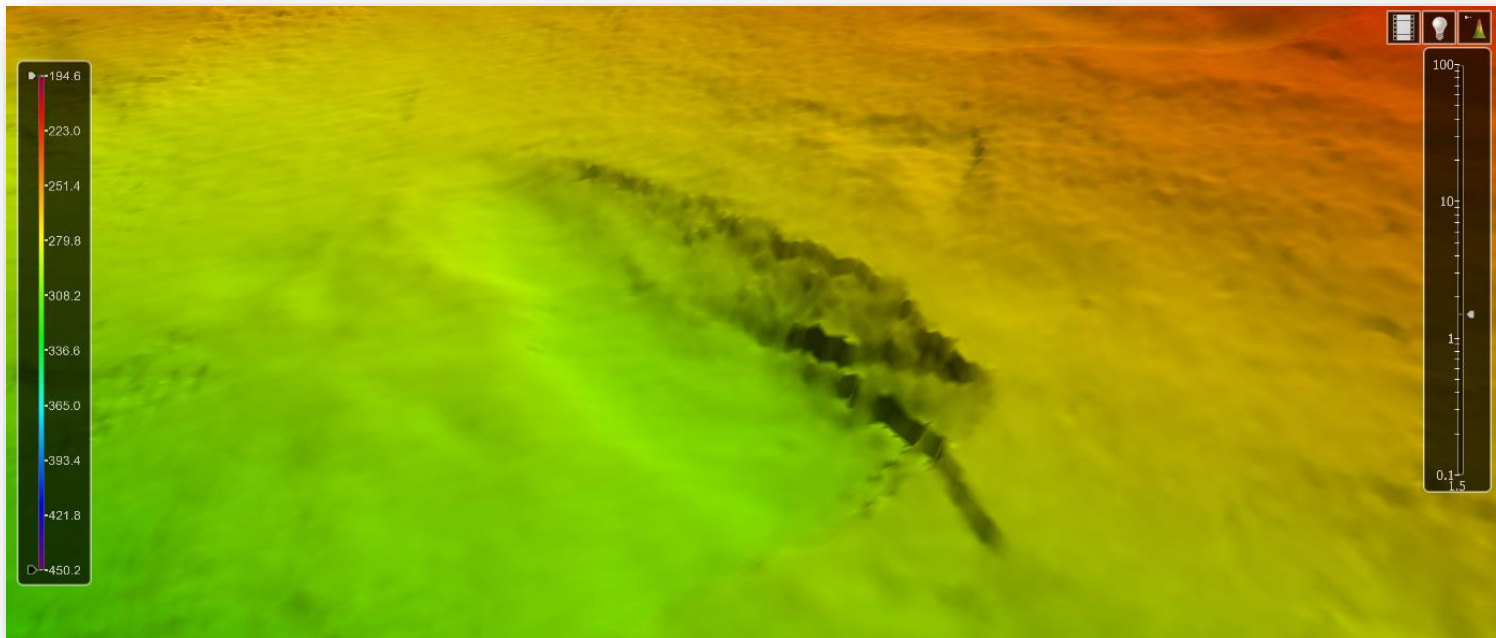


Figura 37 - Superfície com +1m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.

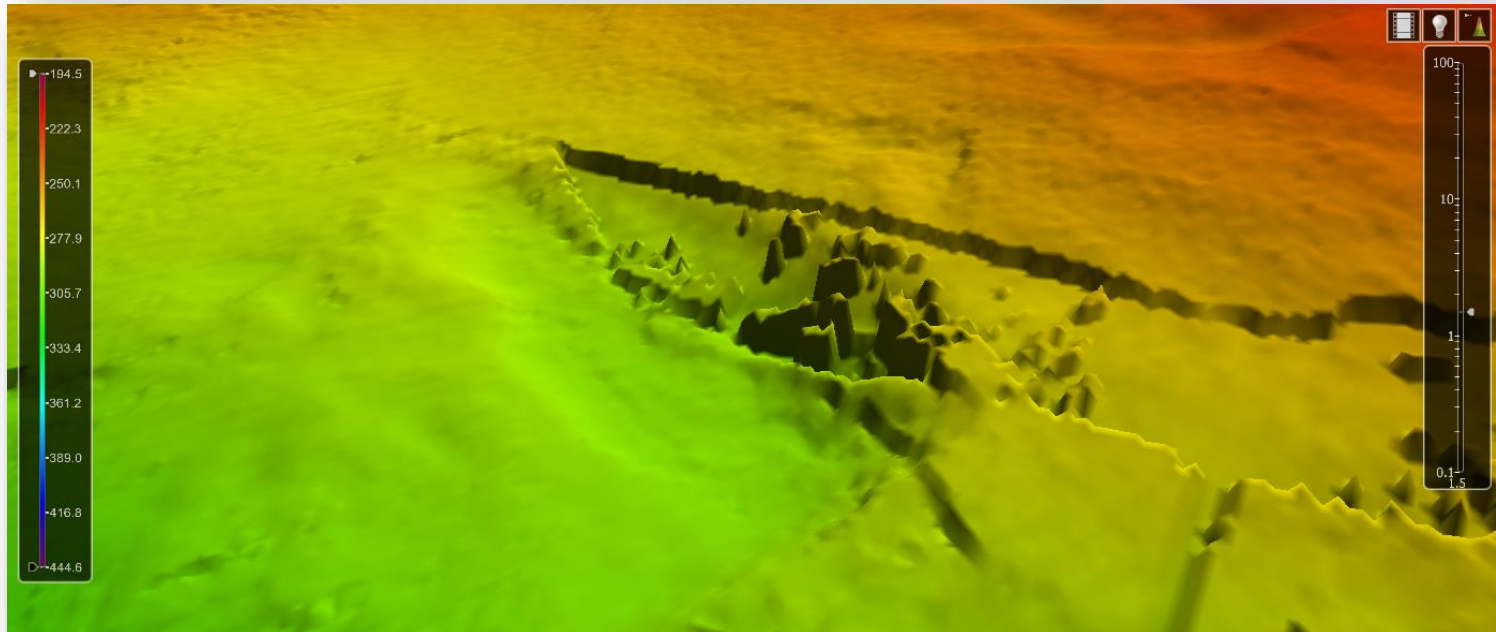


Figura 38 - Superfície com +10m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.

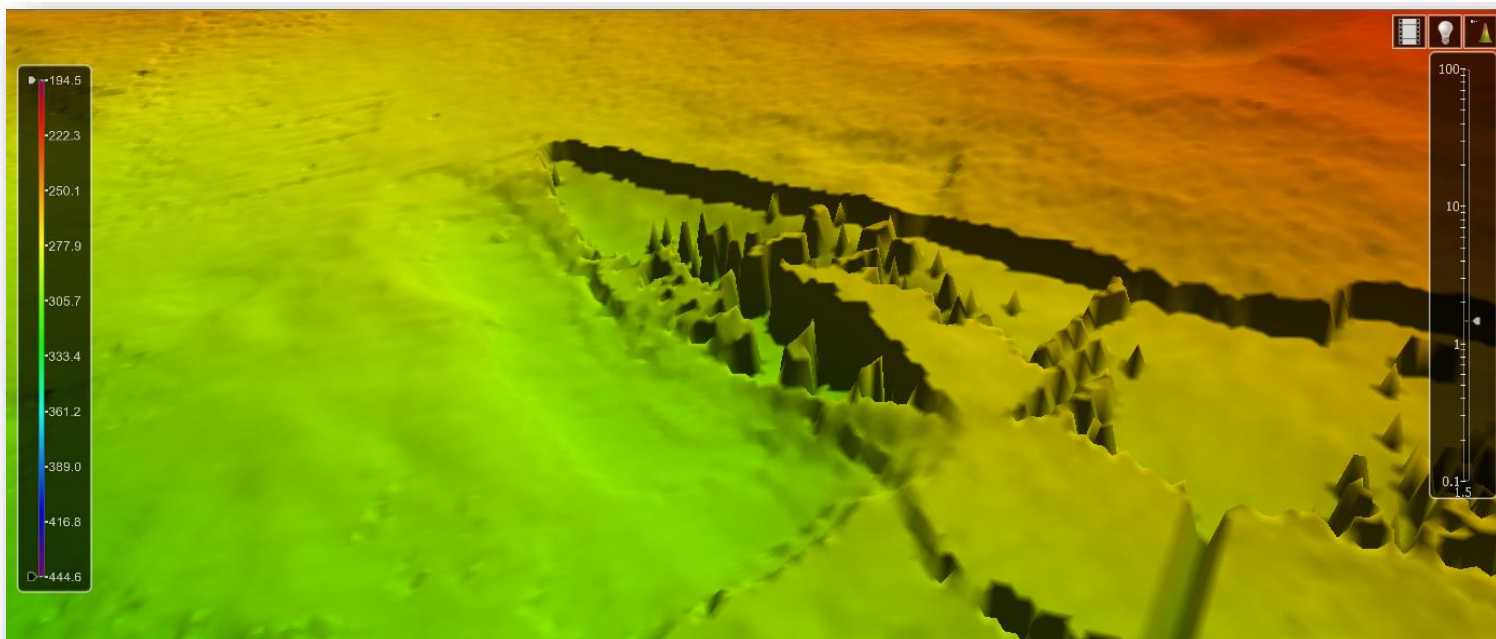


Figura 39 - Superfície com +20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento em área que, com erro induzido, apresentou multiplicação de estruturas.

- Alteração da medição da profundidade

Para avaliar as alterações na medição da profundidade do deslocamento do *offset* linear do sistema de posicionamento em X, foram simuladas superfícies de com erros de 1, 10 e 20 metros, superfícies diferença, traçados perfis, análise de nuvem de pontos e distribuição estatística dos erros.

Inicialmente, analisemos esta estrutura escarpada do fundo marinho (Figura 40):

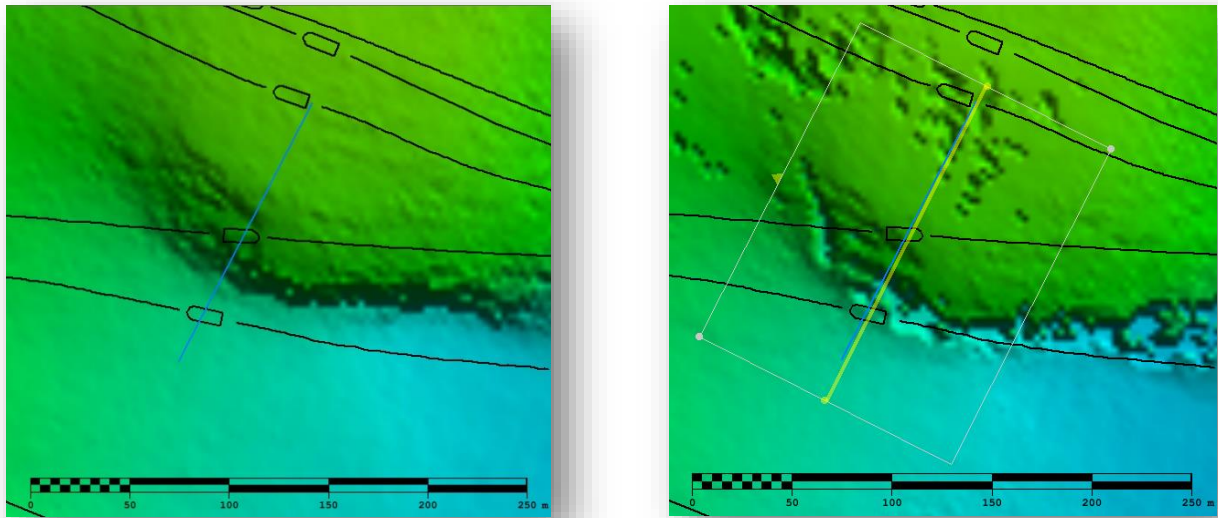


Figura 40 - Exemplo de estrutura a ser analisada, a qual foi traçado perfil (linha azul) e analisado o subset editor (linha amarela). Escala horizontal em metros.

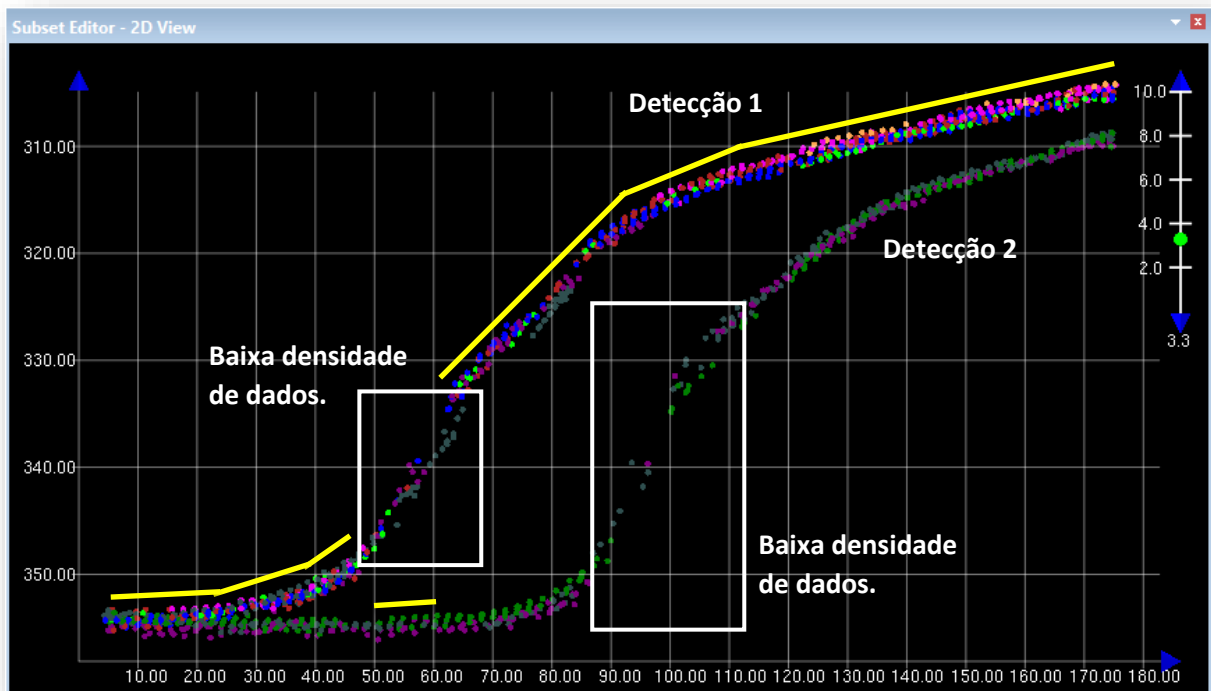


Figura 41 - Nuvem de pontos que evidencia a dupla detecção da estrutura escarpada da Figura 40. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.

Pela nuvem de pontos (Figura 41) observamos a clara dupla detecção, com 40 metros de espaçamento entre as detecções. Novamente, a detecção superior possui maior densidade de dados – mais linhas passam de leste para oeste que de oeste para leste.

Observa-se a presença de um degrau na região da escarpa. Isso ocorre pelas diferentes densidades de informação nas detecções 1 e 2 da Figura 41, demarcadas na própria figura. Quando a detecção 1 apresenta baixa densidade de dados, fruto de um alto ângulo de incidência no fundo (reduzindo a força do retroespalhamento), a superfície detecta a detecção como o fundo verdadeiro – e vice e versa.

A linha azul traçada na Figura 40 indica um perfil feito (Figura 42), através da ferramenta *Digitizer Profile*, das camadas da referência (linha preta), de +1 metro de erro em X (linha amarela), +10 metros de erro em X (linha laranja) e +20 metros de erro em X (linha vermelha).

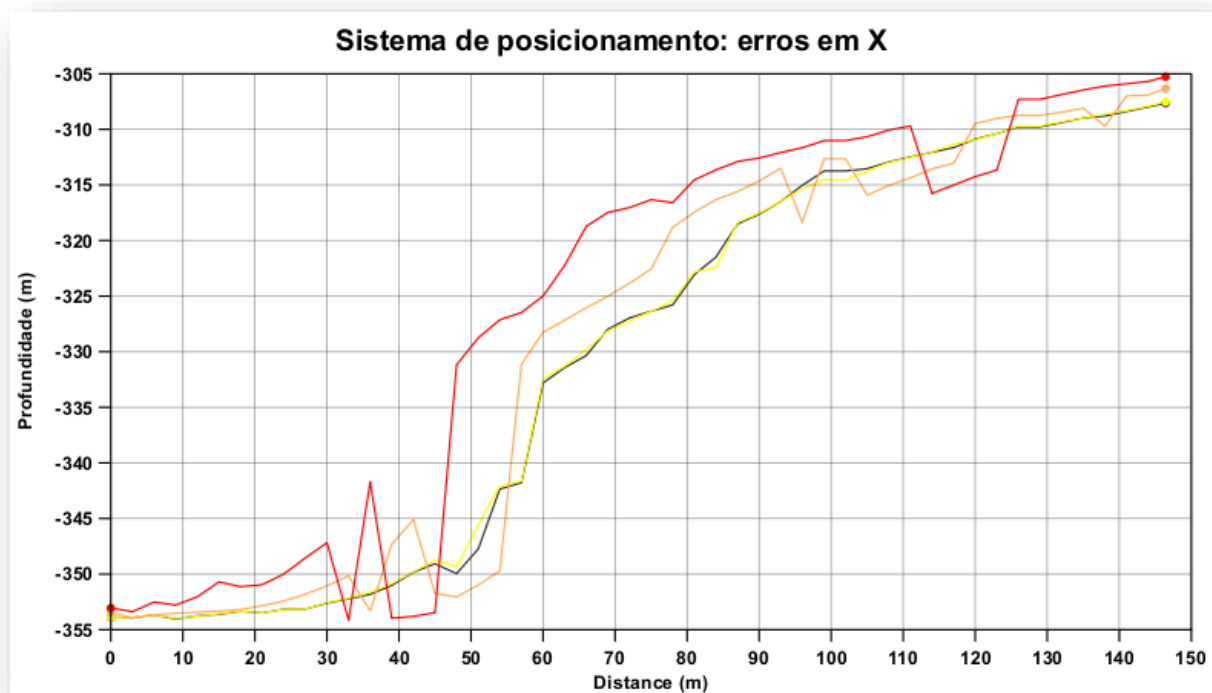


Figura 42 - Perfil da estrutura escarpada da Figura 40, demonstrando as diferentes detecções de fundo das superfícies com +1m (linha amarela), +10m (linha laranja) e +20m (linha vermelha) em relação à superfície de referência (linha preta).

Nota-se que a gradação dos erros em X afetou crescentemente as medições de profundidade. Esse fenômeno ocorre diretamente relacionado com a presença de escarpas e outras heterogeneidades do fundo marinho. Uma escarpa deslocada, como no exemplo, causa uma diferença muito grande na medição de profundidade caso tenha sido transladada para um fundo mais raso. Em contrapartida, vemos que há pouca ou quase nenhuma alteração na

medição da profundidade em regiões planas, não inclinadas e homogêneas, como observado no início e fim do gráfico da Figura 42.

Mais detalhadamente podemos observar que há um comportamento, principalmente da linha vermelha, destoante em dois momentos do padrão de relevo marinho real. Eles coincidem com o fenômeno da rugosidade, visíveis na Figura 20, tanto no topo do relevo quanto em sua escarpa. Normalmente, é de se esperar o efeito de rugosidade em escarpas, devido ao ângulo de incidência do feixe do ecobatímetro com a superfície – ângulos mais agudos tendem retornar uma quantidade e intensidade menor de dados, no sentido do retroespalhamento. Tal efeito de rugosidade em escarpas frequentemente, como o dado exemplo demonstra, resulta no surgimento de um degrau.

Para entender a distribuição geográfica dos erros de profundidade nos dados apresentados, foram calculadas superfícies diferença, com +1 (Figura 44), +10 (Figura 45) e +20 (Figura 46) metros de erro em X. Cada superfície com erro induzido foi subtraída da superfície de referência (Figura 18), e seu residual foi obtido.

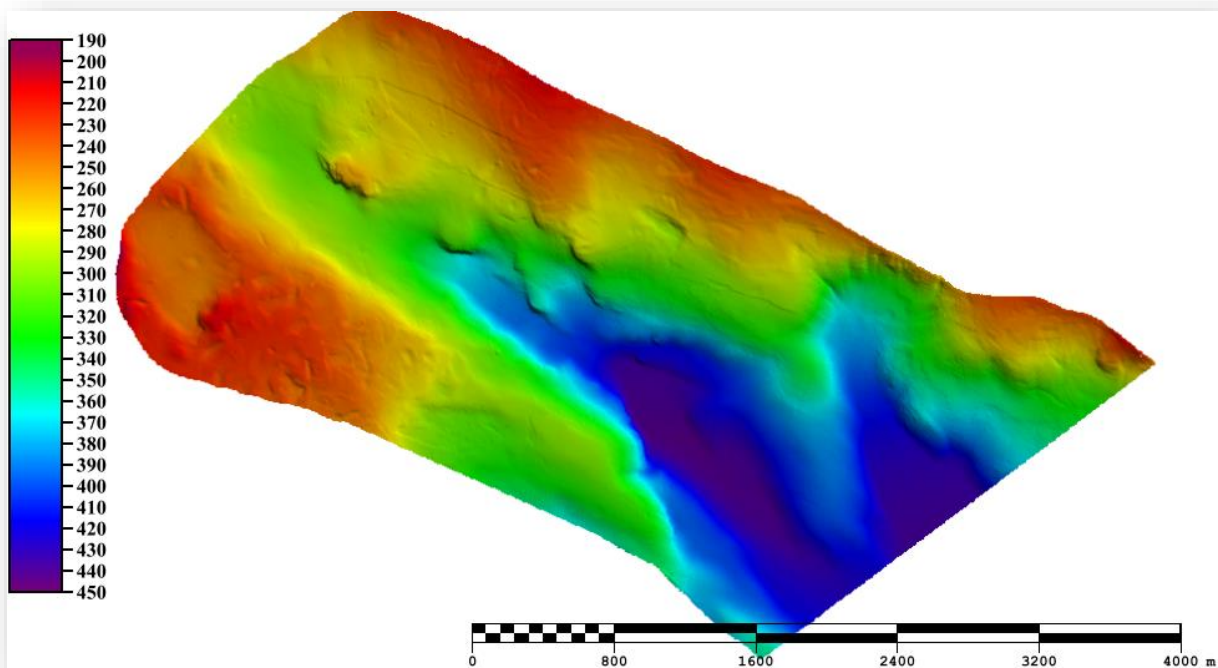


Figura 43 - Superfície de referência.

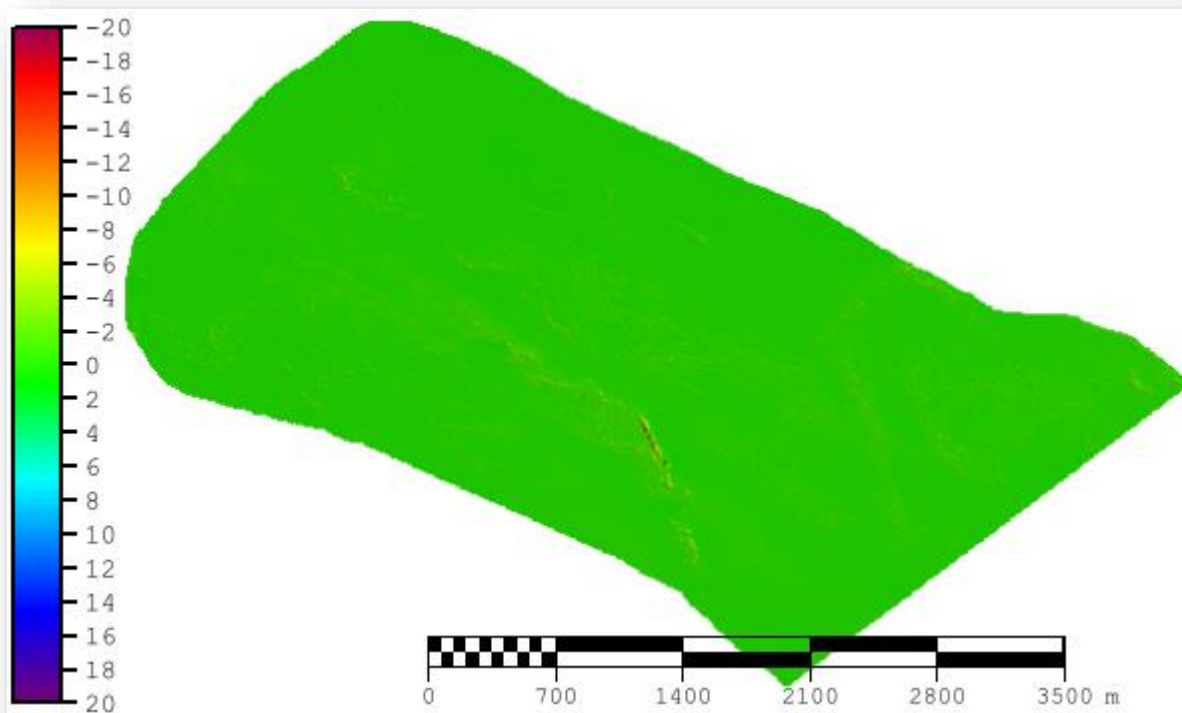


Figura 44 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +1m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

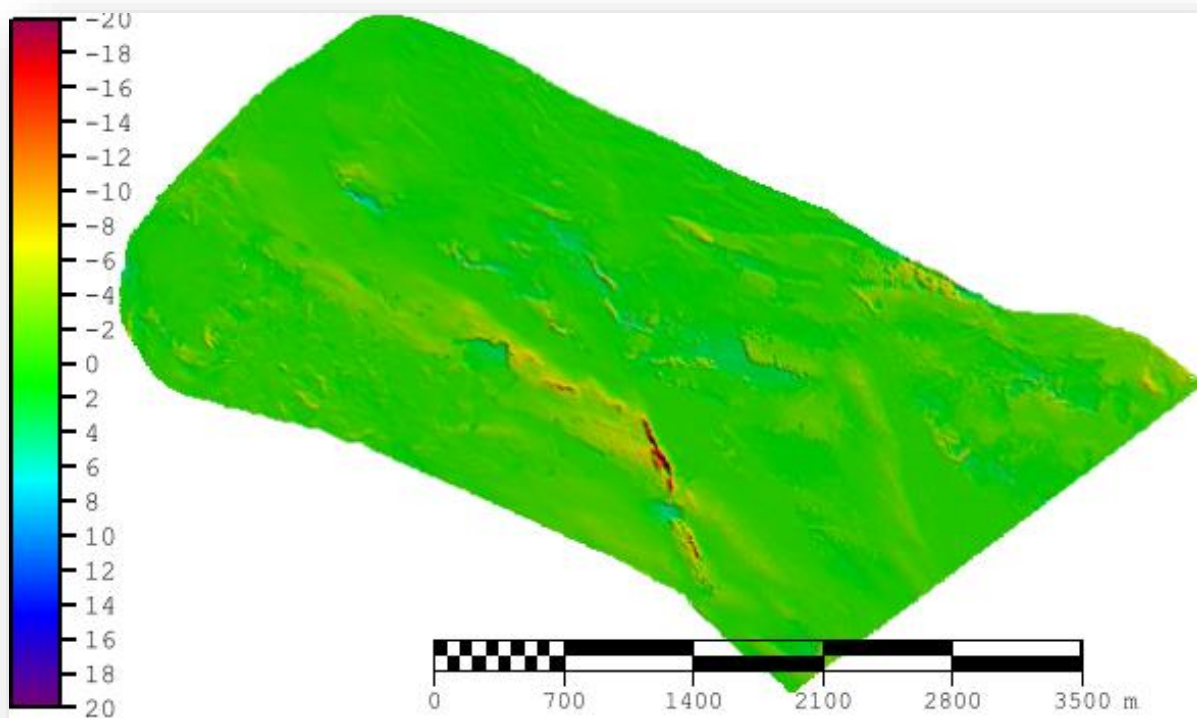


Figura 45 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +10m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

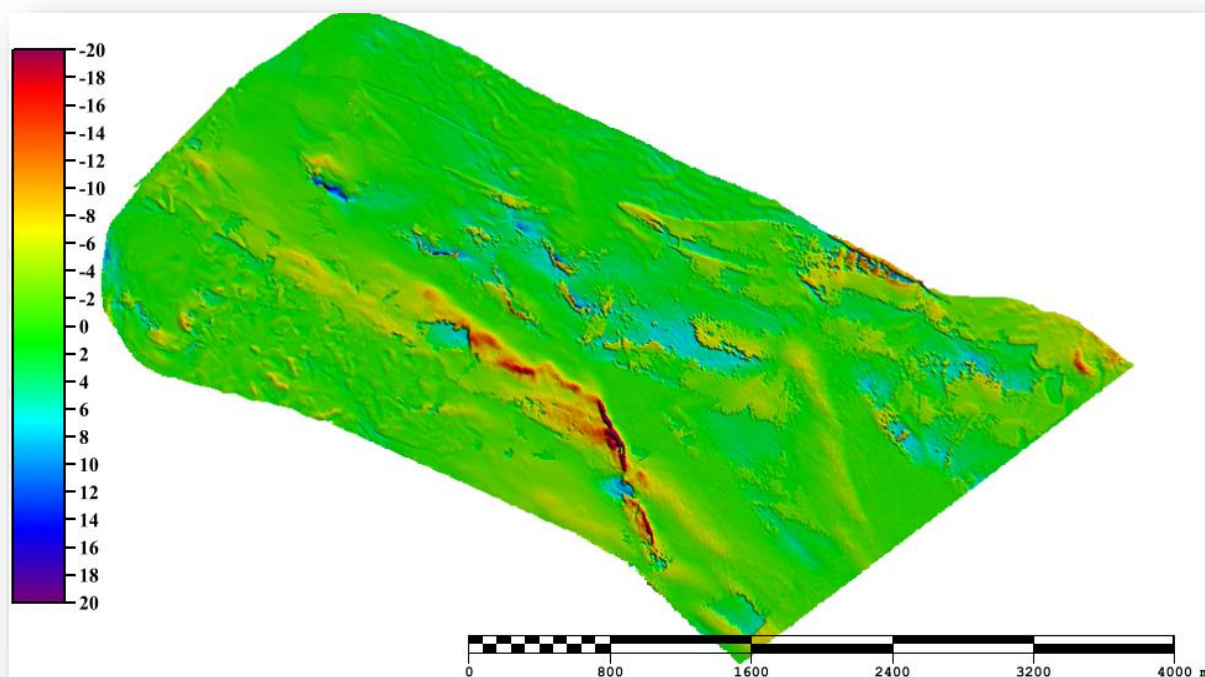


Figura 46 – Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície com +20m de erro em X no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

Como já esperado, os maiores erros foram associados às regiões mais escarpadas, enquanto as regiões planas apresentaram erros próximos de zero. Como se trata de erros associados ao eixo X, a superfície diferença exibiu altos valores em regiões com gradiente alto em X, ou seja, perpendicular em relação as linhas de navegação.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do sistema de navegação em X afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de X+1m (Figura 47), X+10m (Figura 48) e X+20m (Figura 49). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 50. Para visualizar mais precisamente as distribuições, foi criada uma tabela com percentis a cada 2,5% (Anexo A).

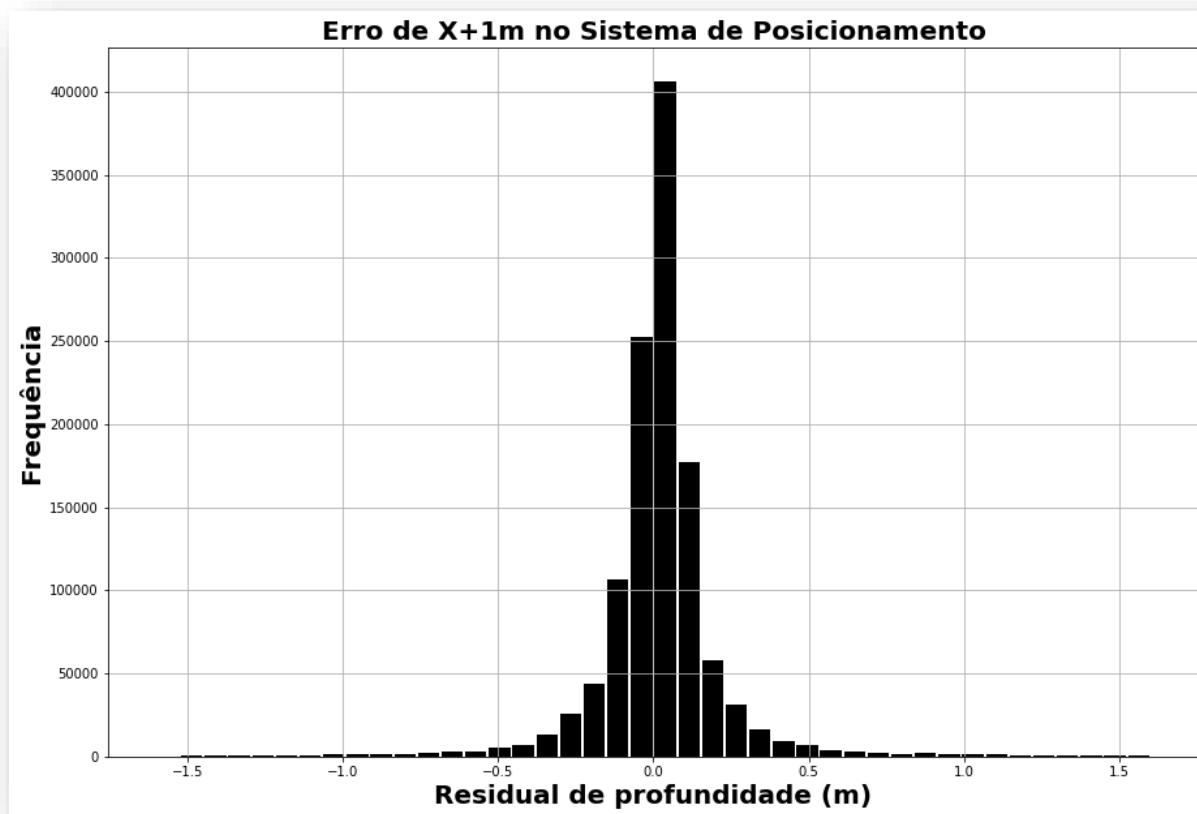


Figura 47 – Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no sistema de posicionamento.

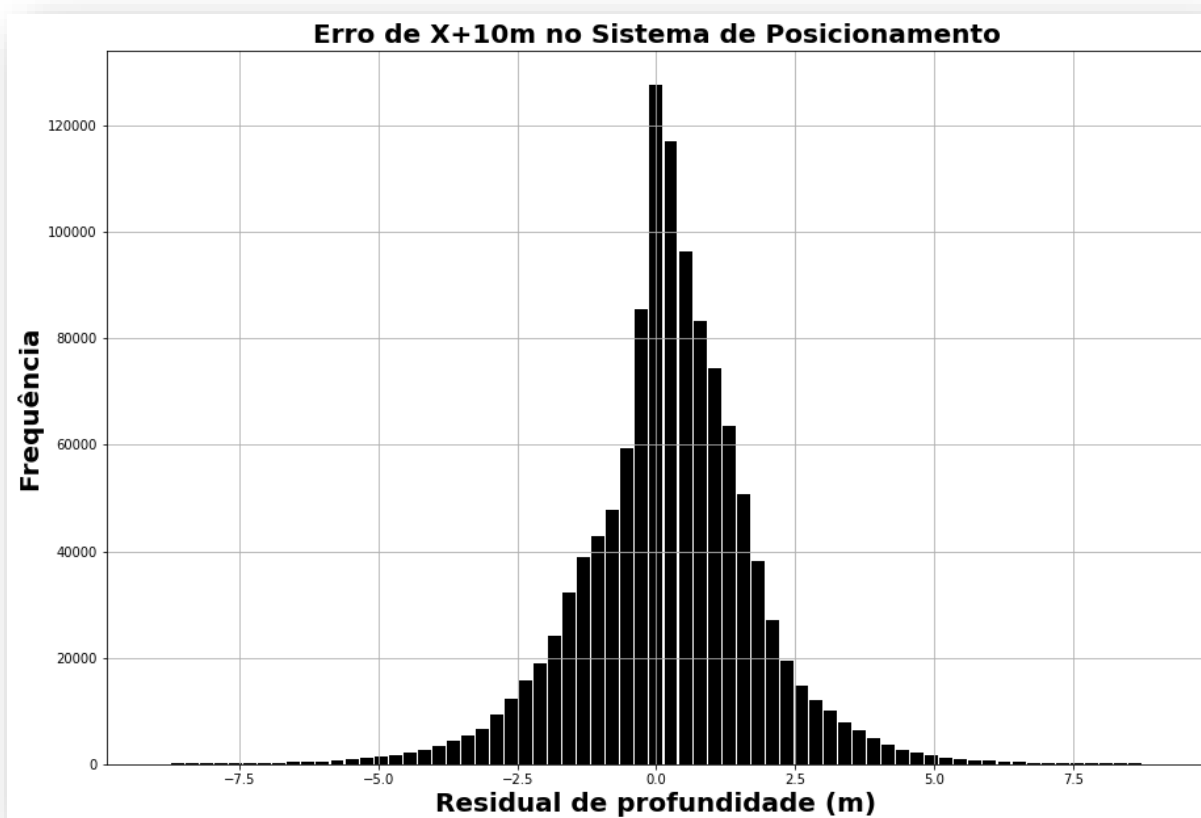


Figura 48 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no sistema de posicionamento.

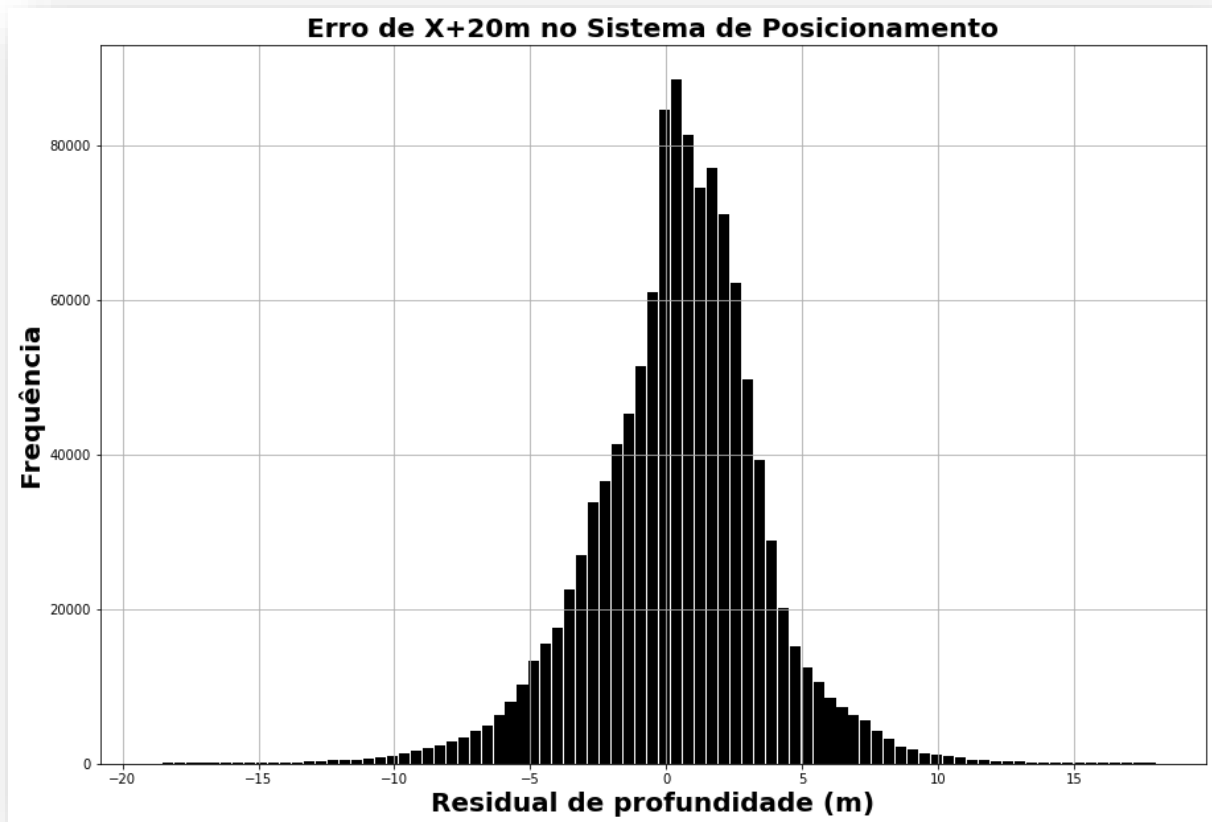


Figura 49 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+20m induzidos no sistema de posicionamento.

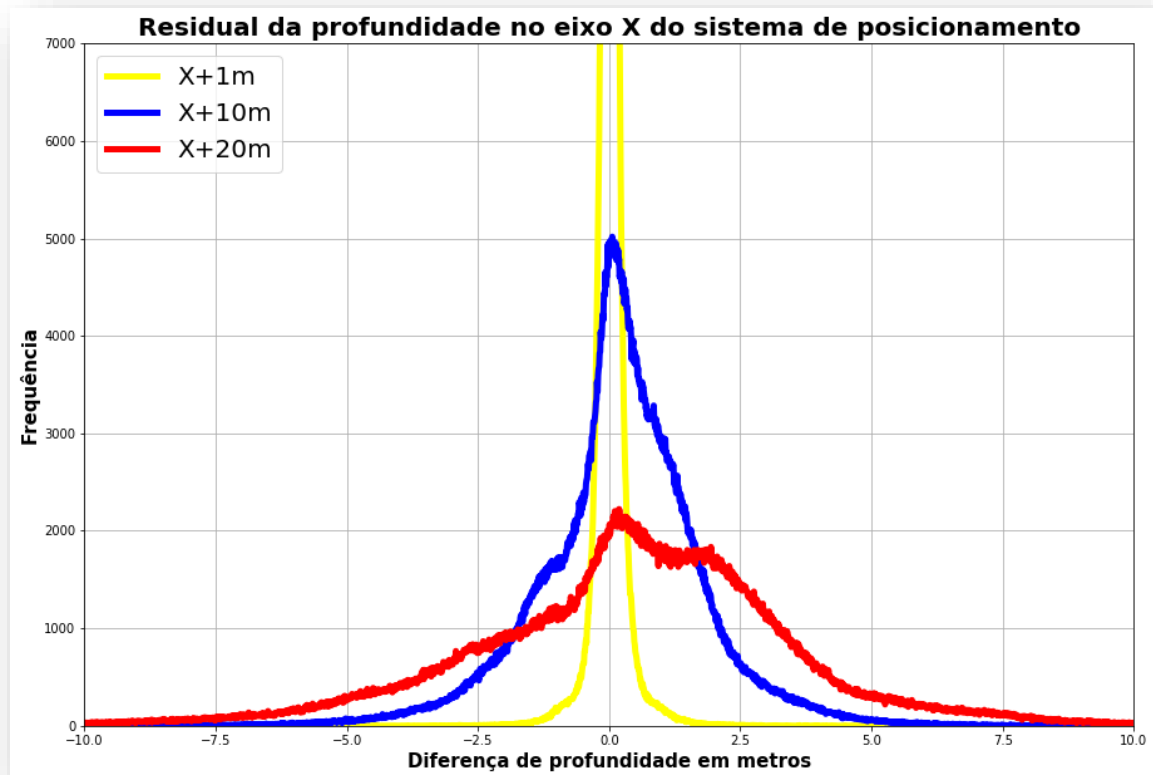


Figura 50 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X, sob mesma escala, no sistema de posicionamento.

Através dos histogramas (Figura 47, Figura 48 e Figura 49), é observado que o residual atinge, naturalmente, magnitudes maiores conforme aumentamos o erro. Há, de forma geral, uma moda próxima de 0, como bem evidenciado na Figura 50, que significa que a maior parte do dado não sofreu alterações na medição da profundidade. Ou seja, a moda indica que há predominância de regiões planas de baixo gradiente, onde erros de até +20m não foram capazes de causar qualquer erro na medição da profundidade. Analogamente temos que as grandes magnitudes do residual, representadas no histograma, representam as grandes escarpas, que não possuíram grande relevância estatística. Há a predominância de planos de baixo gradiente no dado. É observado, também, um leve desvio na distribuição dos dados para a direita (Figura 50).

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 51, Figura 52 e Figura 53), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

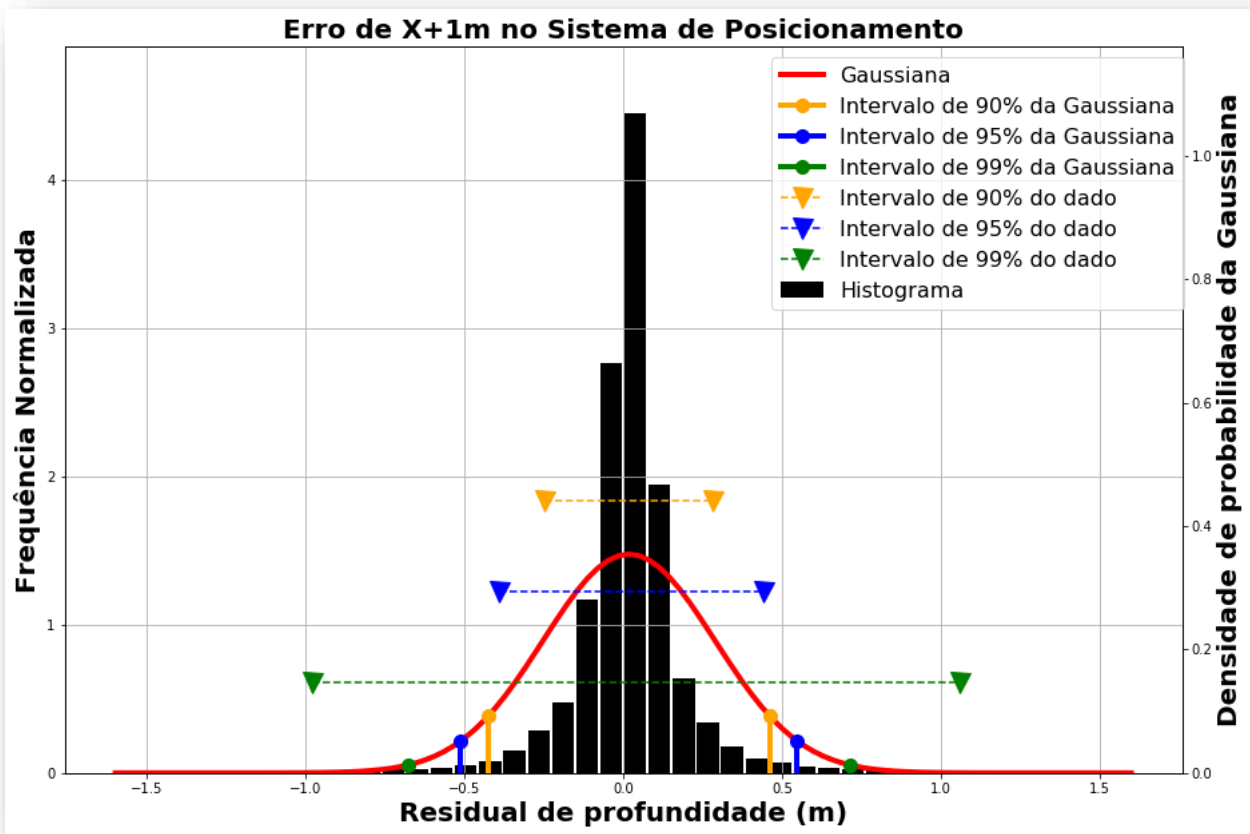


Figura 51 – Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no sistema de posicionamento.

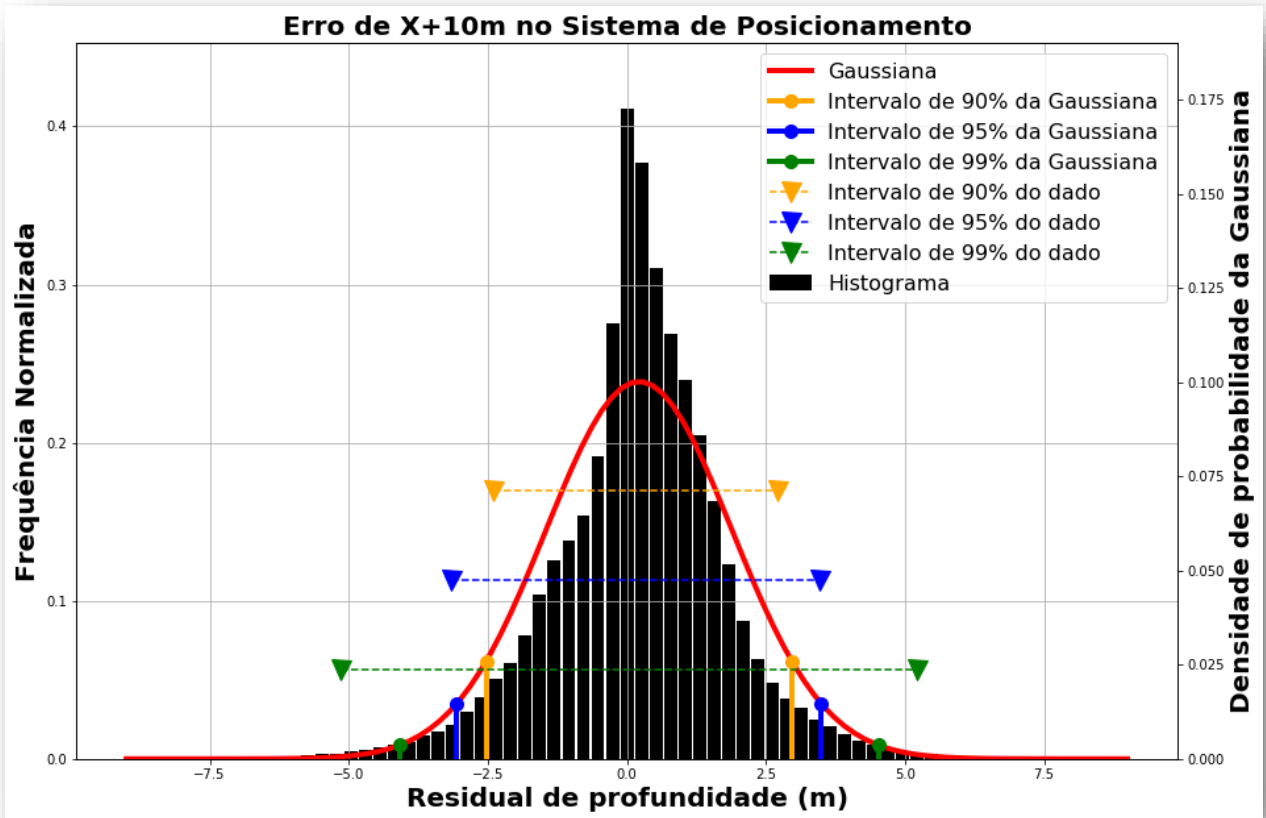


Figura 52 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no sistema de posicionamento.

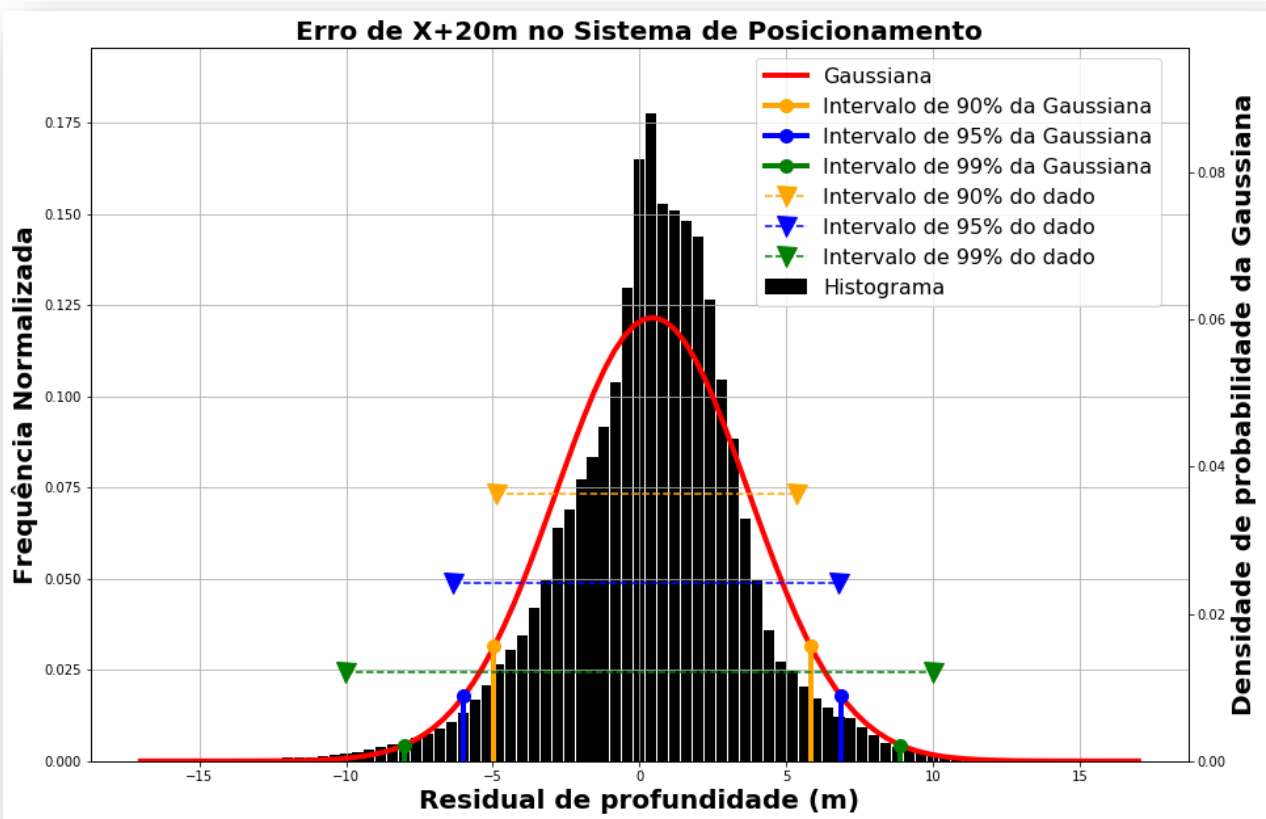


Figura 53 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no sistema de posicionamento.

Nos histogramas com suas devidas gaussianas plotadas (Figura 51, Figura 52 e Figura 53), é possível entender melhor e comparativamente a distribuição dos dados. Conforme o erro aumenta, a gaussiana se ajusta melhor no histograma dos residuais. O desvio para a direita na distribuição dos dados, mencionado anteriormente, agora é mais bem visualizado. Observa-se que os intervalos do dado e da gaussiana tendem a coincidir mais conforme aumentamos o erro. Nota-se, também, que todos intervalos do dado de 99% estão centrados em residuais de profundidade mais distantes em relação ao eixo Y do que o intervalo da gaussiana. Ou seja: as escarpas no dado, que apresentam maior magnitude de residual de profundidade, apresentam maior peso estatístico do que o previsto pela gaussiana. Analogamente, os residuais de profundidade que se aproximam do valor 0 possuem peso estatístico muito maior do que o previsto pela gaussiana ou seja: é confirmada a predominância, no dado, de planos com baixo gradiente.

6.2.2) Alteração no Eixo Y do Sistema de Navegação

Análogo às simulações lineares de *offset* do sistema de navegação no eixo X, os erros aplicados no eixo Y possuem total similaridade. Os mesmos fenômenos de rugosidade, formação de degraus, multiplicação/deslocamento de estruturas e alterações na medição da profundidade são presentes. A única diferença é o eixo de ocorrência desses erros. Portanto, ao analisar o *Subset Editor*, é necessário criar *slices* paralelos em relação às linhas de navegação, diferindo das análises no eixo X, que possuem *slices* perpendiculares em relação às linhas de navegação.

Abaixo, no exemplo de estrutura (Figura 54) são observados os mesmos erros encontrados no eixo X. Com o *slice* paralelo à navegação, é observado o fenômeno da dupla detecção do fundo marinho, deslocamento de estruturas, rugosidade e formação de degraus (Figura 55). Os degraus, neste caso, estão associados à escarpa, como exposto no *Subset Editor*.

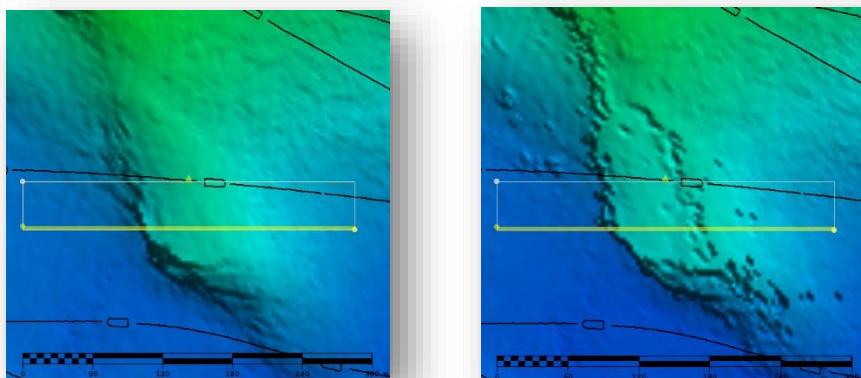


Figura 54 - Em amarelo e paralelo às linhas de navegação, o slice do Subset Editor. Exemplo de estrutura com escarpa em formato de degrau. Escala horizontal em metros.

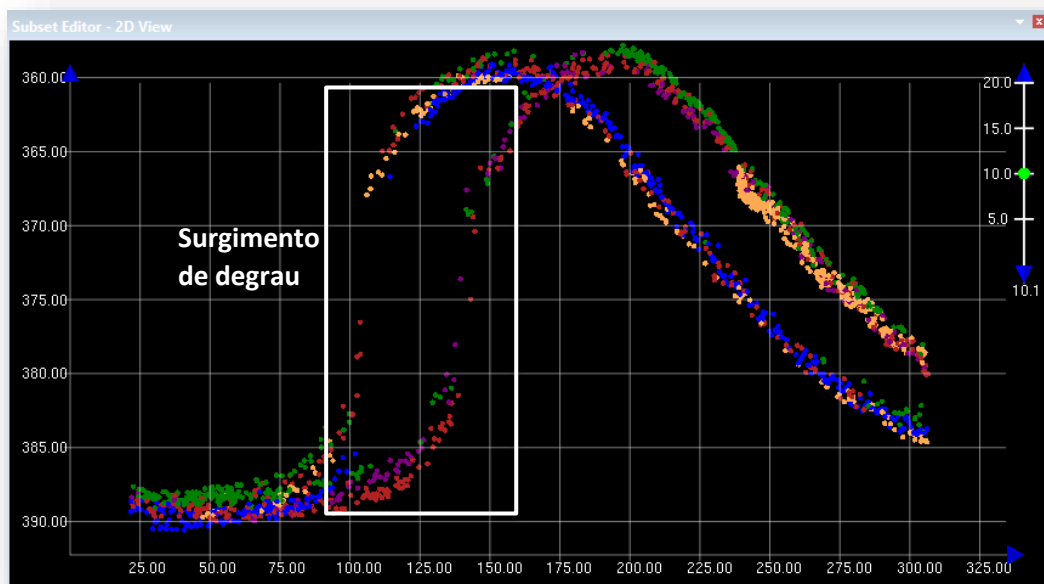


Figura 55 - Nuvem de pontos evidenciando dupla detecção, que ocasiona degrau na região da escarpa. Escalas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.

Ainda no eixo Y, para confirmar a completa similaridade com o comportamento dos erros no eixo X, foram criadas superfícies diferença, da superfície de referência (Figura 18) reduzida de cada uma das superfícies com +1 (Figura 57), +10 (Figura 58) e +20 (Figura 59) metros de erro em Y. Novamente, são observados valores significativos na diferença da medição da profundidade nas regiões escarpadas. Comparando com a Figura 46, os erros em Y afetam mais as escarpas orientadas paralelamente em relação às linhas de navegação, enquanto os erros em X afetam mais escarpas orientadas perpendicularmente em relação às linhas de navegação.

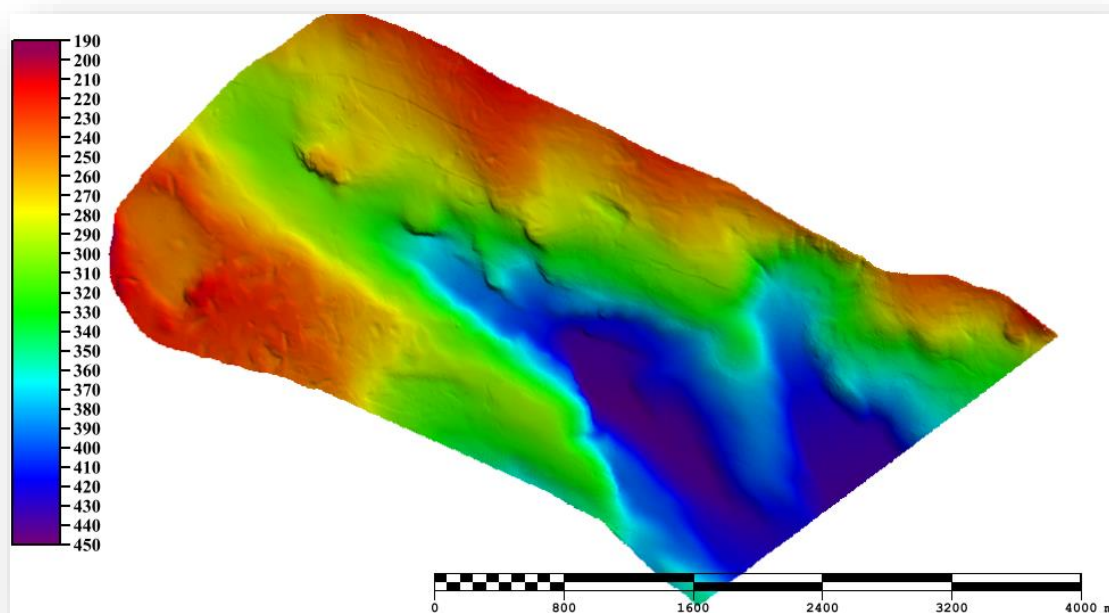


Figura 56 - Superfície de referência.

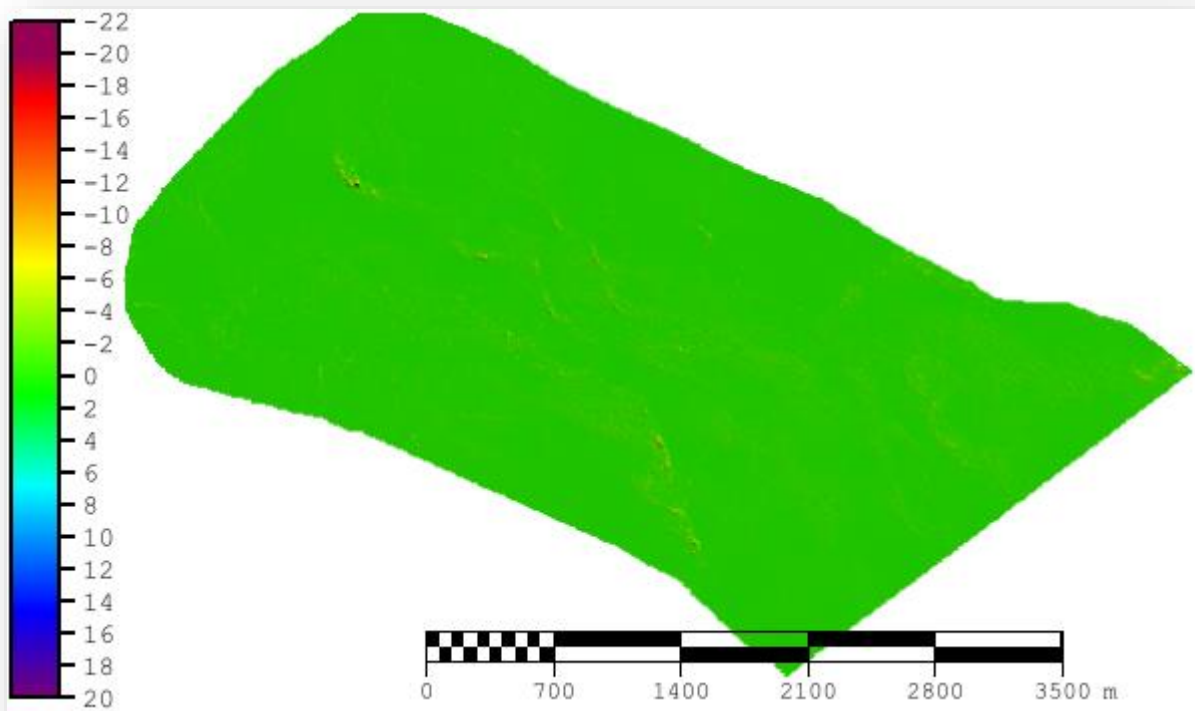


Figura 57 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +1m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

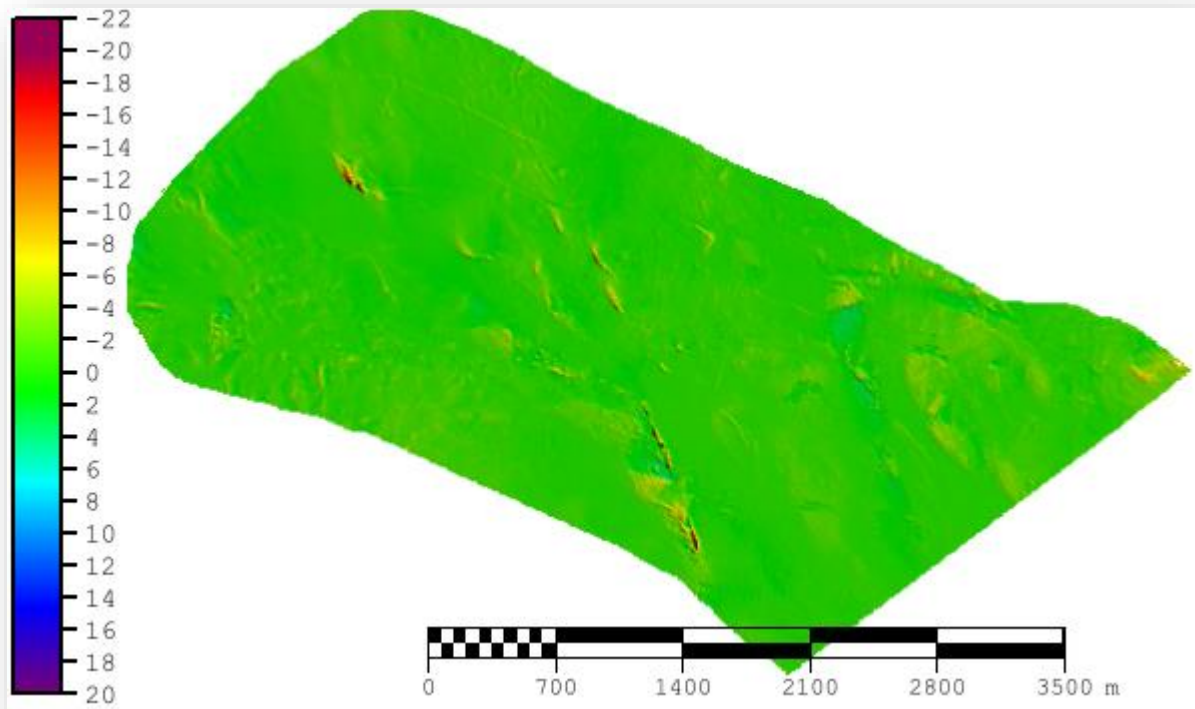


Figura 58 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +10m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

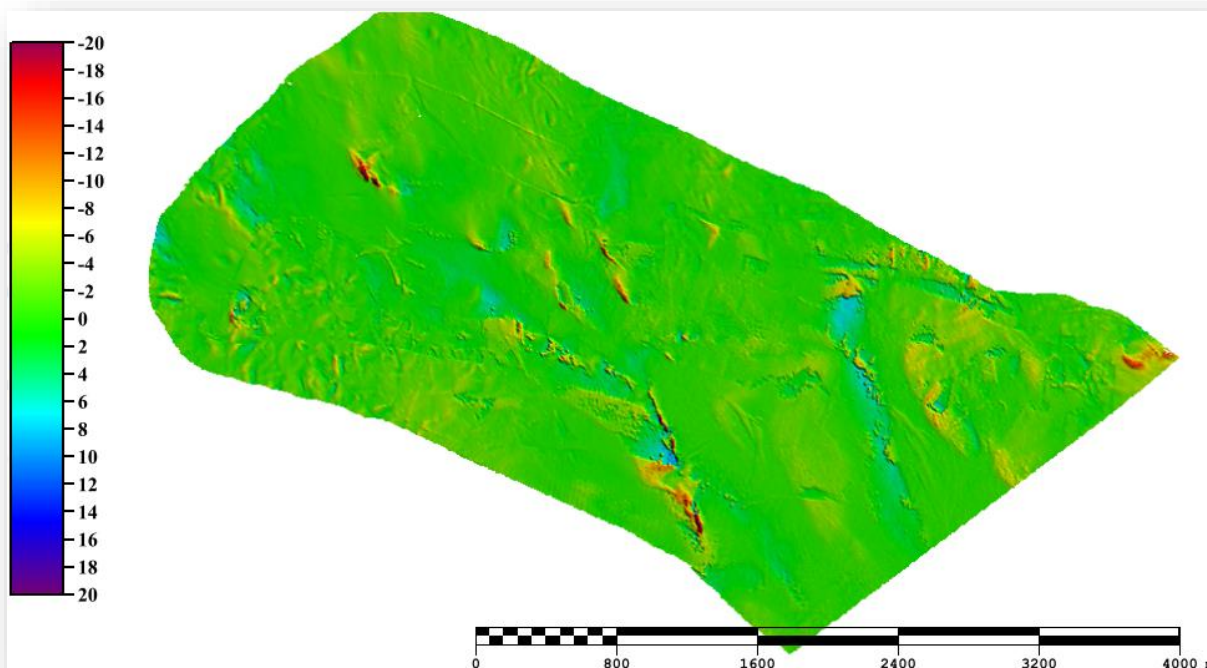


Figura 59 - Superfície diferença: (Superfície de referência) - (superfície simulada com +20m de erro no eixo Y, no sistema de posicionamento) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do sistema de navegação em Y afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de Y+1m (Figura 60), Y+10m (Figura 61) e Y+20m (Figura 62). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 63. Para visualizar mais precisamente as distribuições, foi criada uma tabela com percentis a cada 2,5% (Anexo B).

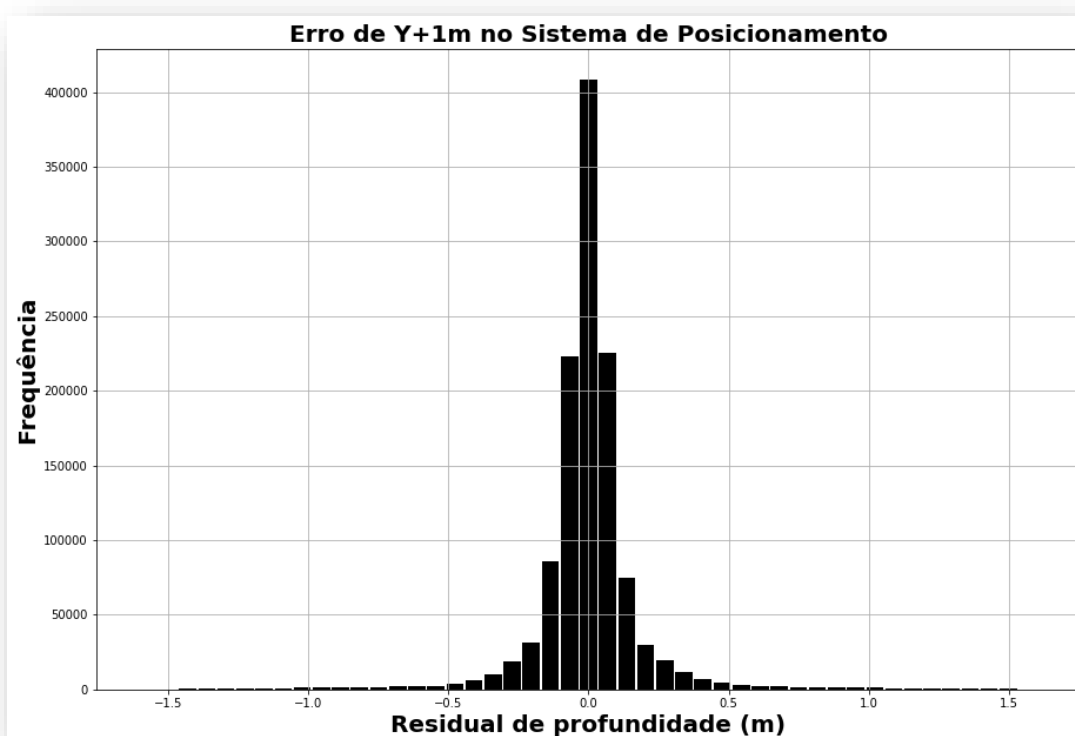


Figura 60 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no sistema de posicionamento.

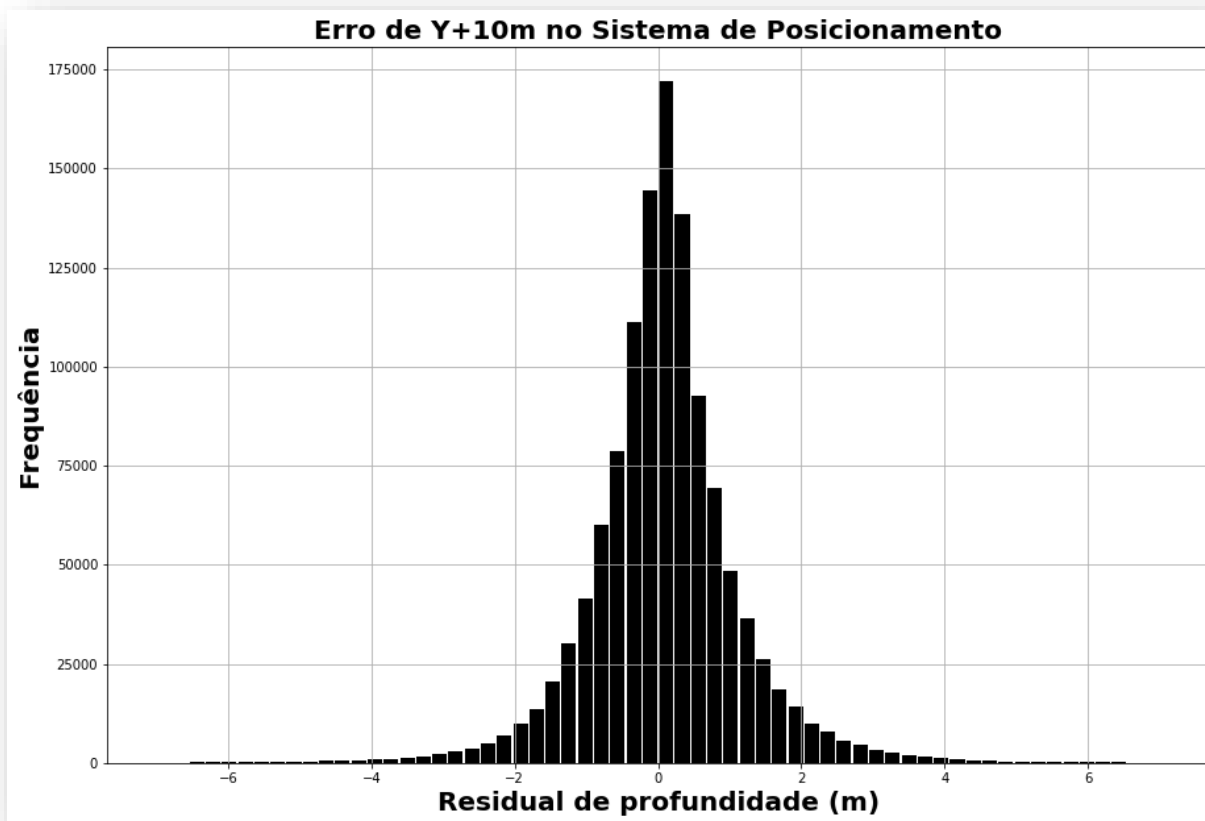


Figura 61 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no sistema de posicionamento.

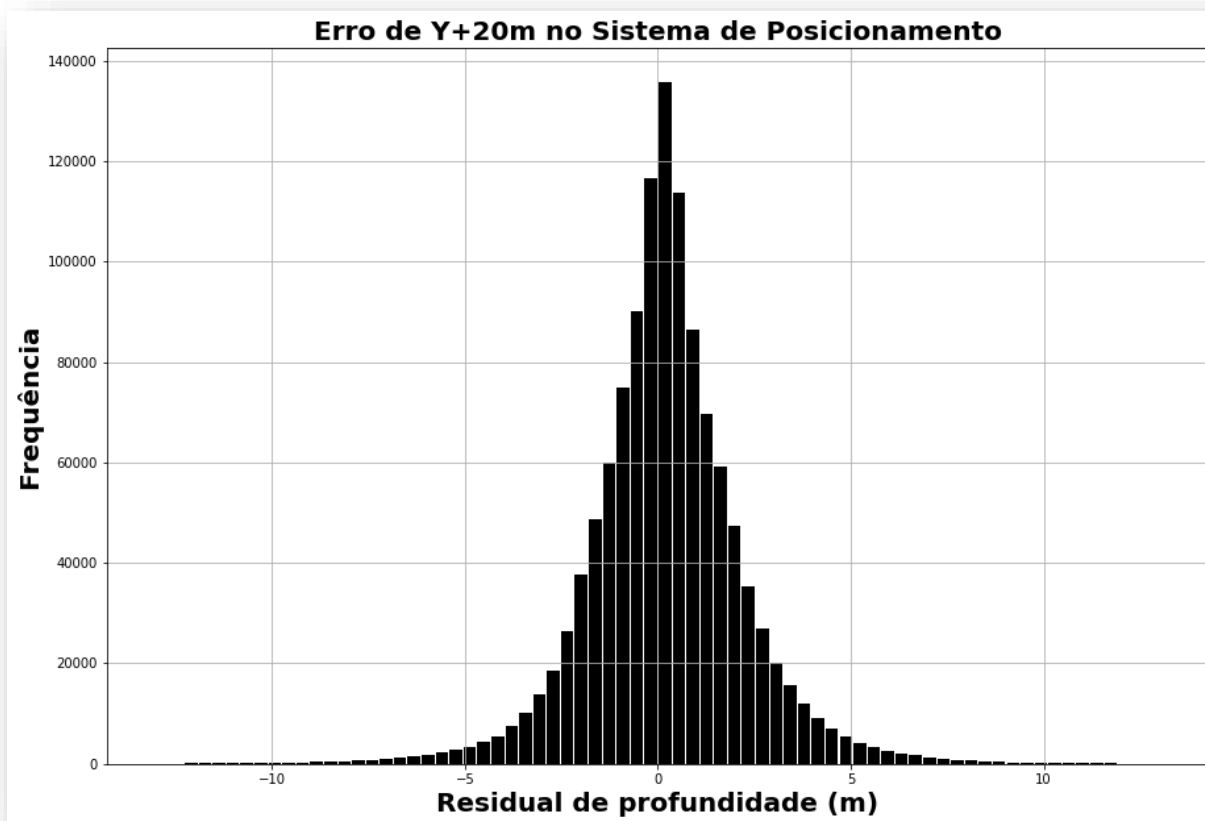


Figura 62 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no sistema de posicionamento.

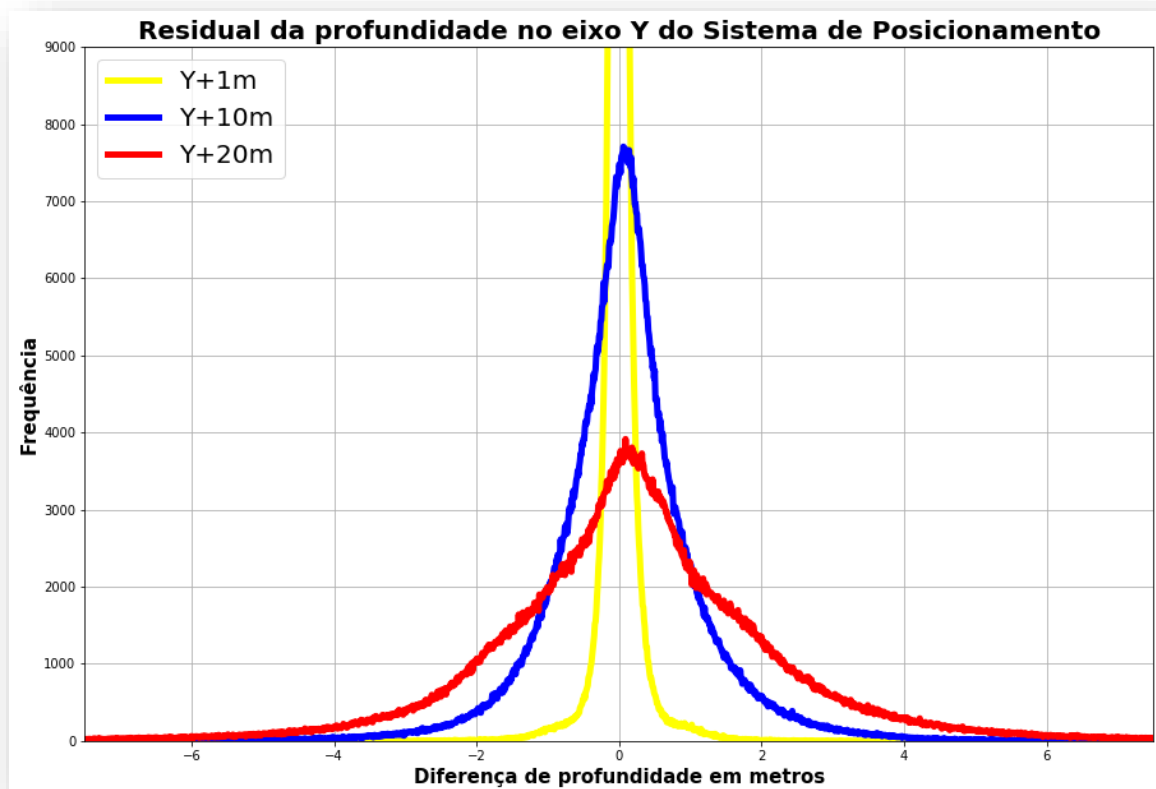


Figura 63 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no sistema de posicionamento.

Os histogramas apresentados pelas Figura 60, Figura 61 e Figura 62 apresentaram resultado semelhante ao deslocamento do sistema de posicionamento em X. A diferença é que, observando a Figura 63, a moda dos residuais não sofre um leve desvio para a direita.

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 64, Figura 65 e Figura 66), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

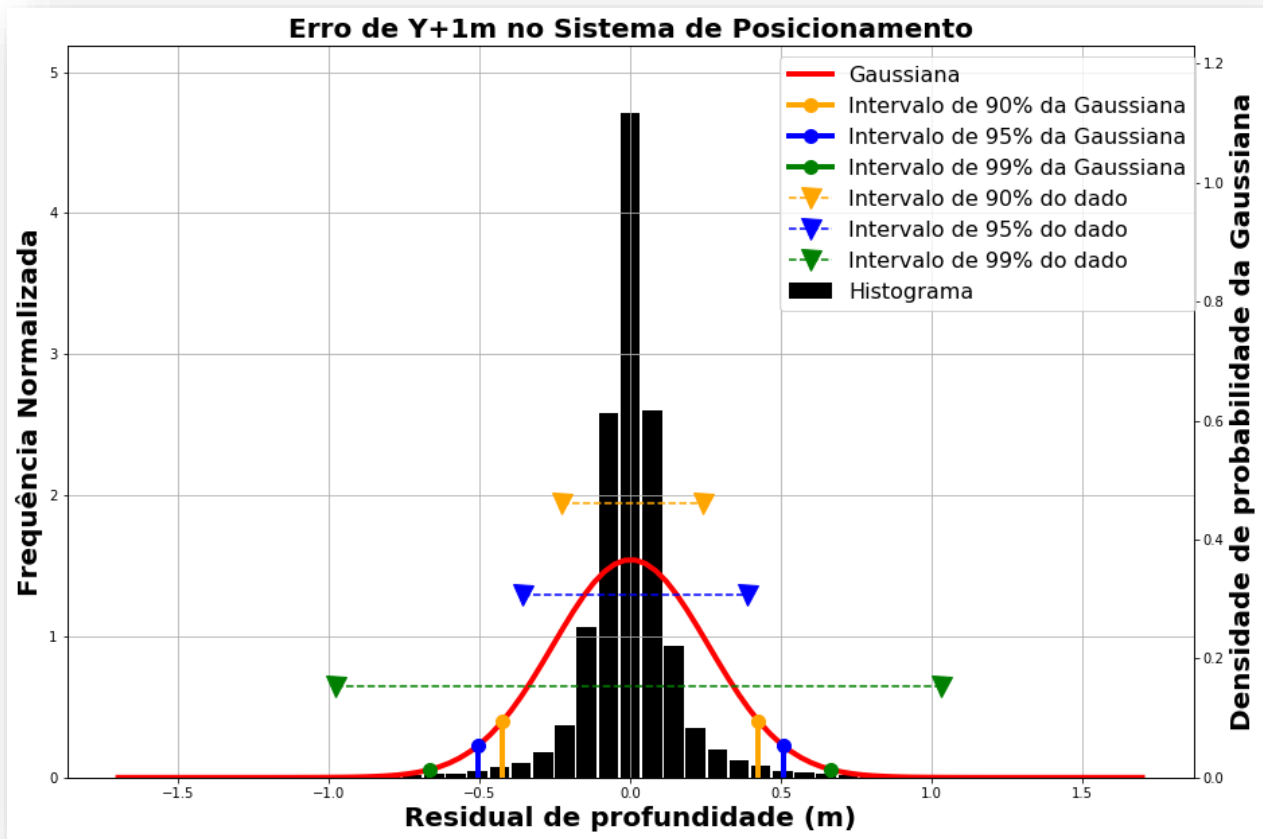


Figura 64 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no sistema de posicionamento.

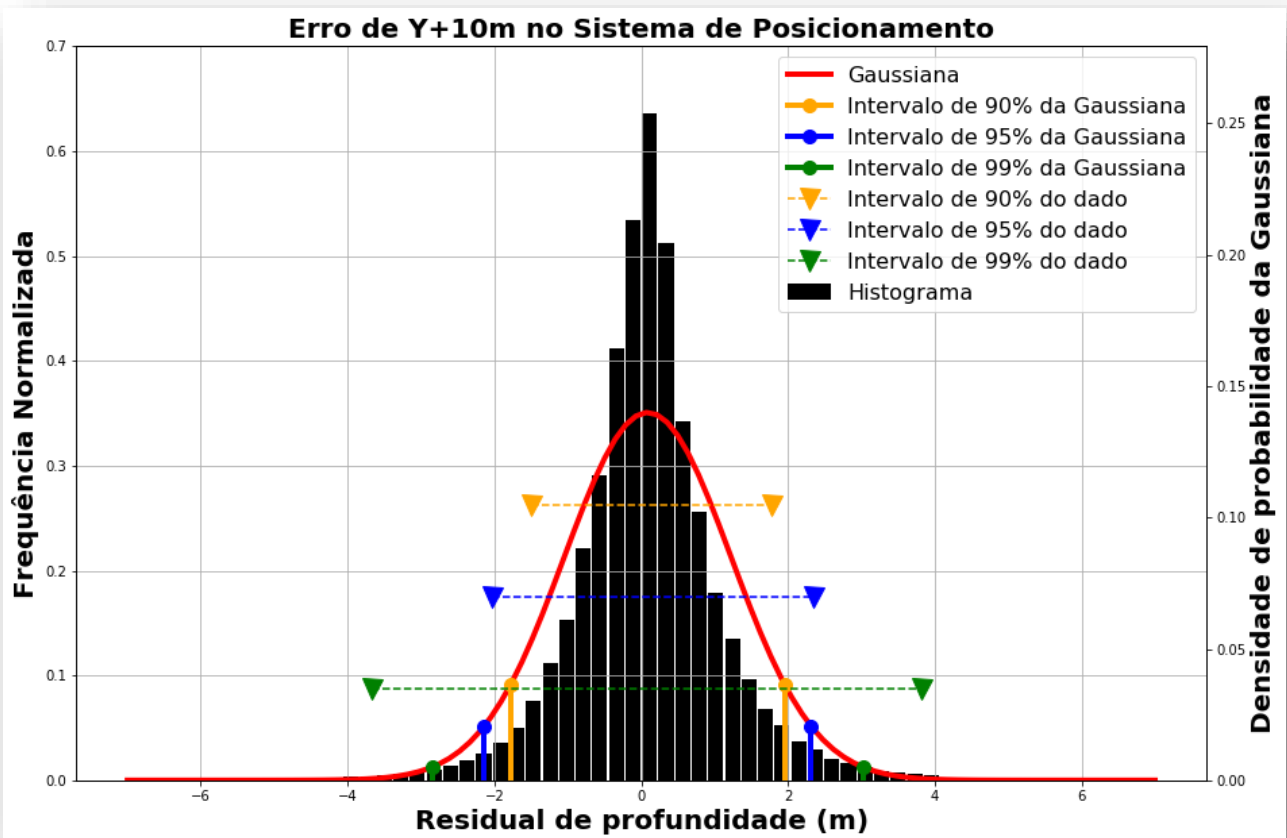


Figura 65 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no sistema de posicionamento.

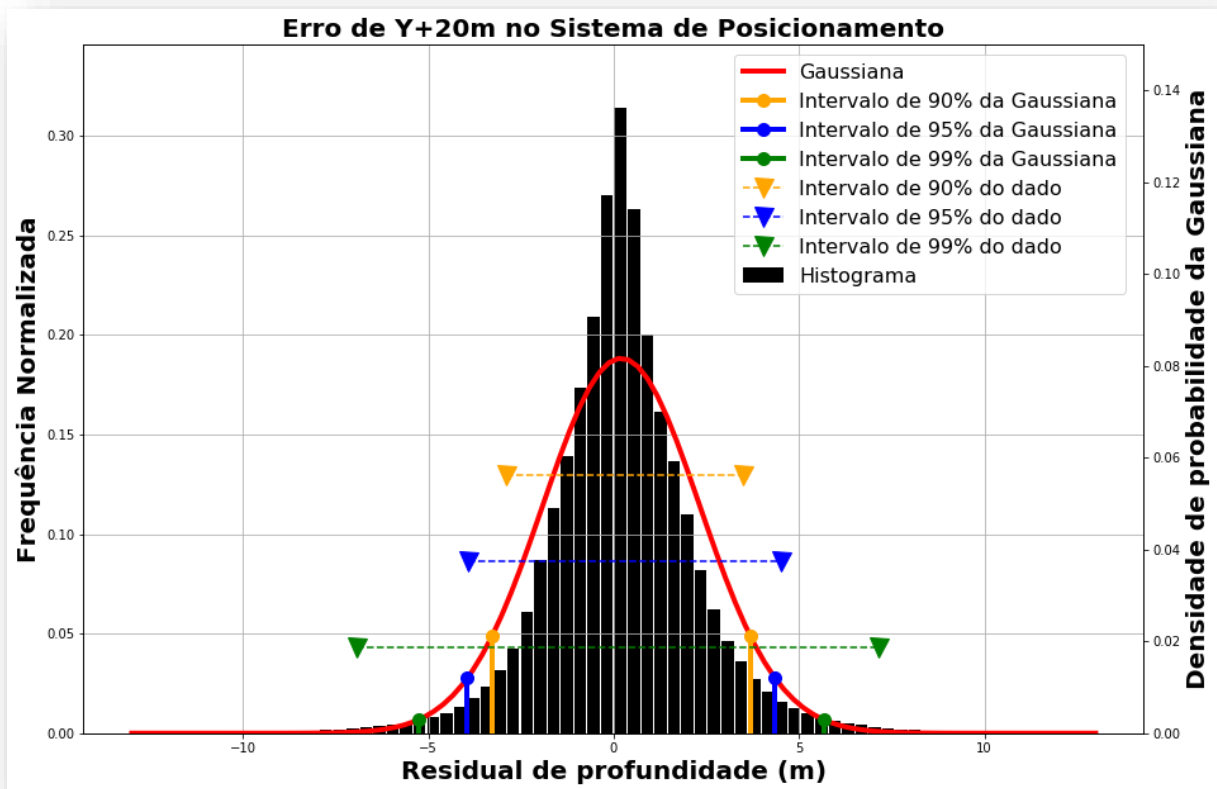


Figura 66 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no sistema de posicionamento.

Semelhante ao observado nas gaussianas traçadas na simulação dos erros em X do sistema de posicionamento, a Figura 64, Figura 65 e Figura 66 somente confirmaram uma diferença: não ocorre desvio, dos residuais de profundidade, para a direita. Todas as outras observações acerca da gaussiana são válidas.

6.2.3) Alteração no Eixo Z do Sistema de Navegação

Ao simular erros lineares de *offset* no eixo Z do sistema de navegação, não foi observado nenhuma deformação nas estruturas do dado. A única alteração foi a medição da profundidade, pois toda superfície foi elevada no valor do erro inserido.

Através da ferramenta *Digitizer Profile* foi criado um perfil (Figura 67), em relevo acentuado do dado, para averiguar os erros de profundidade associados. Foi constatado que, em toda extensão do dado e nas superfícies diferença, houve apenas um deslocamento em Z de toda superfície. Não houve deslocamentos em quaisquer outros eixos ou deformidades de qualquer natureza (Figura 68). Como o campo *Waterline Height* do arquivo de *vessel* foi utilizado adicionando-se valores positivos, vemos um gradual aumento da profundidade do transdutor, acarretando uma gradativa redução da medição de profundidade.

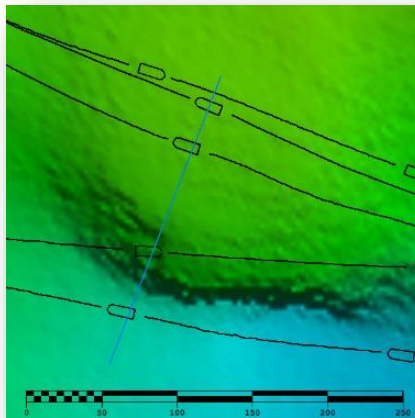


Figura 67 - Exemplo de estrutura a qual foi traçado um perfil (em azul). Escala horizontal em metros.

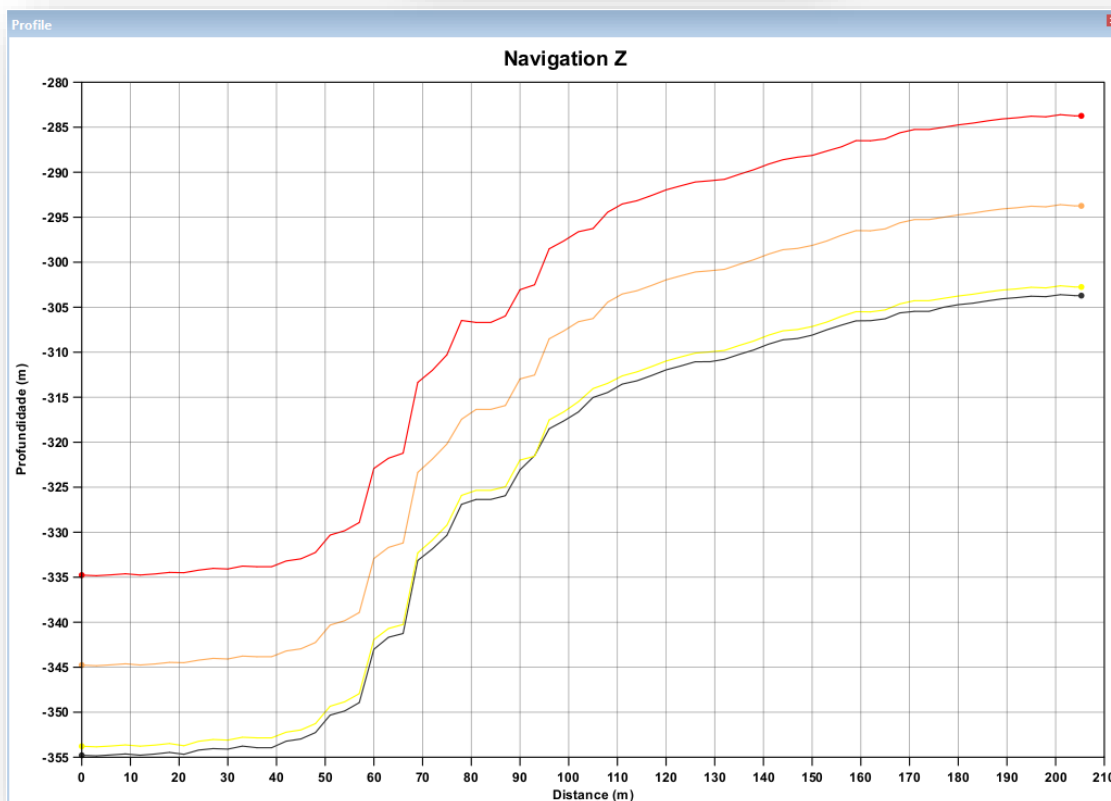


Figura 68 - Perfil marcado pela Figura 67, mostrando as diferentes detecções do fundo marinho das superfícies com +1m (linha amarela), +10m (linha laranja) e +20m (linha vermelha) de erro, em relação à superfície de referência (linha preta).

6.3) Simulação e Análise de Erros em *offsets* Lineares do MRU

6.3.1) Alteração no Eixo X do MRU

Ao inserir 20 metros positivos de erro linear de *offset* no MRU no eixo X, somente um fenômeno foi observado: houve, nos feixes externos, um aparente *heave* induzido (Figura 69). No *Subset Editor* foram percebidas as exatas ondulações, no formato de *swell* (Figura 70). Entretanto, o mesmo fenômeno não foi observado em regiões de sobreposição de linhas. Supõem-se que o fenômeno de *heave* induzido tenha tido alguma interação destrutiva com a sobreposição das linhas, tendo assim seu efeito atenuado.

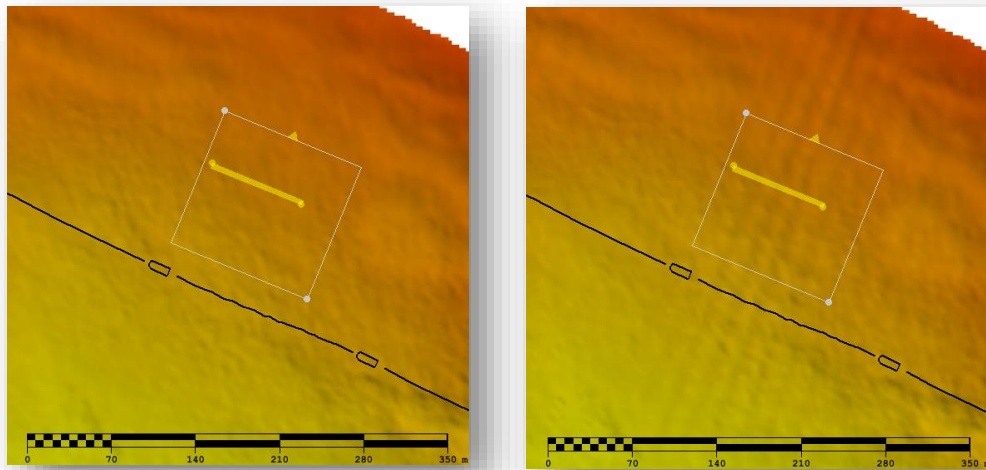


Figura 69 - Heave induzido, em formato de *swell*. Em amarelo, *slice* do *Subset Editor*. À direita, superfície com 20 metros de erro induzido em X. Escala em metros.

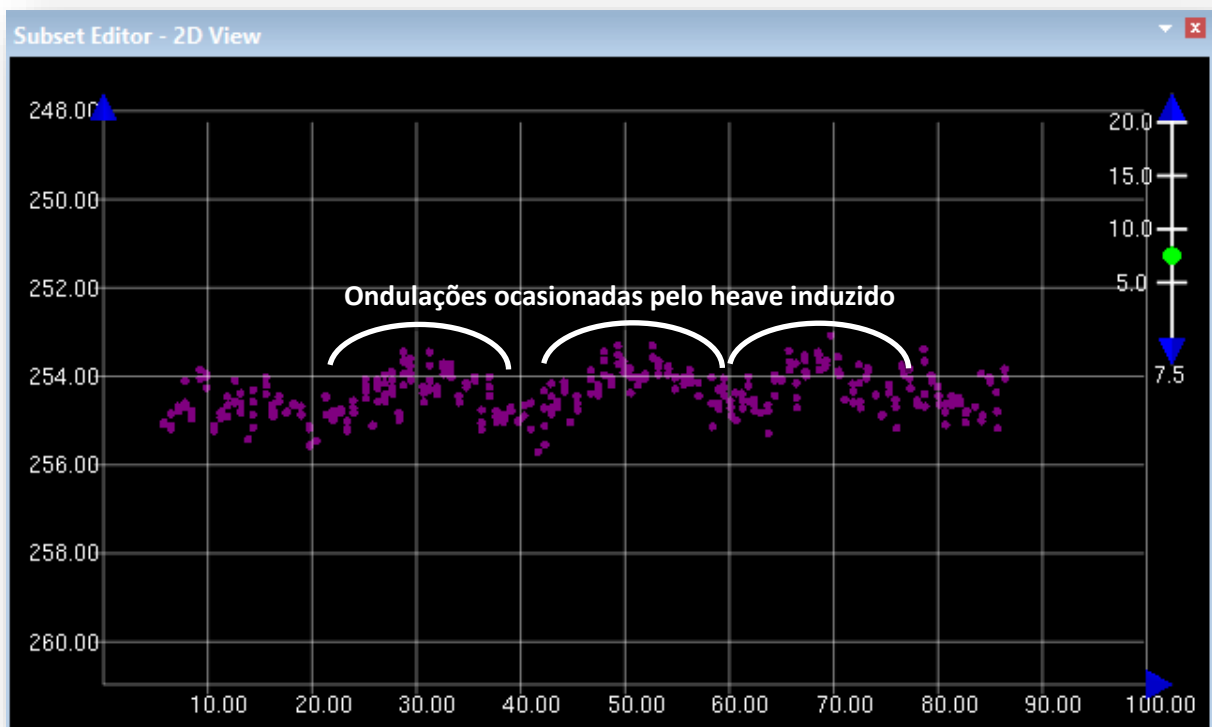


Figura 70 - Nuvem de pontos evidenciando as ondulações observadas na Figura 69. Legendas horizontal e vertical em metros. No canto superior direito, barra de exagero vertical.

Para compreender tal oscilação em *heave*, foi criada uma superfície diferença, da superfície de referência menos a simulada com +20 metros de erro em X. Não foi possível detectar mudanças significativas com +1 ou +10 metros de erro no eixo X. Os residuais estão conforme abaixo (Figura 71), numa escala de cores que varia de -1 a +1m:

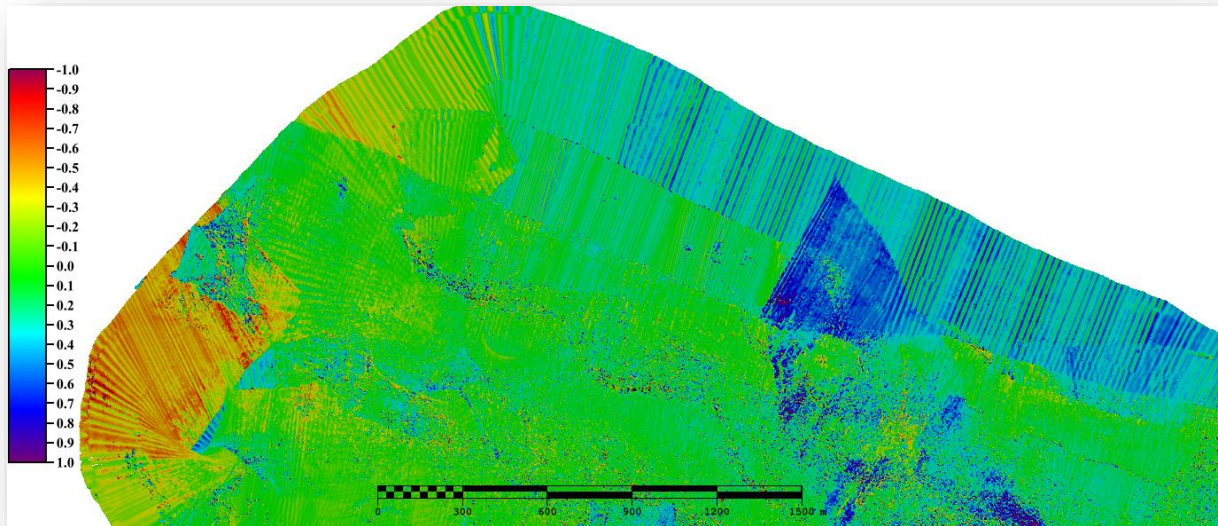


Figura 71 - Superfície diferença: (superfície de referência) - (superfície simulada com +20m de erro em X do MRU) = residual. Escalas horizontal e vertical em metros.

Percebe-se que o *heave* induzido ocorre no dado em sua íntegra; entretanto, onde há mais de 100% de cobertura de fundo marinho ocorre uma sobreposição dos efeitos de *heave* induzido. Dessa forma o efeito de *swell* não se faz evidente, confirmando a suposição anterior.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do MRU em X afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de X+1m (Figura 72), X+10m (Figura 73) e X+20m (Figura 75). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 76. Para visualizar mais precisamente as distribuições, foi criada uma tabela com percentis a cada 2,5% (Anexo B).

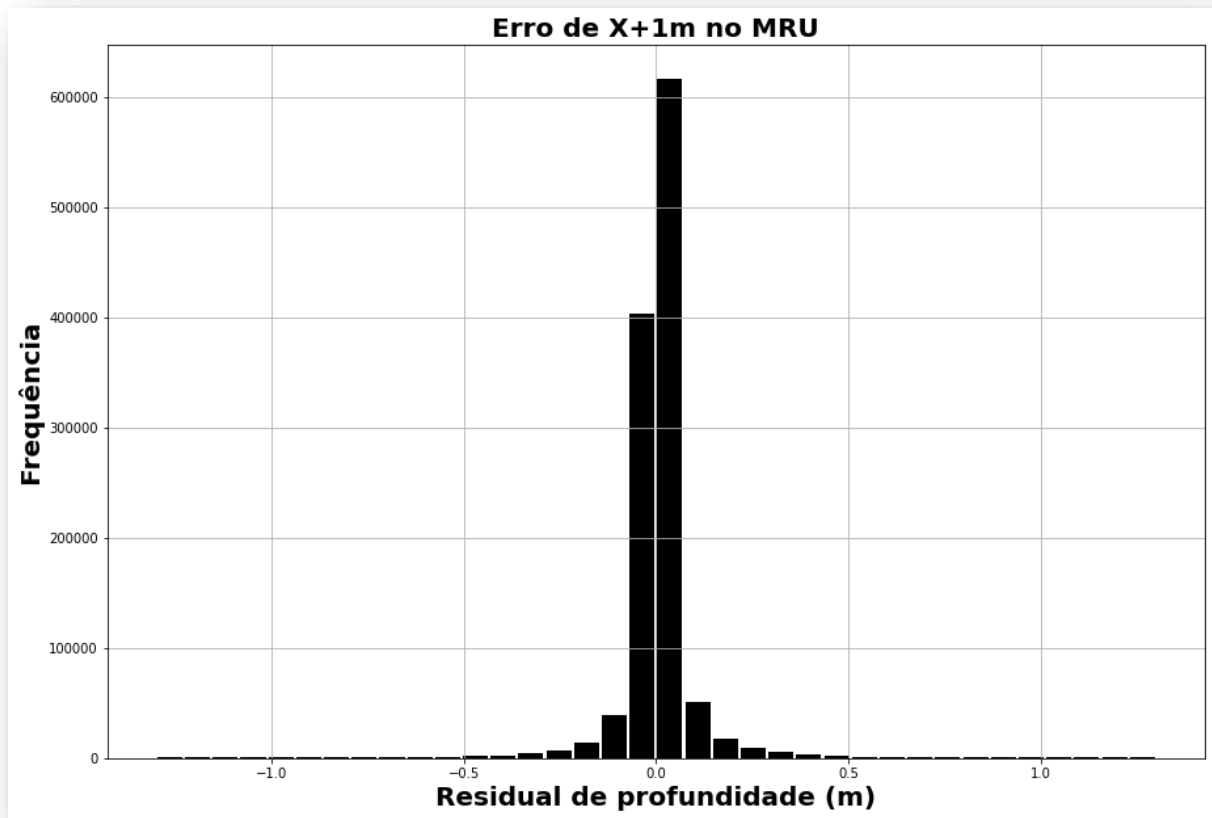


Figura 72 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no MRU.

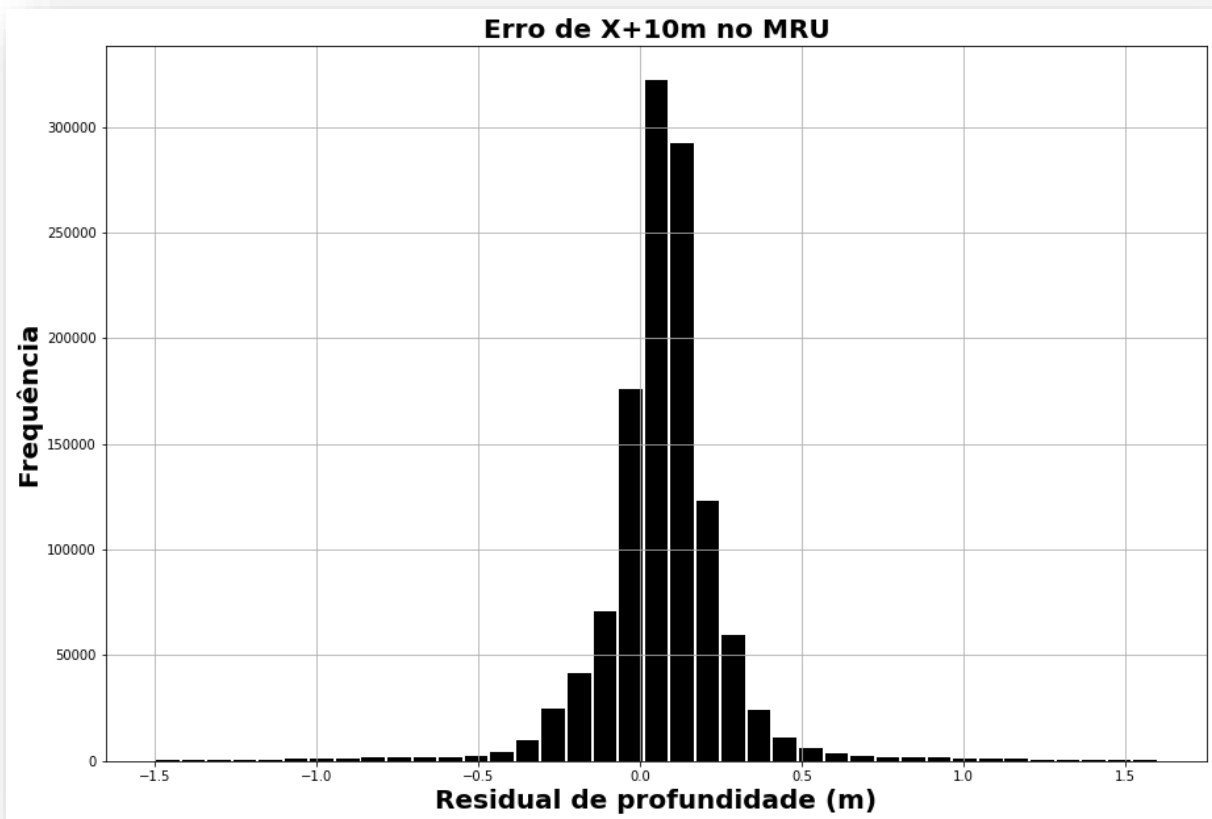


Figura 73 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no MRU.

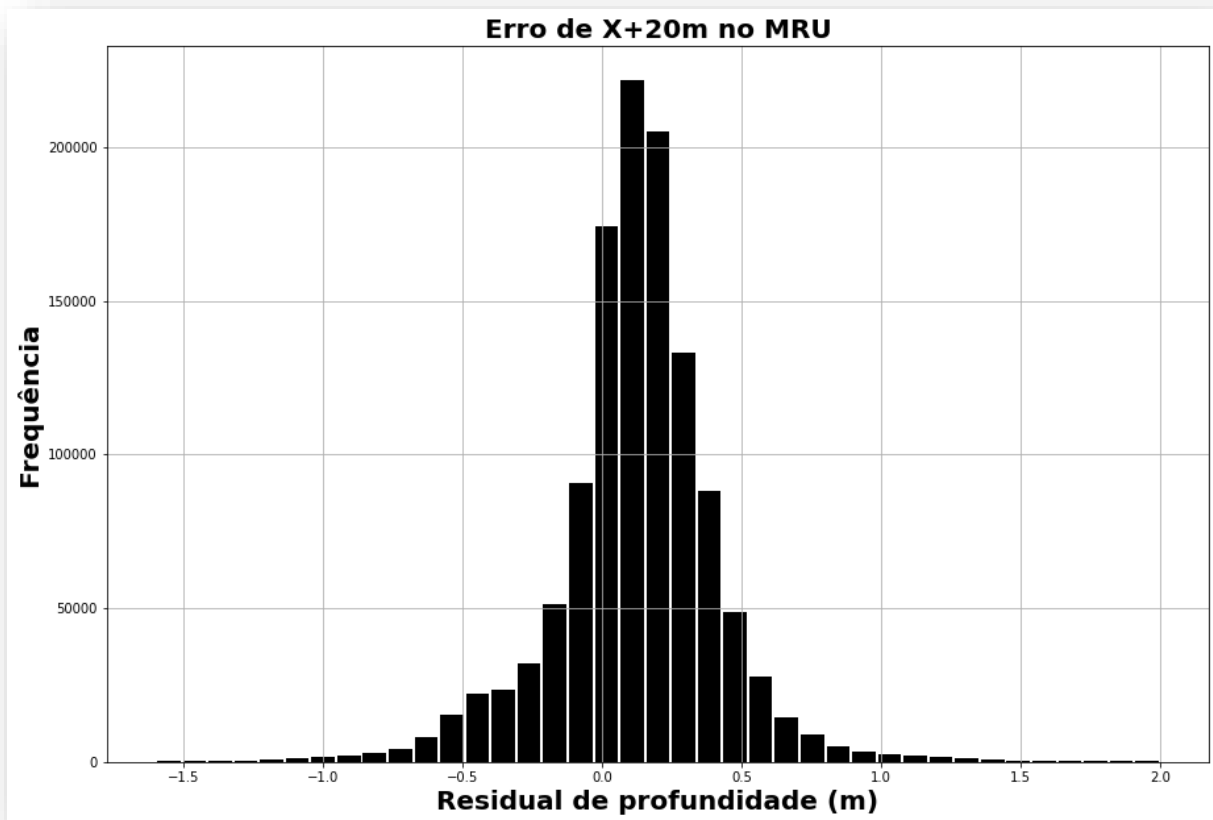


Figura 74 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+20m induzidos no MRU.

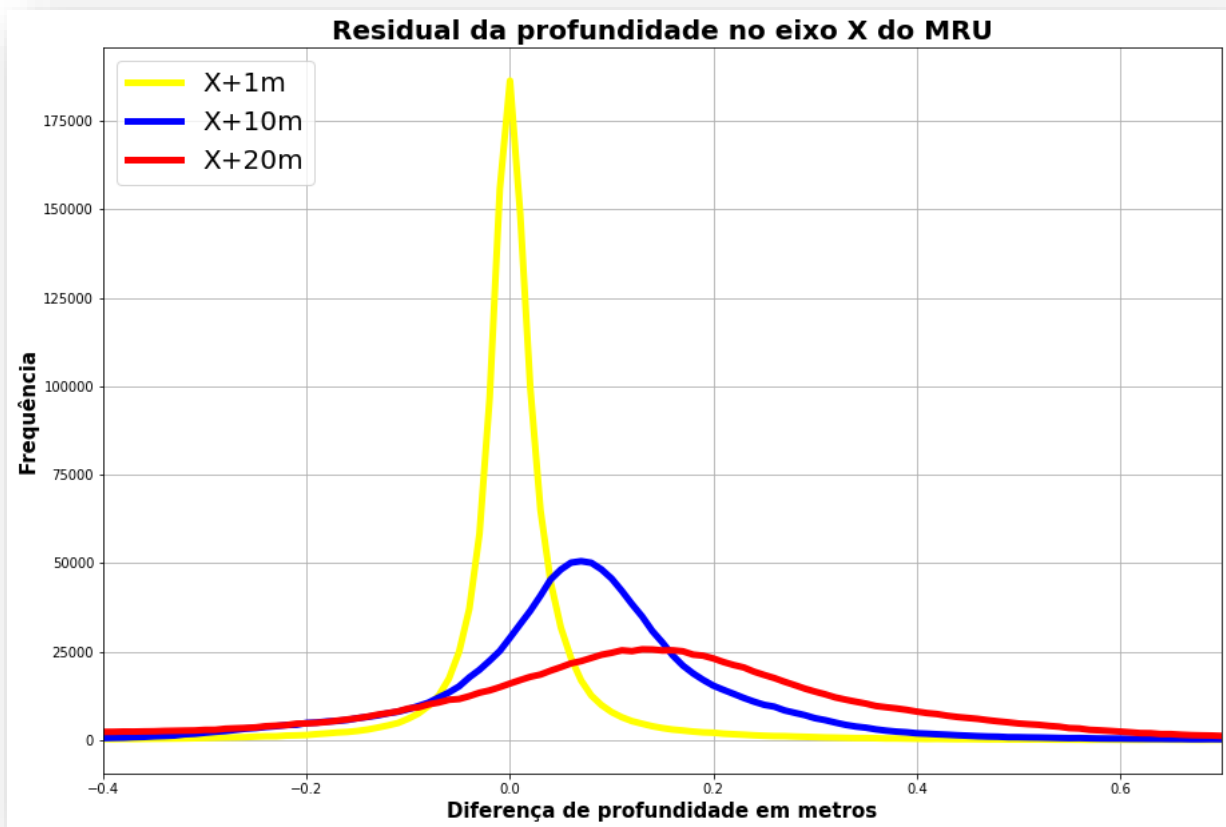


Figura 76 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X, sob mesma escala, no MRU.

Os histogramas dos residuais de profundidade dos erros em X do MRU (Figura 72, Figura 73 e Figura 74) apresentaram magnitude muito pequena nos residuais de profundidade. Tal efeito foi esperado pelo resultado da superfície diferença. Observa-se, através da Figura 76, um claro deslocamento da moda para a direita, conforme aumenta-se o erro no eixo. Tal fenômeno também foi observado no deslocamento do eixo X do sistema de posicionamento. Conclui-se, então, que as alterações de *offset* linear no MRU não obtiveram erros significativos na medição da profundidade, segundo análise estatística.

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 77, Figura 78 e Figura 79), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

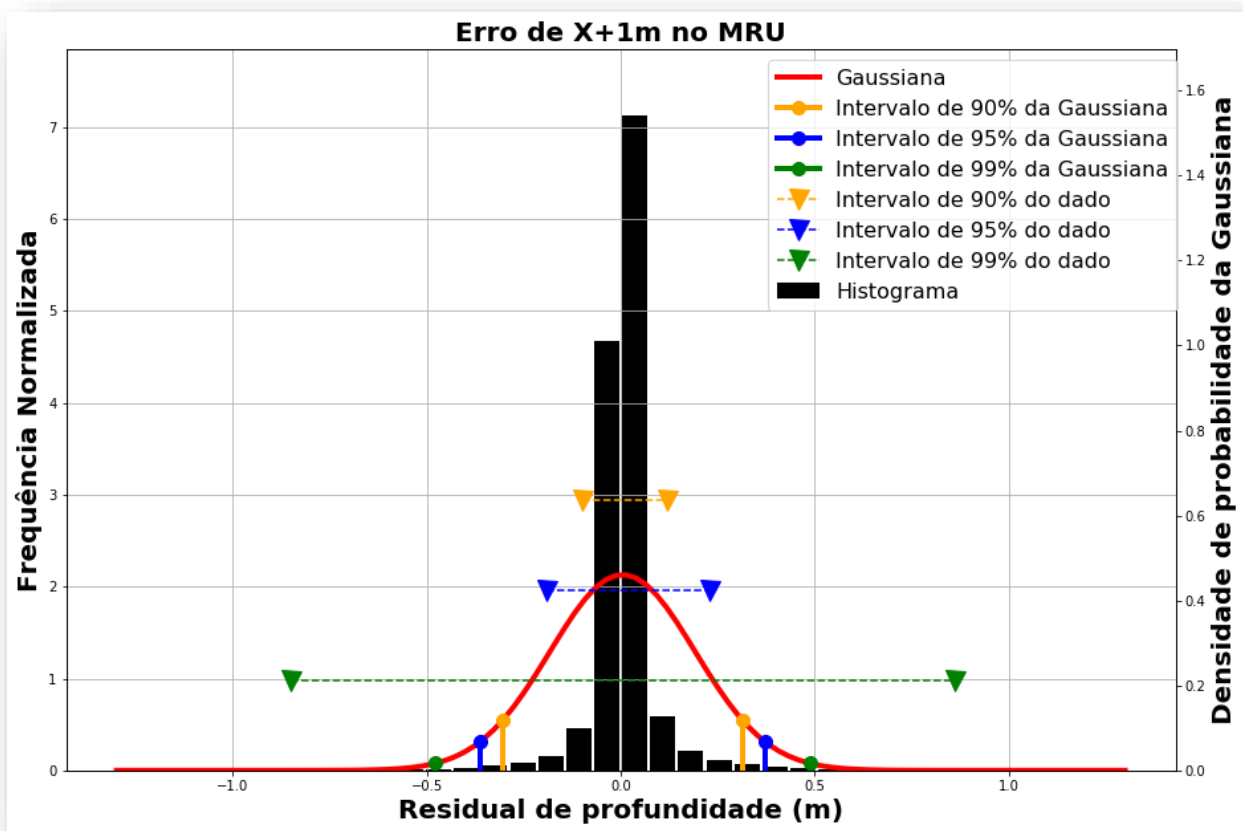


Figura 77 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no MRU.

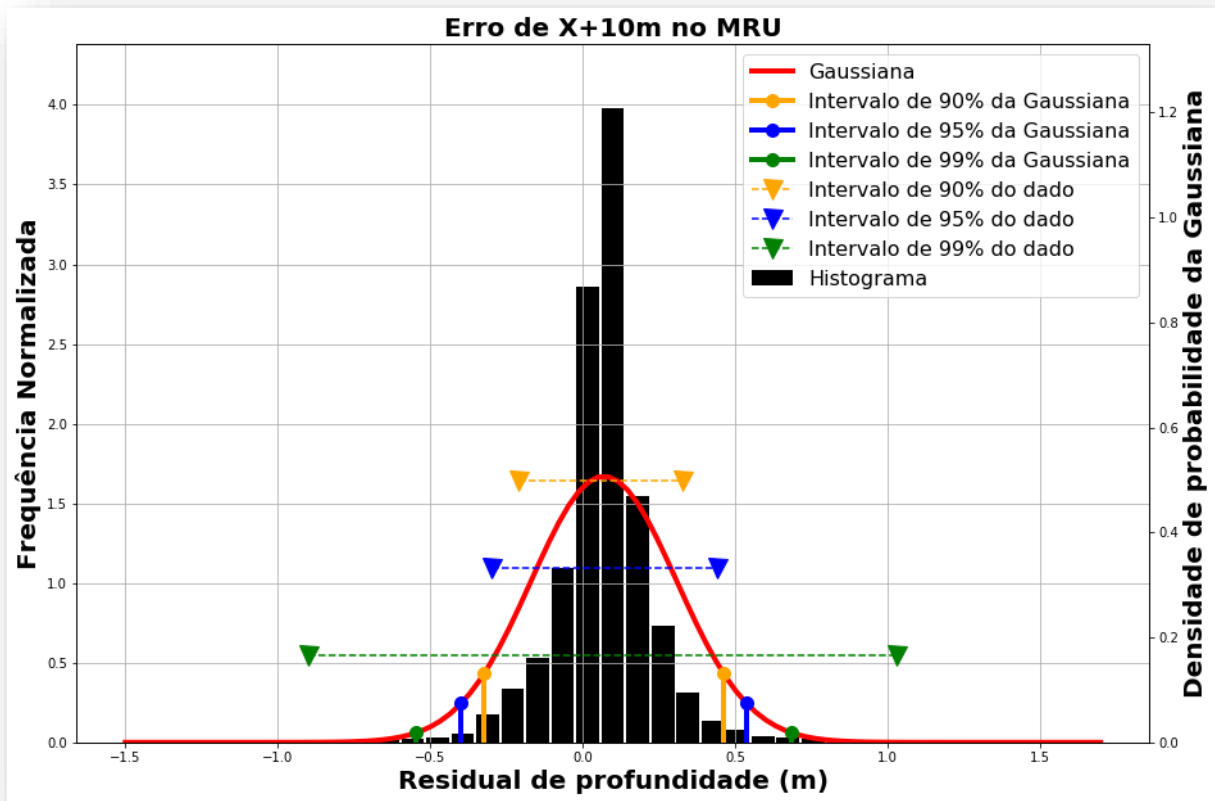


Figura 78 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no MRU.

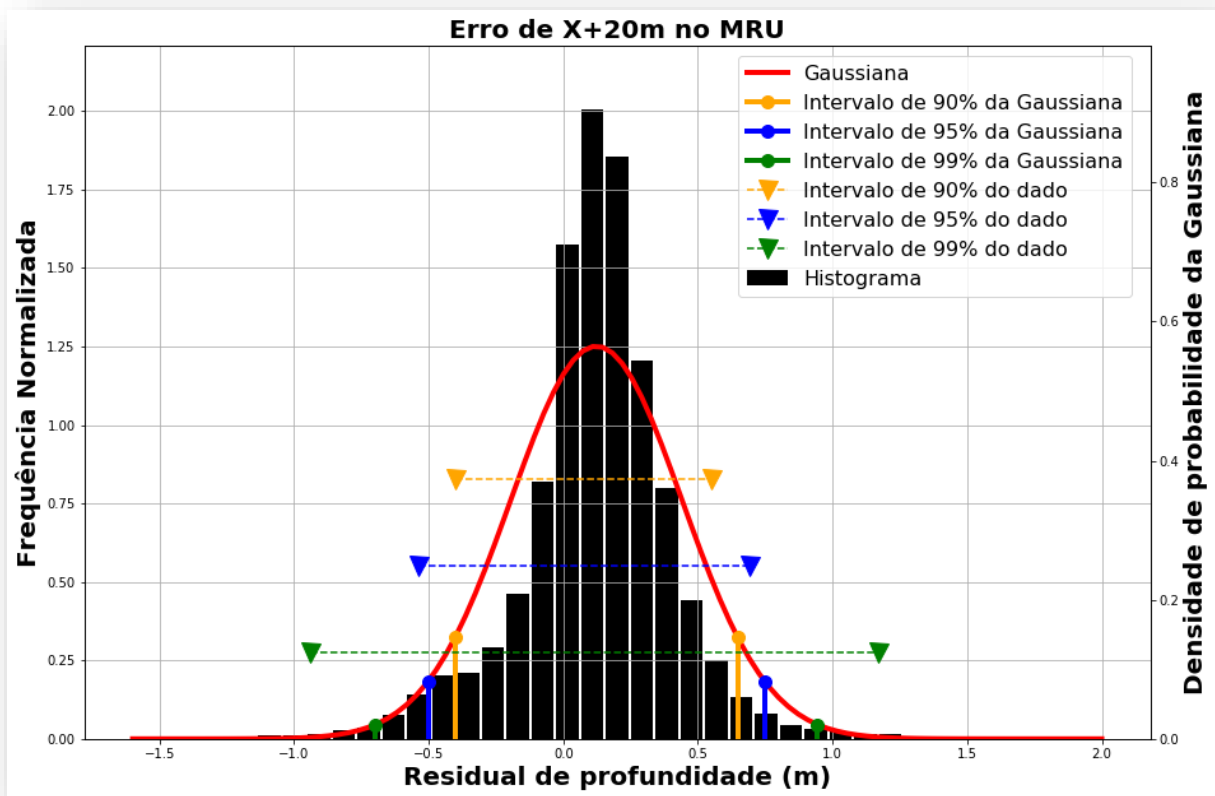


Figura 79 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no MRU.

As gaussianas dos histogramas do deslocamento linear de *offset* em X do MRU (Figura 77, Figura 78 e Figura 79) evidenciaram, também, um ajuste melhor em relação à gaussiana conforme se aumenta o erro no eixo X. Os intervalos do dado coincidem melhor com os intervalos da gaussiana conforme aumenta-se o erro no eixo. No caso dos residuais de profundidade do eixo X do MRU, a ‘cauda’ do histograma (valores de maior magnitude de residual de profundidade) representa valores de maior amplitude do *heave* induzido (efeito de *swell*). Vê-se, também, que o intervalo de 99% do dado está mais distante da origem do gráfico do que o mesmo intervalo da gaussiana, ou seja: a ‘cauda’ do histograma apresenta maior peso estatístico do que o previsto na gaussiana. Como a maior parcela da distribuição situa-se próxima de zero, entende-se que a maior parte do dado não expressou *heave* induzido. Considerando que nos locais de sobreposição de linhas houve atenuação do efeito de *swell*, e que o algoritmo CUBE, por causa da sobreposição, possa não ter considerado o efeito de *swell* como fundo verdadeiro, podemos concluir que os residuais de profundidade no eixo X do MRU podem ter sido bem atenuados.

6.3.2) Alteração no Eixo Y do MRU

As alterações de *offset* linear do MRU no eixo Y foram realizadas, entretanto nem com 20 metros somados de erro foi possível detectar mudanças na superfície. Para investigar mais a fundo foi gerada uma superfície diferença, da superfície de referência menos a simulada, com +20 metros de erro. Os residuais estão na Figura 80. Note que, utilizando uma escala de cores muito reduzida (entre -0,3m e +0,3m, ou seja, cerca de 30% da amplitude das oscilações no eixo X), foi possível observar *heave* induzido semelhante em relação a simulação no eixo X.

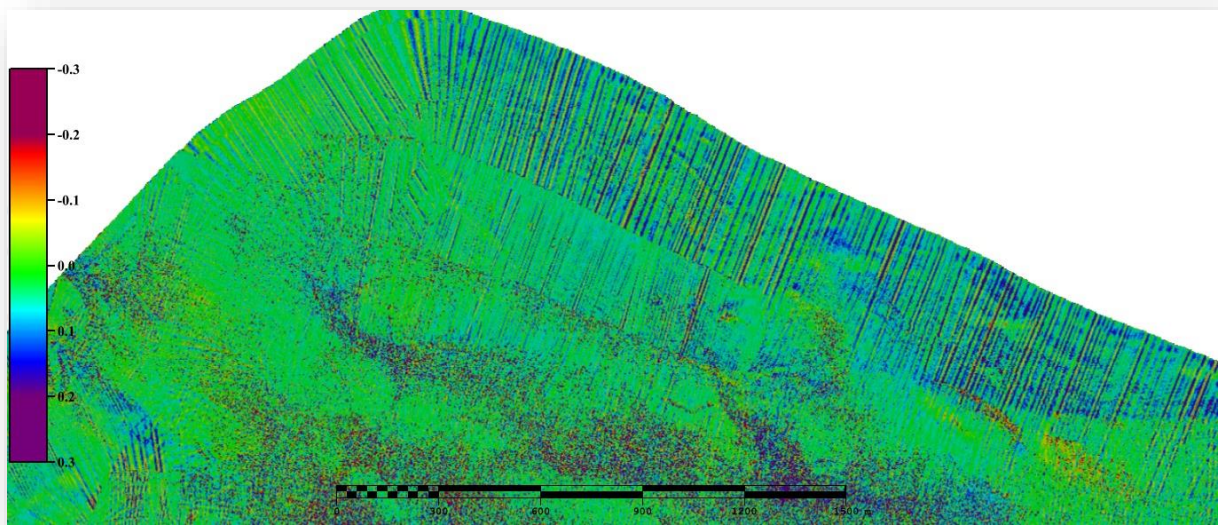


Figura 80 - Residuais da superfície de referência subtraída da superfície com +20m de erro em Y, no posicionamento linear do MRU.

Foi percebido que, analisando o *heave* induzido em X (Figura 81) e em Y (Figura 82), em uma mesma região, estes apresentam frequências de oscilação ligeiramente diferentes. Portanto, foi acessado o módulo *Attitude Editor* do CARIS HIPS and SIPS para verificar os dados de *roll* e *pitch* da embarcação. Foi estabelecido um intervalo temporal (linha cinza na Figura 81 e Figura 82) para avaliar as variáveis. A Figura 83 evidencia que, sutilmente, a frequência de oscilação do *pitch* é maior que a do *roll* no dado intervalo. Dessa forma, justifica-se a diferença de frequência de oscilação entre os eixos X e Y: em X, obtêm-se um *heave* induzido baseado no *roll* e, em Y, obtêm-se um *heave* induzido baseado no *pitch*. Torna-se, assim, justificado a percepção de uma frequência maior de oscilação do *heave* induzido na Figura 81 do que na Figura 82.

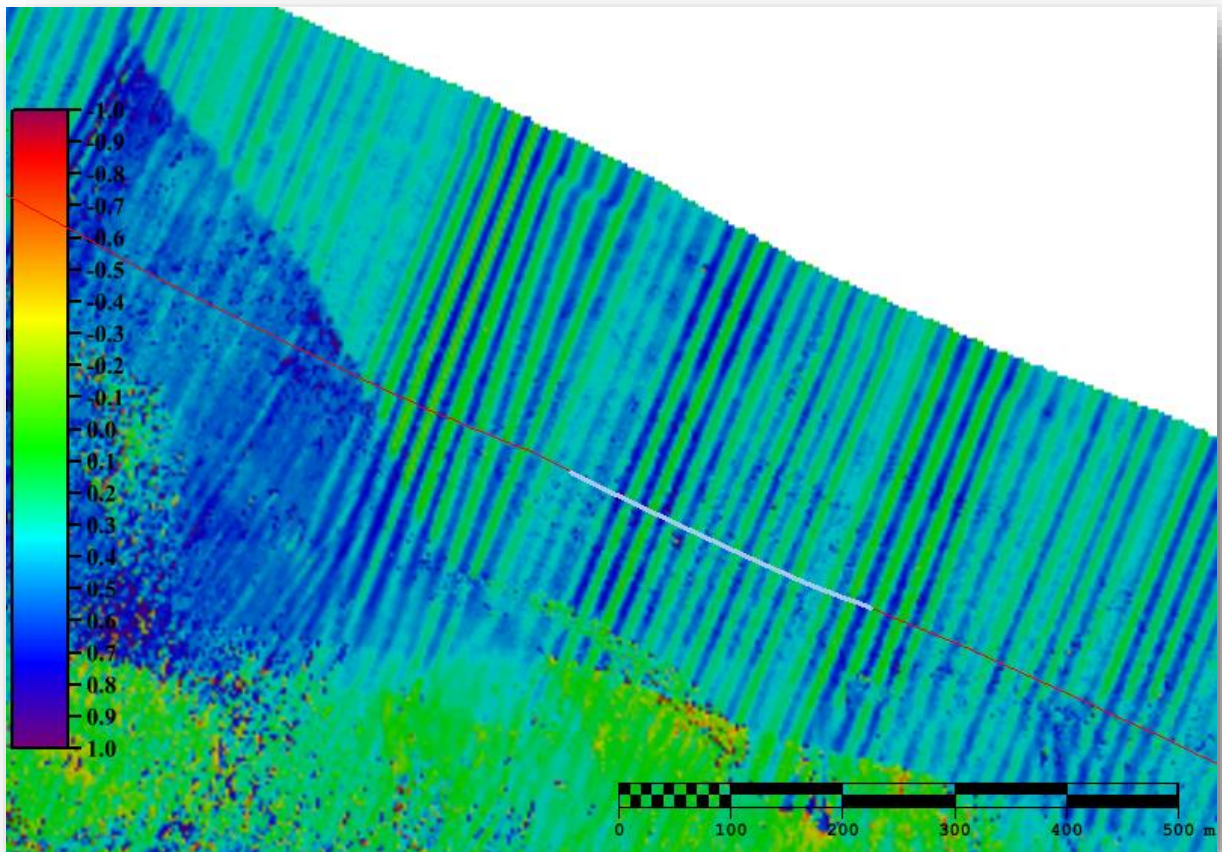


Figura 81 - Superfície diferença em relação ao erro no eixo X, de magnitude +20m, no MRU.

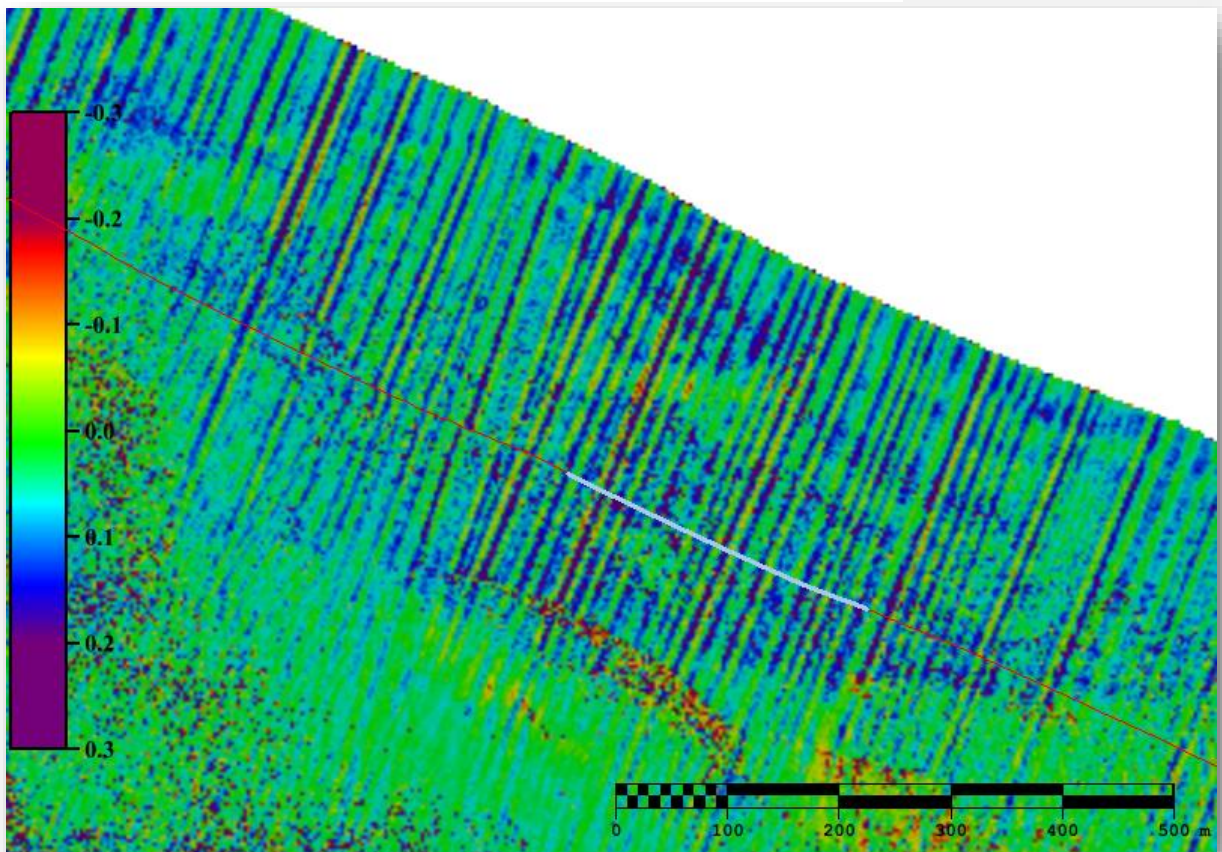


Figura 82 - Superfície diferença em relação ao erro no eixo Y, de magnitude +20m, no MRU.

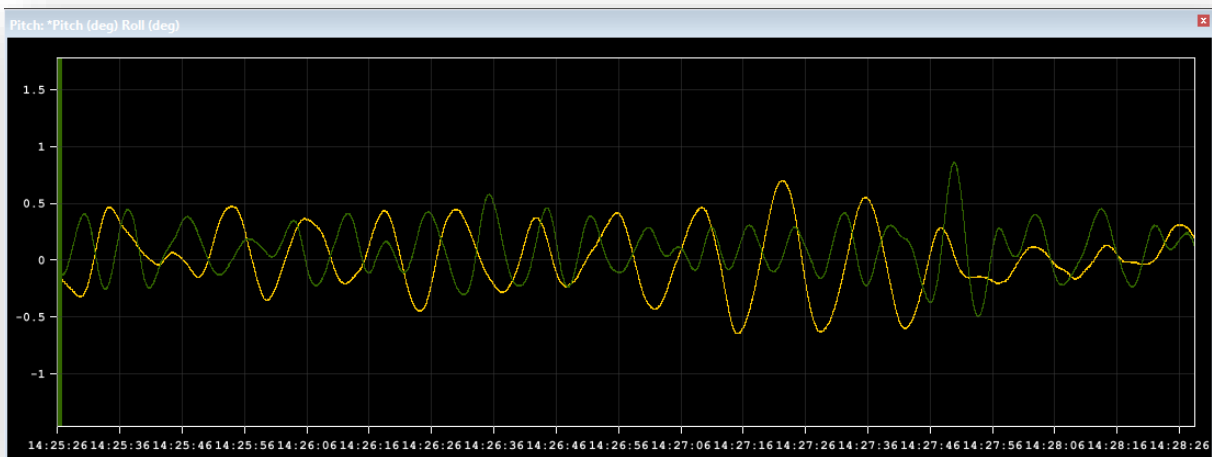


Figura 83 - Módulo Attitude Editor plotando as curvas de roll (amarelo) e pitch (verde) simultaneamente, para um mesmo intervalo temporal.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do MRU em Y afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de Y+1m (Figura 84), Y+10m (Figura 85) e Y+20m (Figura 86). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 87. Para visualizar mais precisamente as distribuições, foi criada uma tabela com percentis a cada 2,5% (Anexo B).

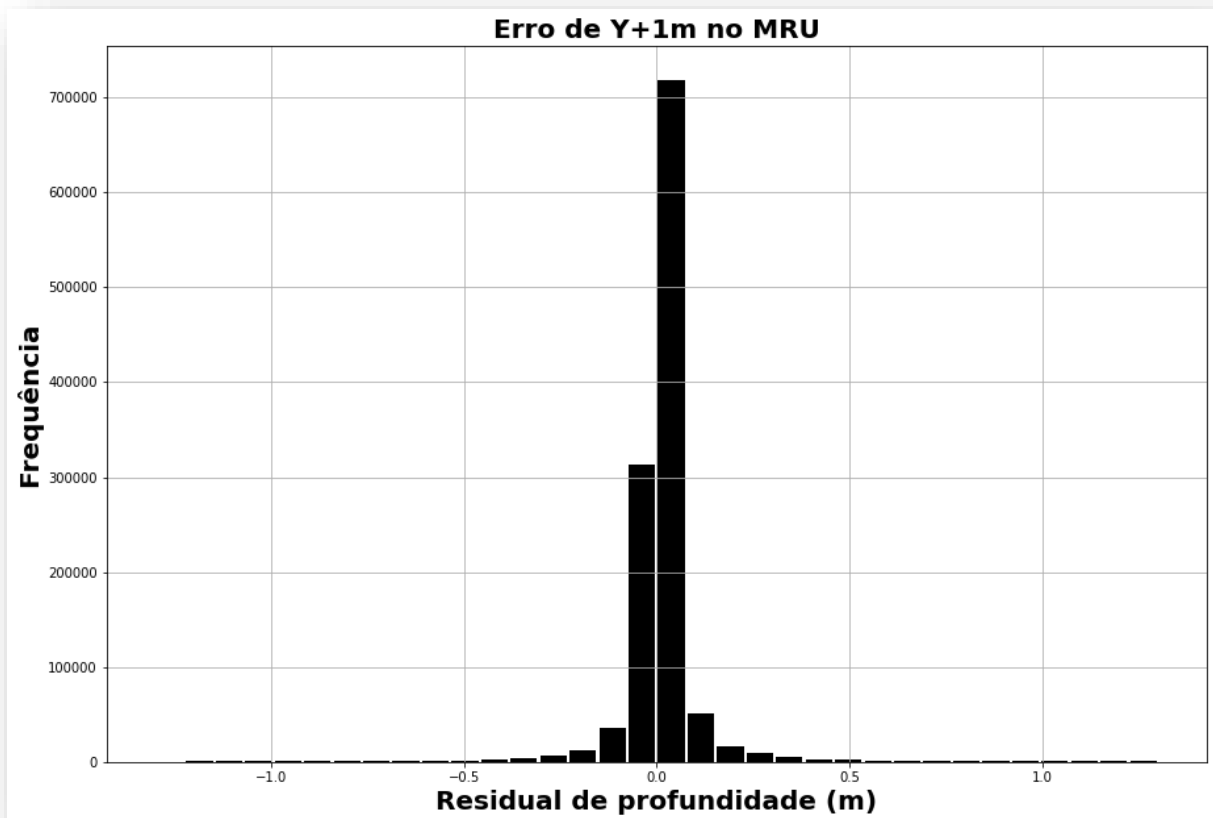


Figura 84 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no MRU.

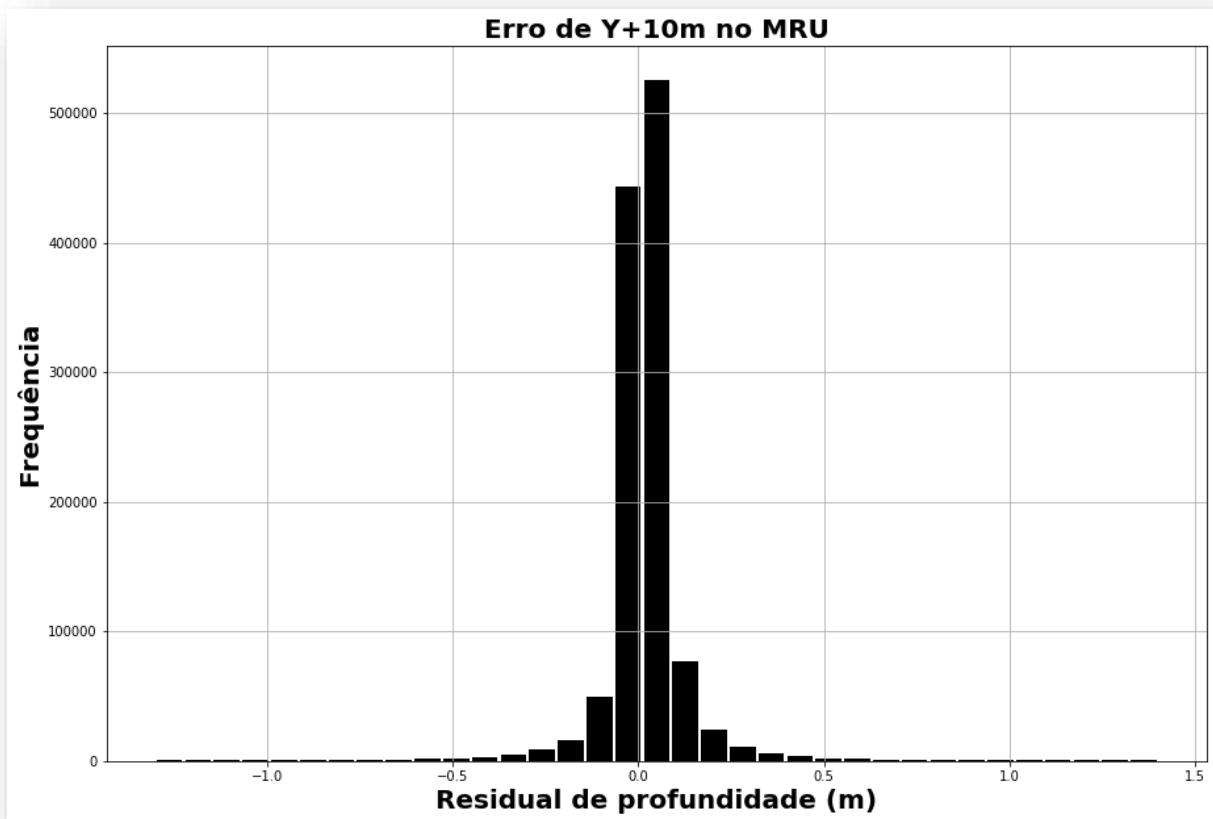


Figura 85 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no MRU.

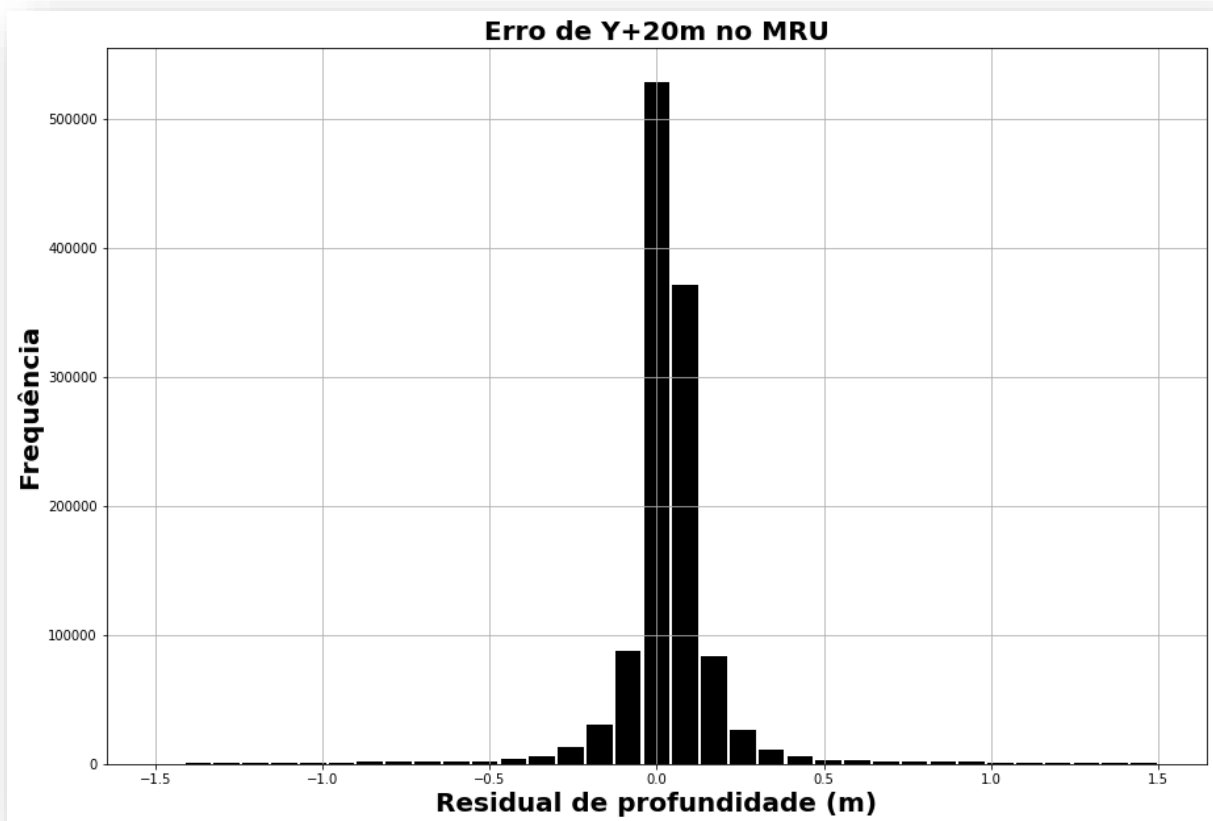


Figura 86 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no MRU.

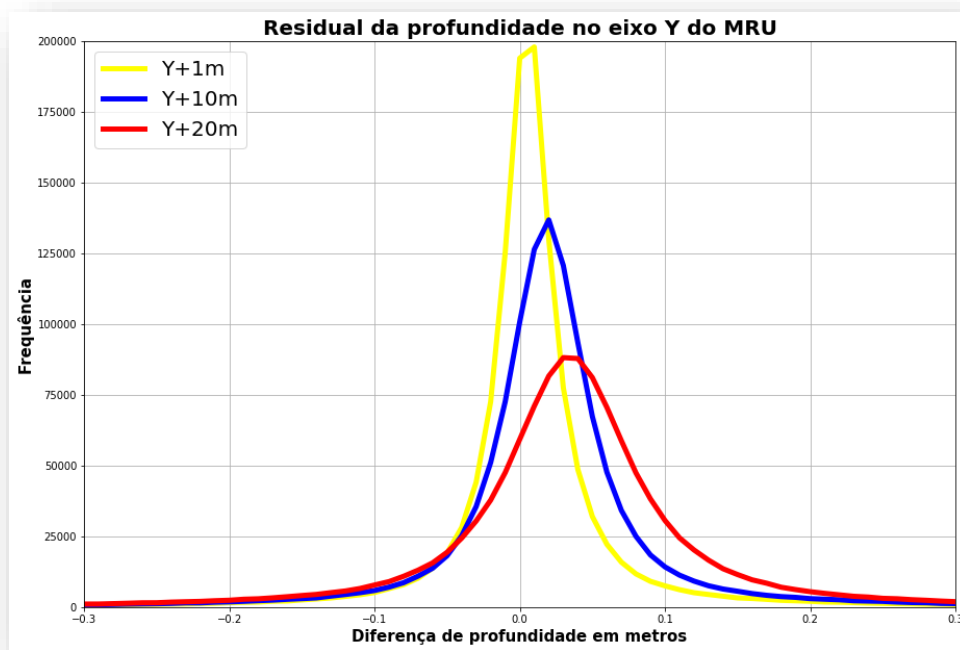


Figura 87 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no MRU.

Pelos histogramas dos residuais de profundidade do eixo Y do MRU (Figura 84, Figura 85 e Figura 86) e pela Figura 87, observamos comportamento muito semelhante aos residuais de profundidade do eixo X do MRU. Entretanto, nota-se que a magnitude dos residuais são menores no eixo Y do que no eixo X. Há, também similar ao eixo X, um deslocamento da moda dos gráficos para a direita, conforme se aumenta o erro no eixo. A ‘cauda’ do histograma representa as maiores amplitudes de *pitch*, enquanto a maior parte da distribuição, centrada próxima de 0, representa as menores amplitudes de *pitch*, que predominam no dado.

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 88, Figura 89 e Figura 90), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

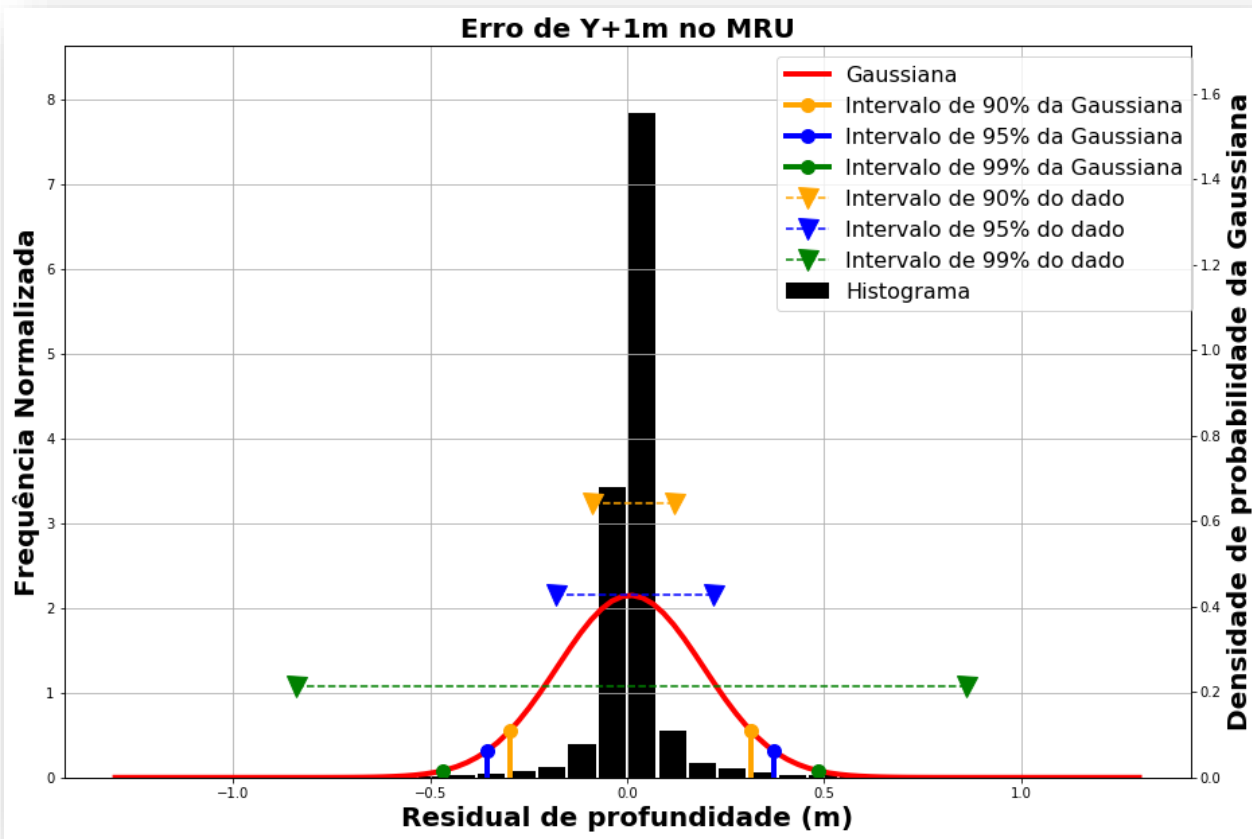


Figura 88 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no MRU.

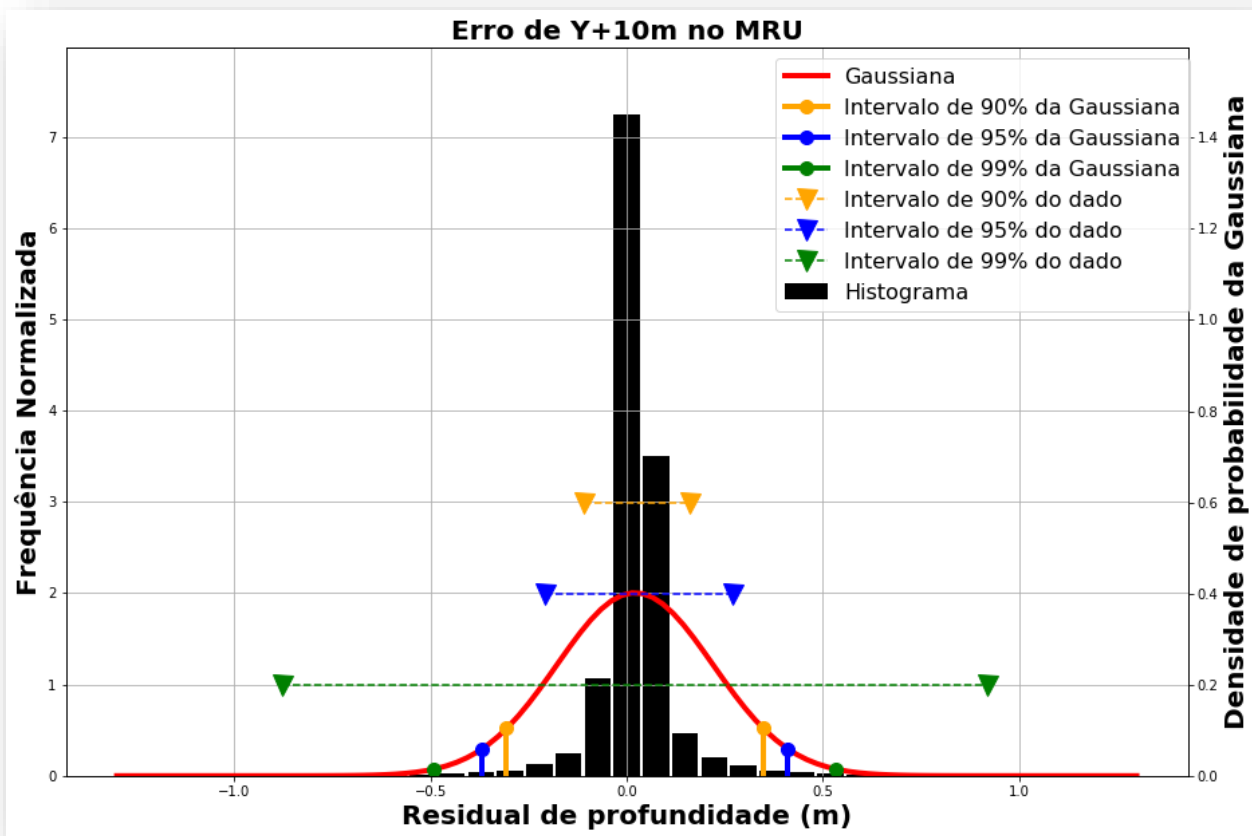


Figura 89 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no MRU.

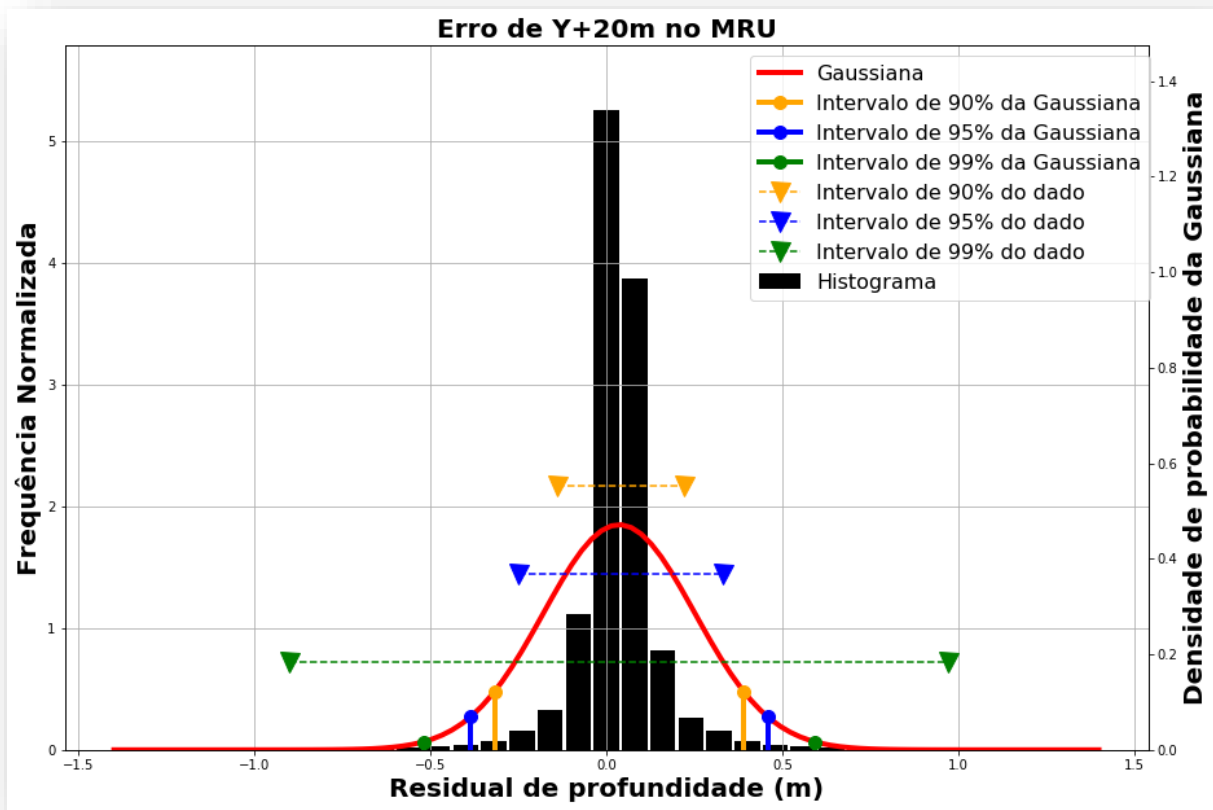


Figura 90 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no MRU.

As gaussianas da Figura 88, Figura 89 e Figura 90 não foram bons ajustes para a distribuição dos erros em Y do MRU. Nos histogramas, foi percebido que a magnitude dos residuais de profundidade foi muito baixa. Portanto, é esperado um ajuste ruim da gaussiana – nas gaussianas anteriores, o ajuste melhora conforme o aumento da magnitude do residual de profundidade. Os intervalos do dado e da gaussiana também não coincidem bem.

6.3.3) Alteração no Eixo Z do MRU

Não foi detectada nenhuma alteração de profundidade ou no que tange a deformações, nas superfícies com alteração de *offsets* lineares no eixo Z do MRU. A única superfície que forneceu algum tipo de dado passivo de ser avaliado foi a superfície diferença (Figura 91). Foi constatado que este erro criou uma série de *spikes*, aparentemente tendo maior ocorrência em regiões de relevo mais escarpado.

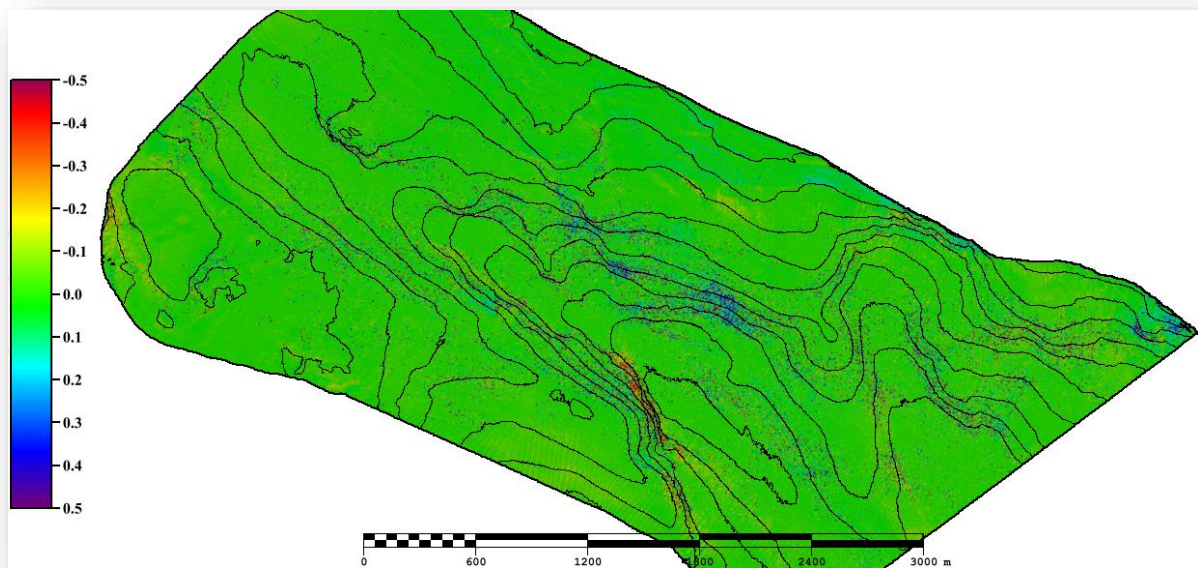


Figura 91 - Superfície diferença mostrando o residual da superfície com +20m de erro no eixo Z do MRU. Representação das curvas de nível da batimetria pela linha preta.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do MRU em Z afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de Z+1m (Figura 92), Z+10m (Figura 93) e Z+20m (Figura 94). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 95.

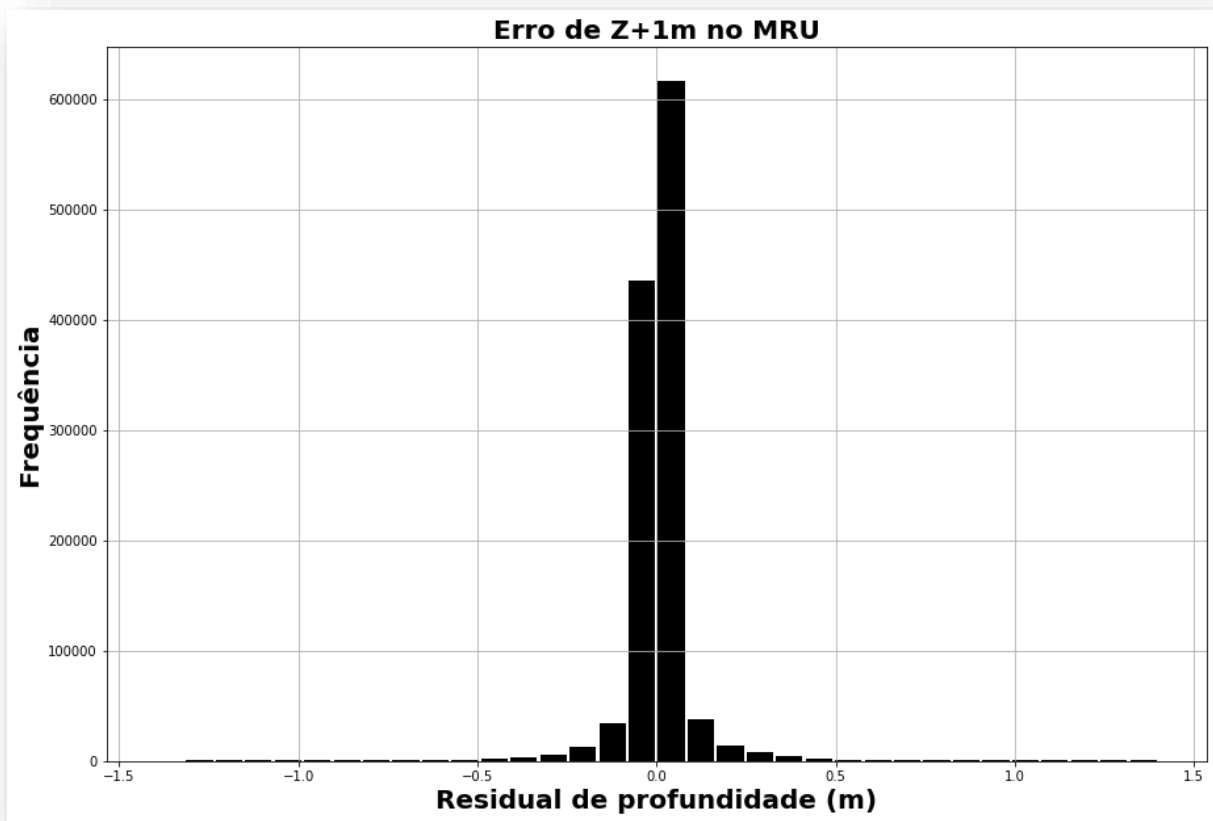


Figura 92 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+1m induzidos no MRU.

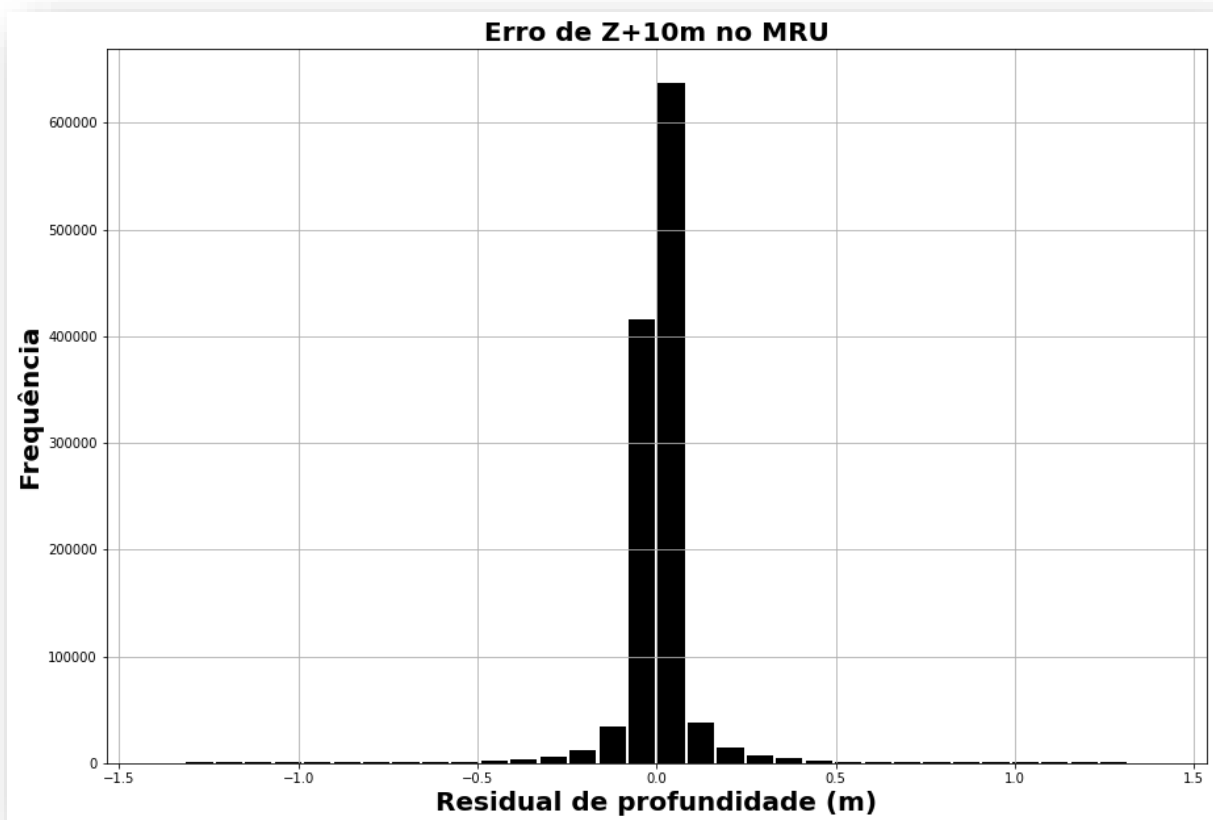


Figura 93 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+10m induzidos no MRU.

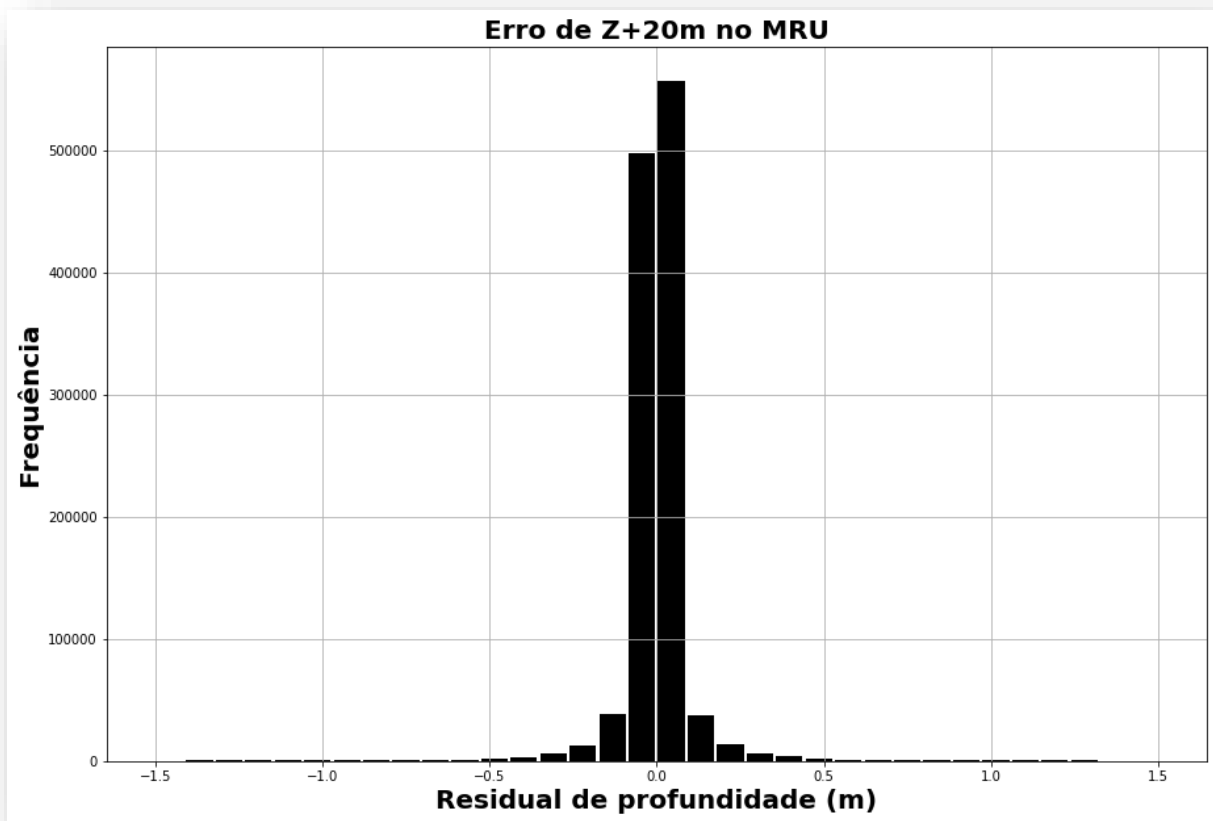


Figura 94 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Z+20m induzidos no MRU.

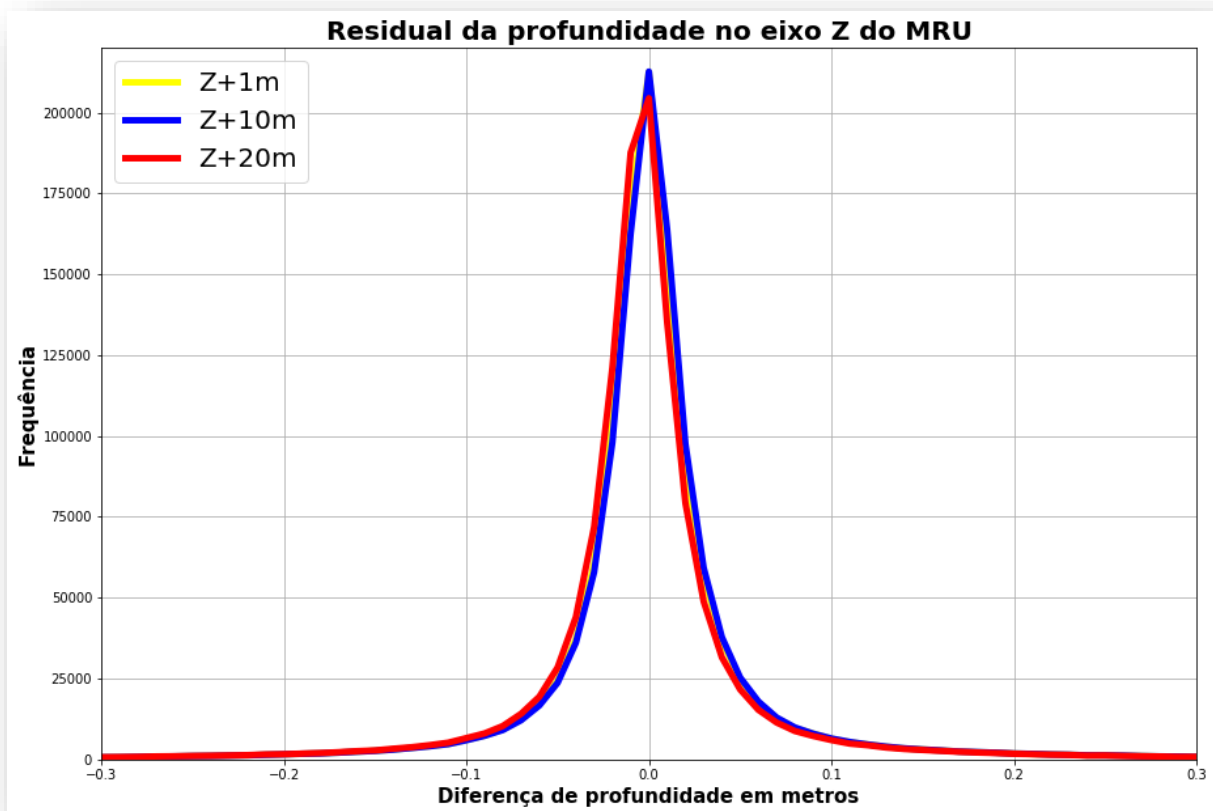


Figura 95 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Z, sob mesma escala, no MRU.

Os histogramas relativos ao erro de *offset* linear no eixo Z do MRU (Figura 92, Figura 93 e Figura 94) são iguais, como comprovado pela Figura 95. Isso significa que a magnitude do erro no eixo não interfere na magnitude do erro na medição de profundidade. E, analisando o histograma, vemos uma moda bem definida em 0, e uma magnitude baixíssima dos residuais da profundidade.

Como os resultados da inserção de erro gradativo (+1, +10 e +20m) no eixo Z no MRU apresentaram os mesmos resultados (Figura 95), apenas foi gerado a gaussiana do erro Z+1m (Figura 96), conforme abaixo.

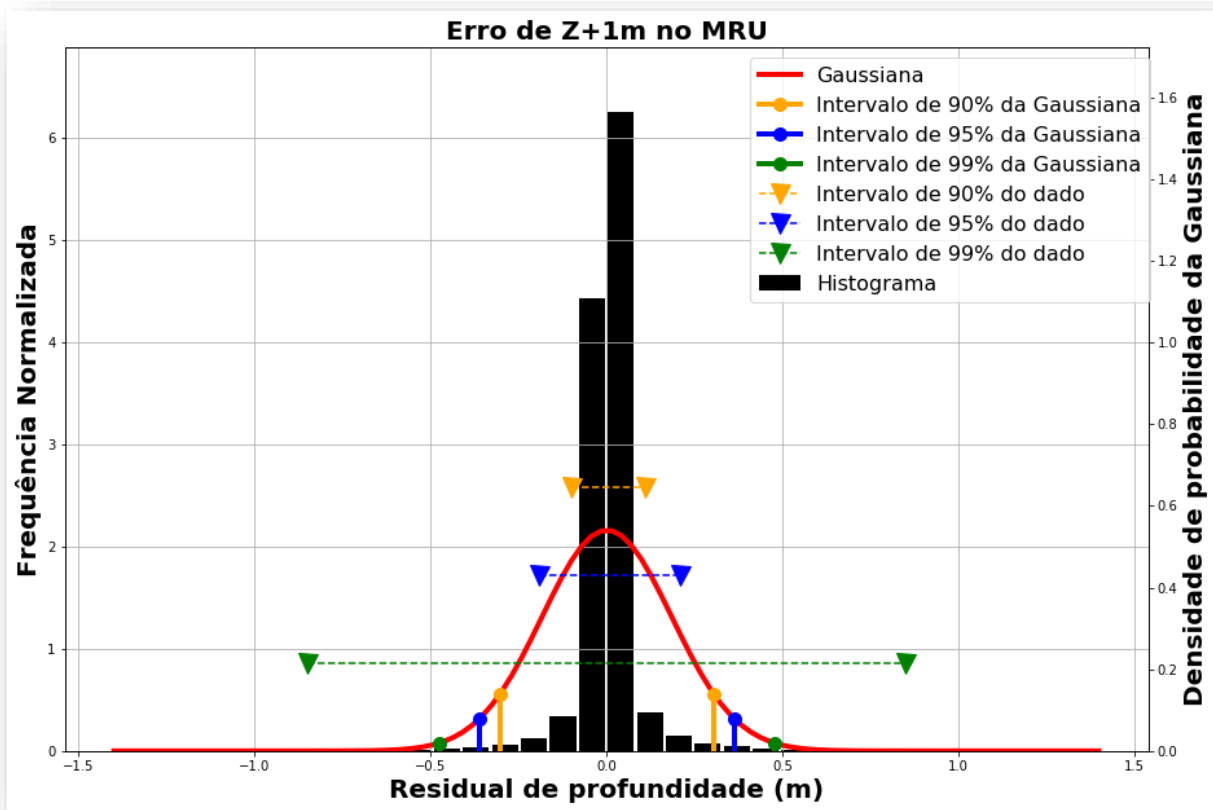


Figura 96 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Z+1m de erro no MRU.

A gaussiana (Figura 96), similar aos erros de *offset* linear no eixo Y do MRU, não foi um bom ajuste. Observamos, também, que 99% dos residuais de medição de profundidade são menores que 1 metro, e 90% do dado possui residual de profundidade menos que 20 centímetros. Como a região de estudo possui de aproximadamente 190-450 metros de profundidade e não há correção de maré, podemos considerar este erro desprezível.

6.4) Simulação e Análise de Erros em *offsets* Lineares do Transdutor

6.4.1) Alteração no Eixo X do Transdutor

As alterações de *offset* linear no eixo X do transdutor são iguais as alterações em -X do sistema de posicionamento. Foram geradas superfícies com -20m de erro em X no sistema de navegação (Figura 98) e com +20m de erro em X do transdutor (Figura 97), e foi averiguado que as superfícies são iguais. A dupla detecção ocorre igualmente, acarretando todos os outros fenômenos que incluem a rugosidade, a formação de degraus e a multiplicação de estruturas. A profundidade é igualmente afetada.

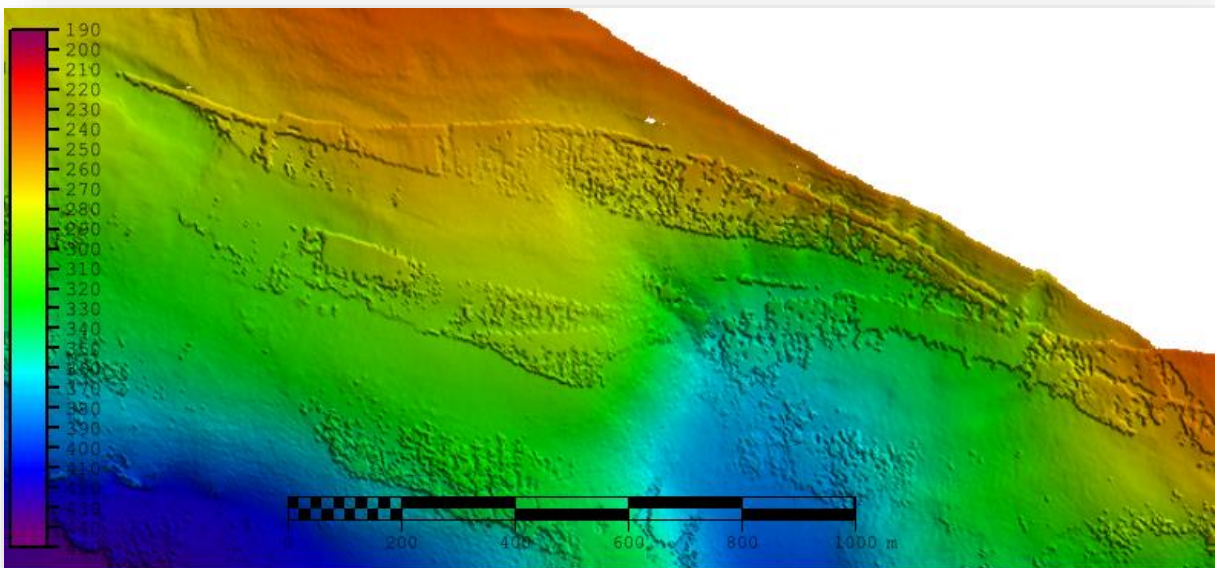


Figura 97 – Superfície com +20m de erro no eixo X do transdutor. Escalas horizontal e vertical em metros.

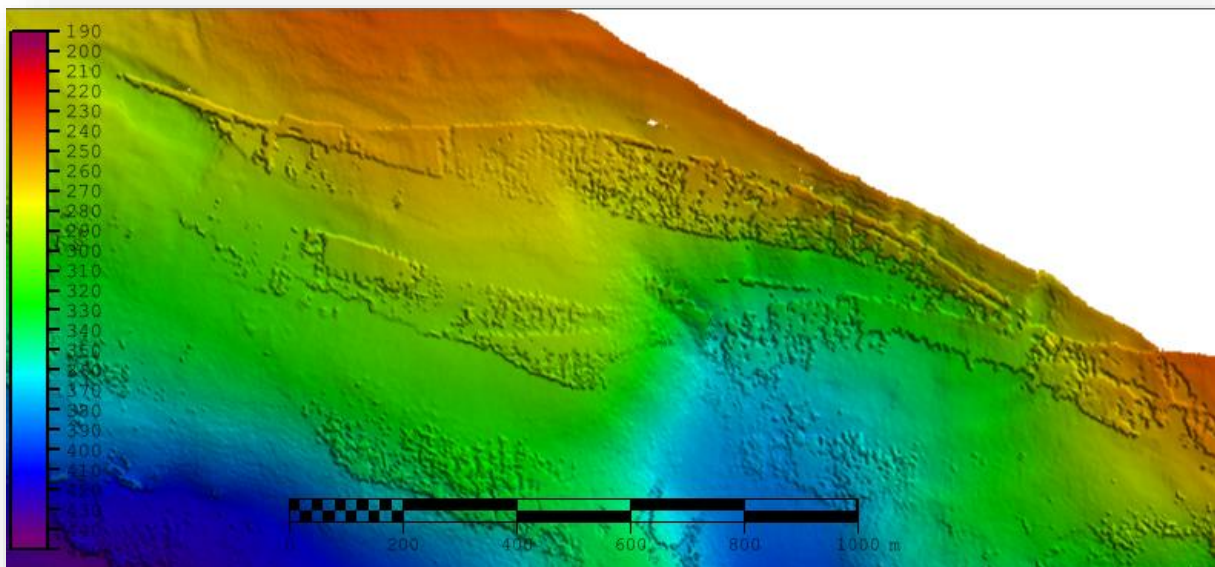


Figura 98 - Superfície com -20m de erro no eixo X do sistema de posicionamento. Escalas horizontal e vertical em metros.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do transdutor em X afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de X+1m (Figura 99), X+10m (Figura 100) e X+20m (Figura 101). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 102.

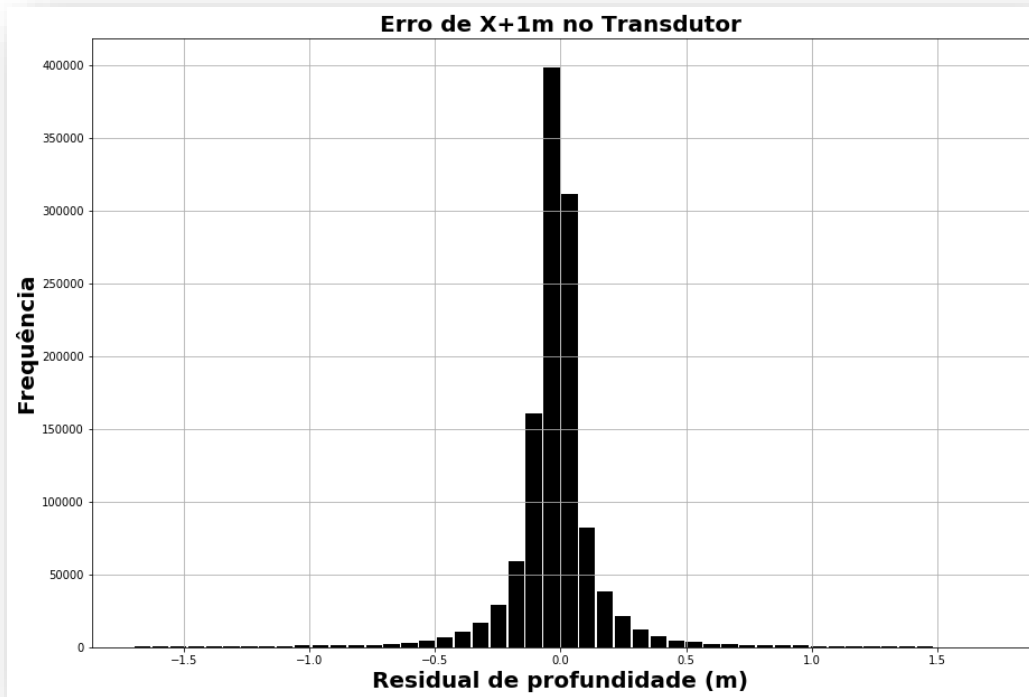


Figura 99 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+1m induzidos no transdutor.

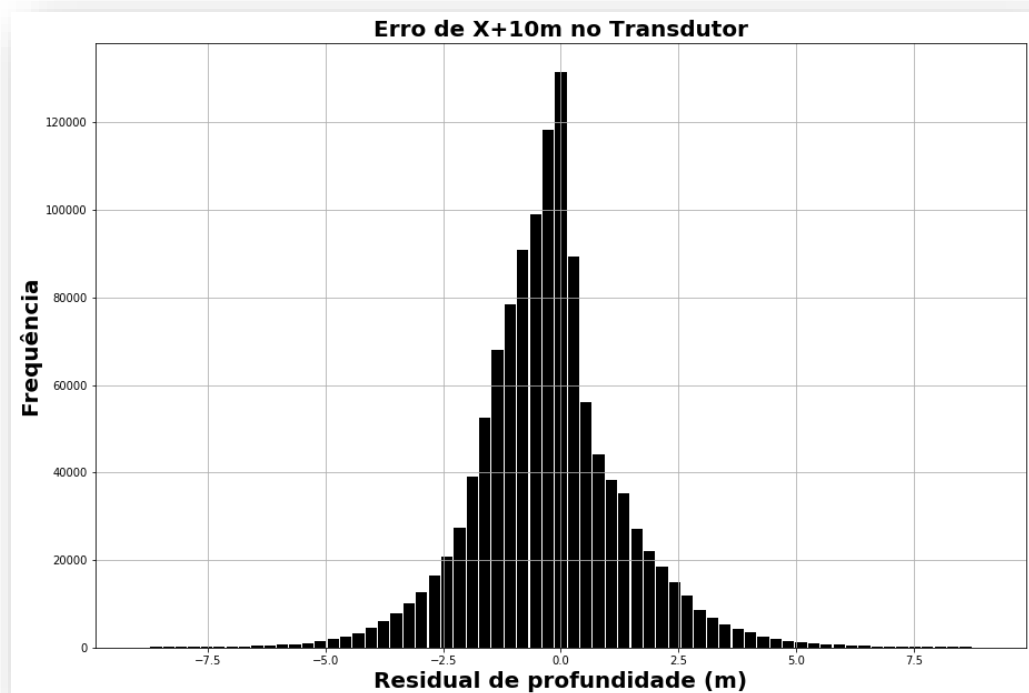


Figura 100 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de X+10m induzidos no transdutor.

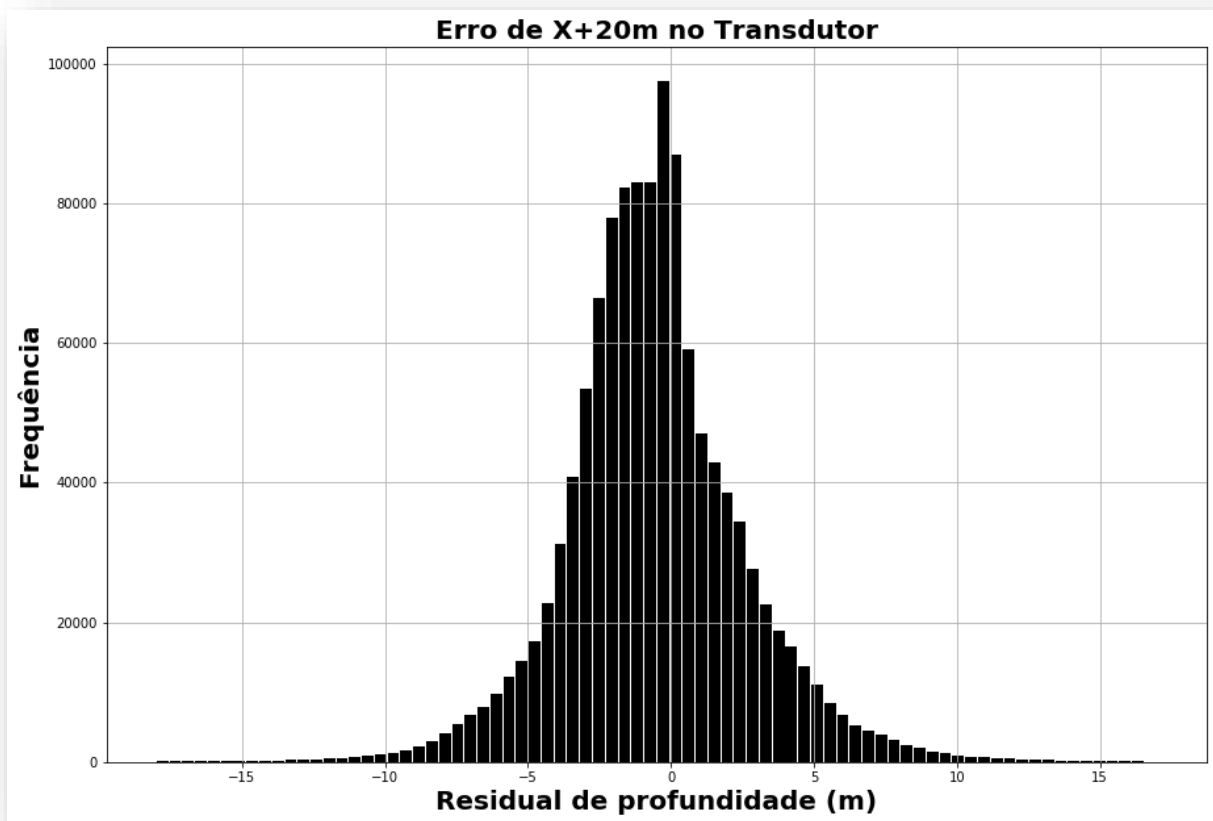


Figura 101 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de $X+m$ induzidos no transdutor.

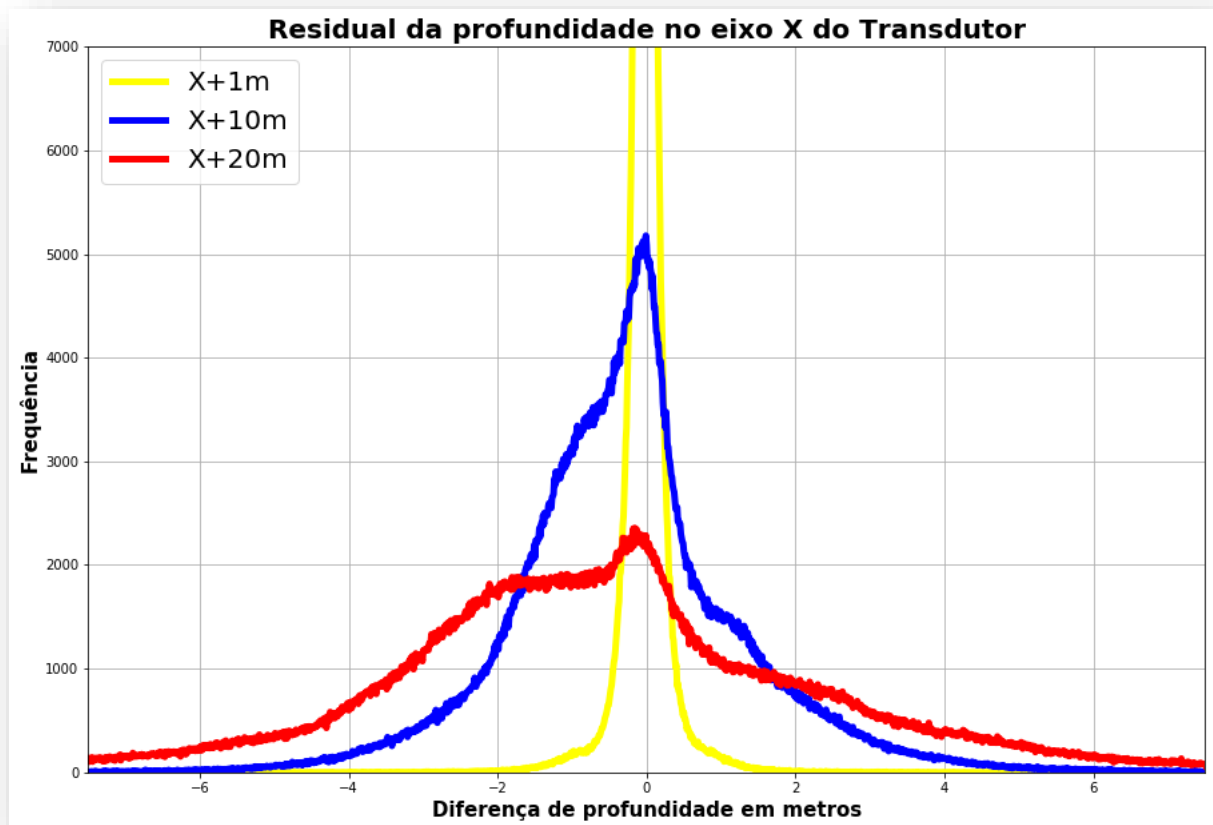


Figura 102 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em X , sob mesma escala, no transdutor.

Nos histogramas dos residuais dos erros de *offset* linear em X do transdutor (Figura 99, Figura 100 e Figura 101), podemos realizar a mesma análise feita nos histogramas dos erros lineares de *offset* no eixo X do sistema de posicionamento. Na Figura 102, observa-se com clareza que as distribuições dos residuais do eixo X do sistema de posicionamento e transdutor são simétricas em seu formato. Esta é a única diferença entre estas distribuições.

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 103, Figura 104 e Figura 105), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

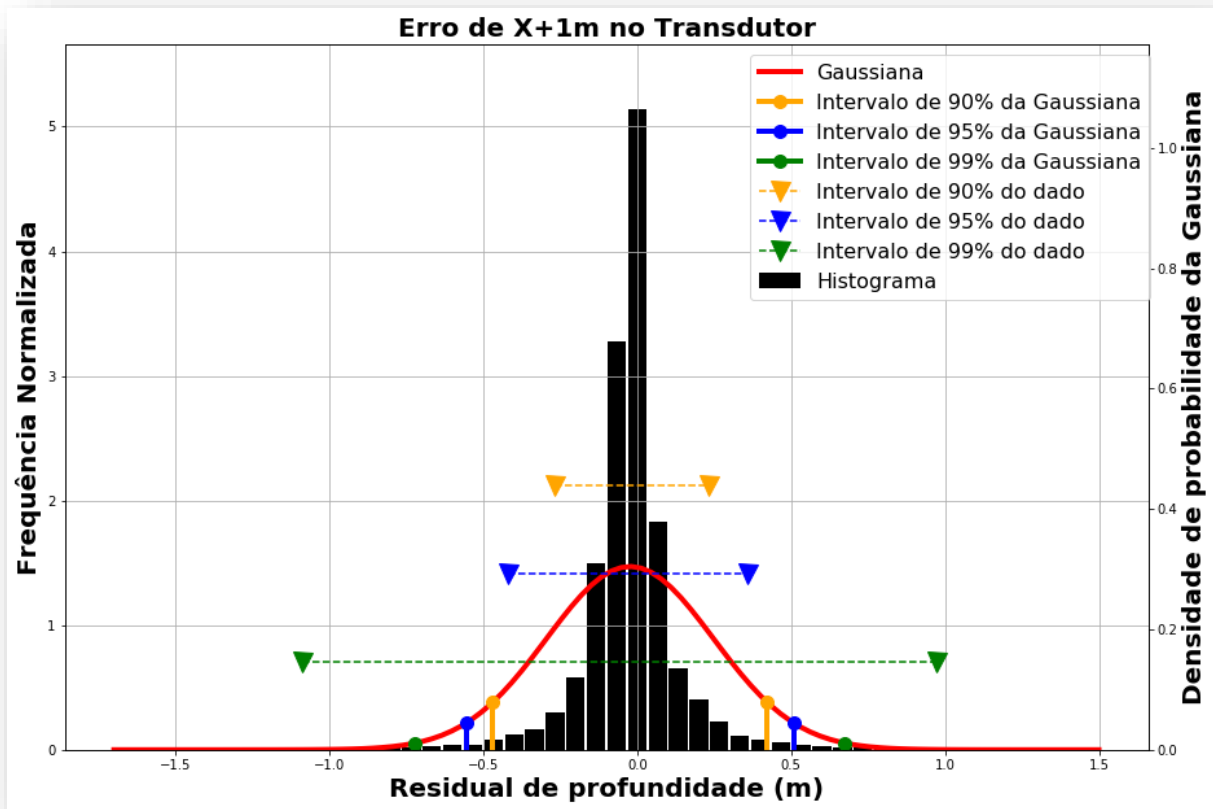


Figura 103 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+1m de erro no transdutor.

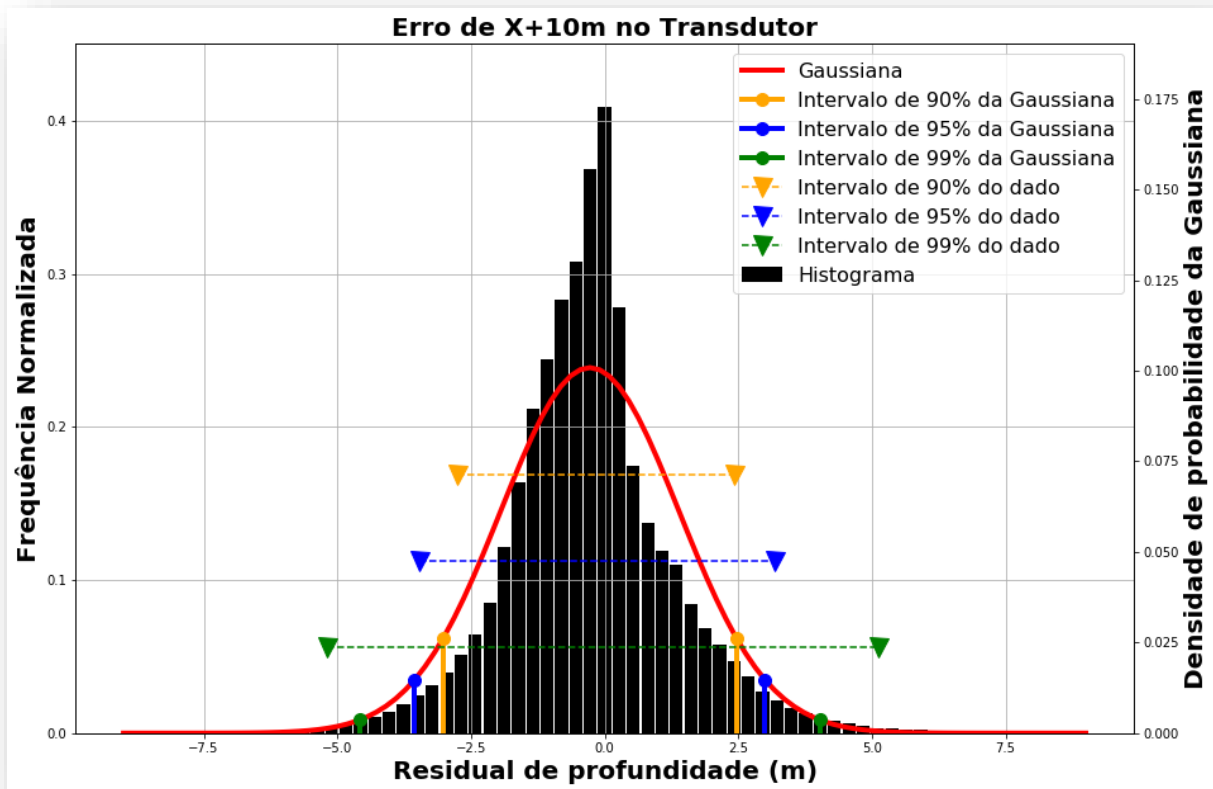


Figura 104 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+10m de erro no transdutor.

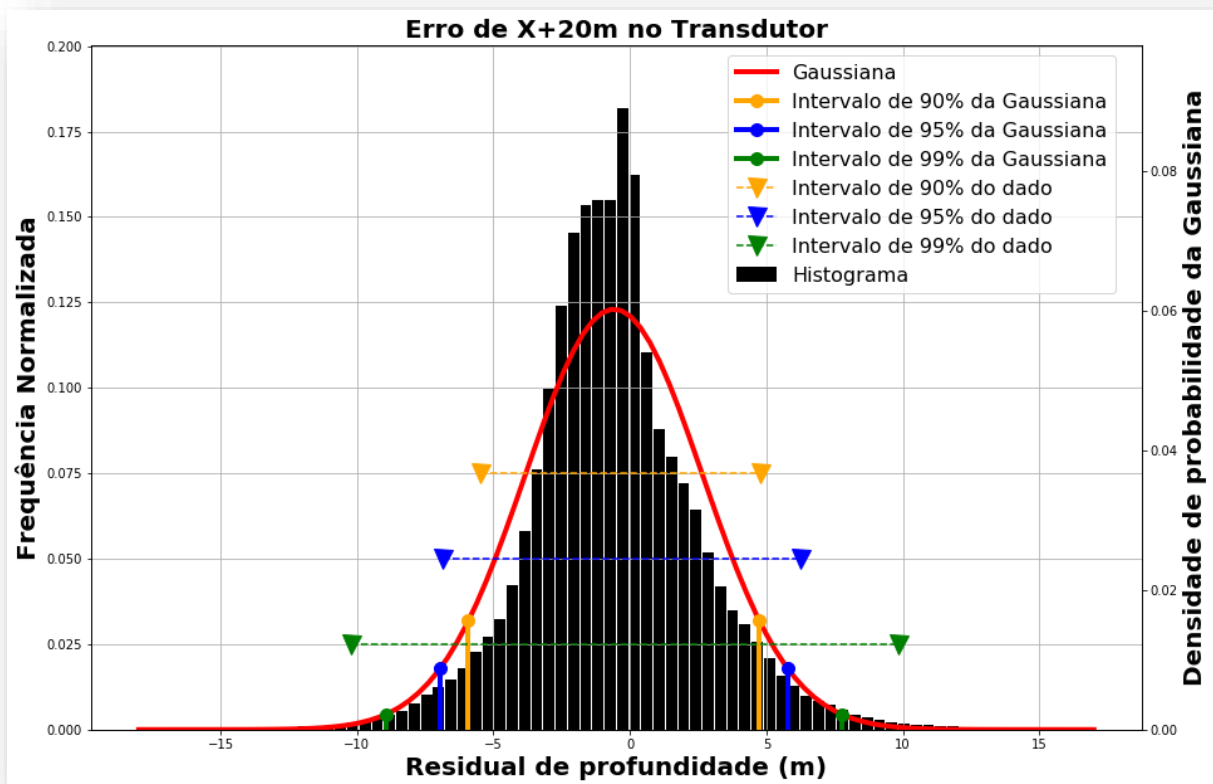


Figura 105 - Histograma com sua gaussiana, da superfície X+20m de erro no transdutor.

As gaussianas da Figura 103, Figura 104 e Figura 105 são iguais as gaussianas dos erros de *offset* linear do eixo X do sistema de posicionamento, mas deslocadas para a esquerda simetricamente. Isto ocorre pois, para calcular a gaussiana, é necessário como parâmetros a média e o desvio padrão. A média do erro de *offset* linear do eixo X em +10metros, do transdutor, é -0,277m, enquanto seu desvio padrão é 1.6704m. A média do mesmo erro, no mesmo eixo, no sistema de posicionamento, é de 0,218m, enquanto o desvio padrão é 1.6714. Há, portanto, uma pequena diferença visualmente não perceptível entre as superfícies.

6.4.2) Alteração no Eixo Y do Transdutor

As alterações de *offset* linear no eixo Y do transdutor são iguais as alterações em -Y do sistema de posicionamento. Foram geradas superfícies com -20m de erro em Y no sistema de navegação e com +20m de erro em Y do transdutor, e foi averiguado que as superfícies são exatamente iguais. A dupla detecção ocorre igualmente, acarretando todos os outros fenômenos que incluem a rugosidade, a formação de degraus e a multiplicação de estruturas. A profundidade é igualmente afetada.

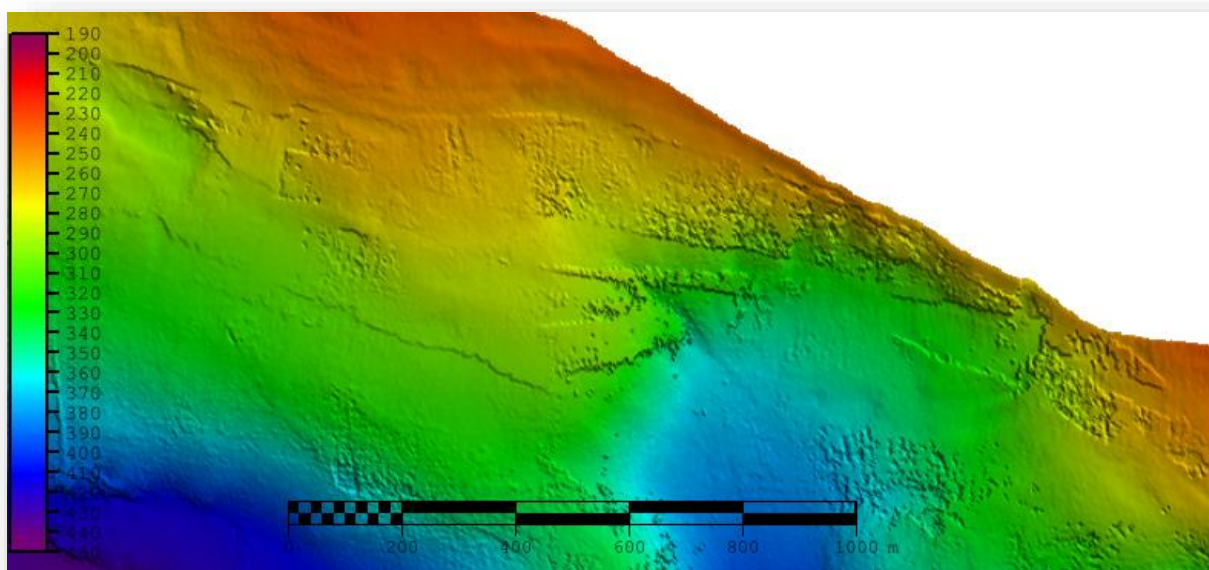


Figura 106 - Superfície com +20m de erro no eixo Y do transdutor. Escalas horizontal e vertical em metros.

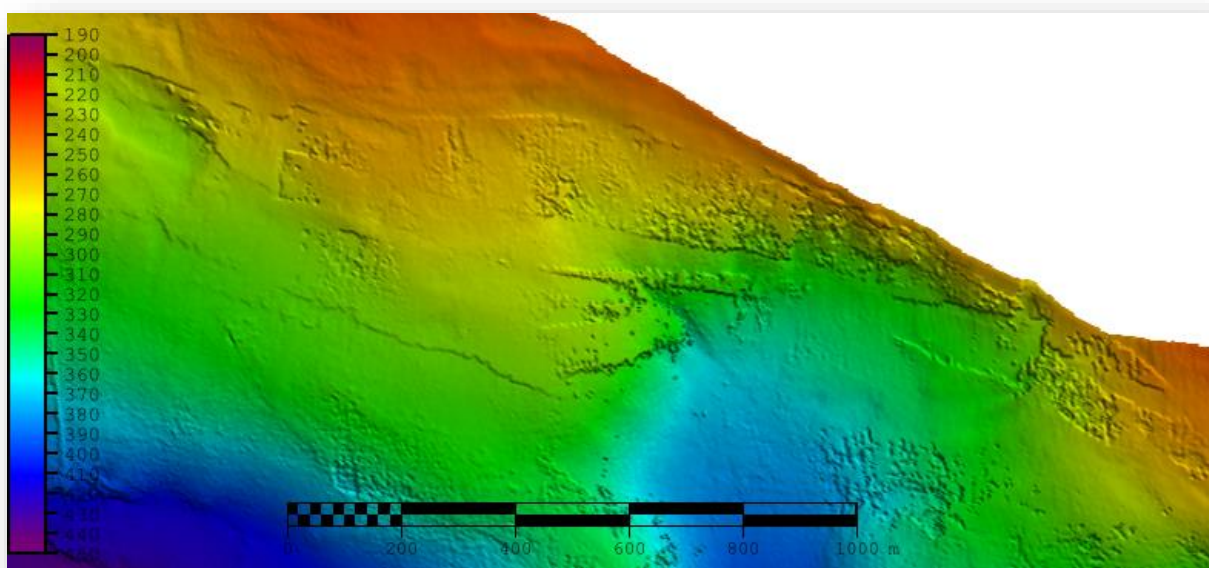


Figura 107 - Superfície com -20m de erro no eixo Y do sistema de navegação. Escalas horizontal e vertical em metros.

Para compreender estatisticamente como erros de *offset* linear do transdutor em Y afetam a profundidade, foi realizada uma análise estatística, a partir das superfícies diferença de Y+1m (Figura 108), Y+10m (Figura 109) e Y+20m (Figura 110). Também foram comparadas as distribuições dos erros conjuntamente, conforme Figura 111.

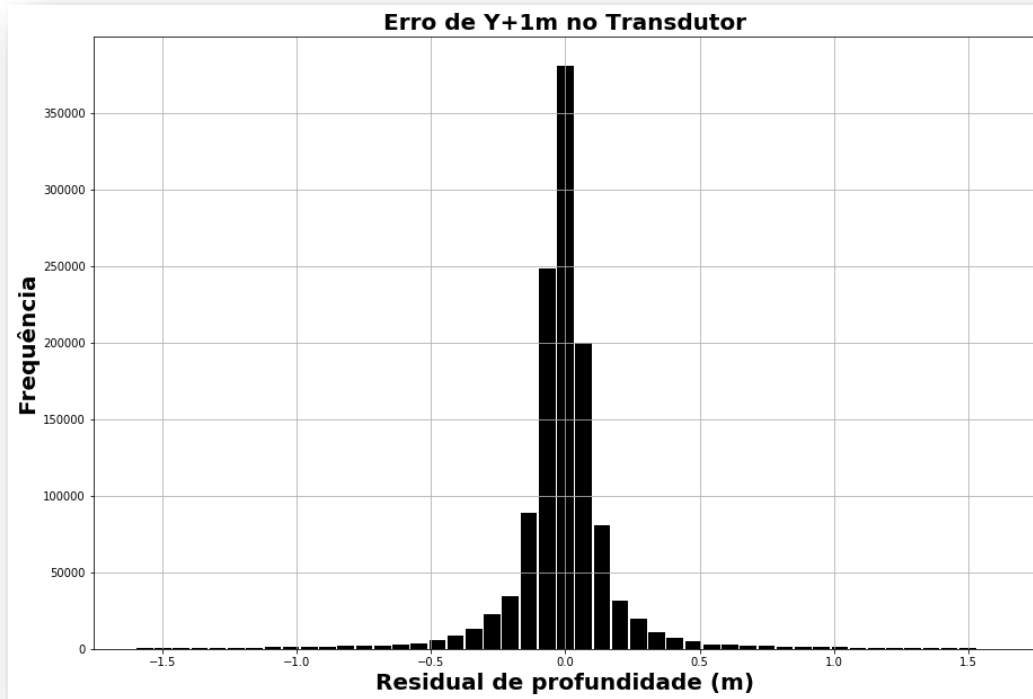


Figura 108 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+1m induzidos no transdutor.

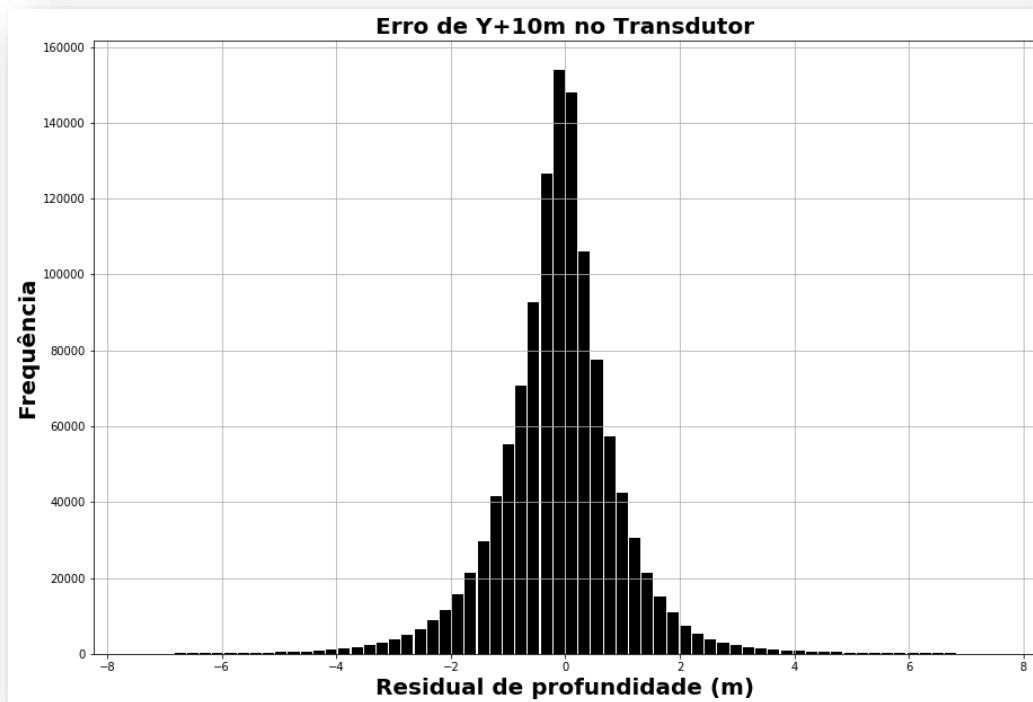


Figura 109 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+10m induzidos no transdutor.

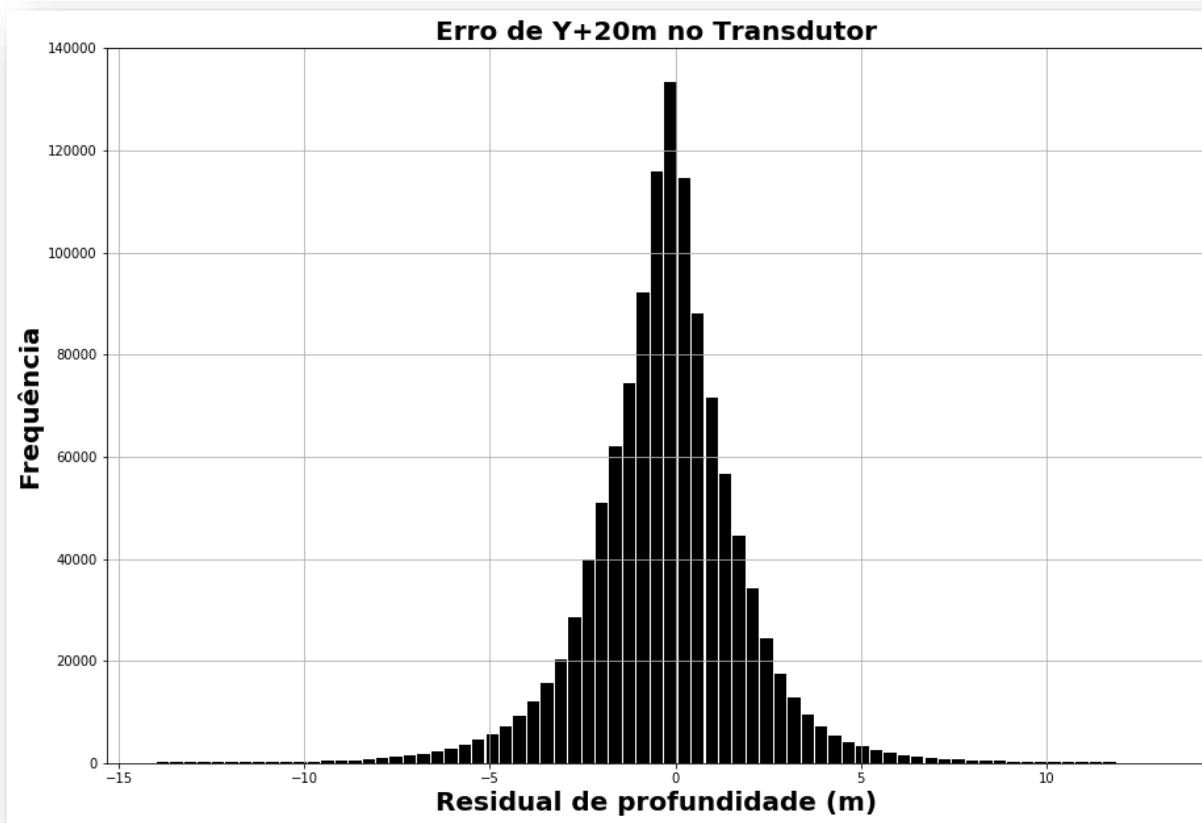


Figura 110 - Histograma da distribuição dos residuais provenientes da superfície diferença, calculada a partir de Y+20m induzidos no transdutor.

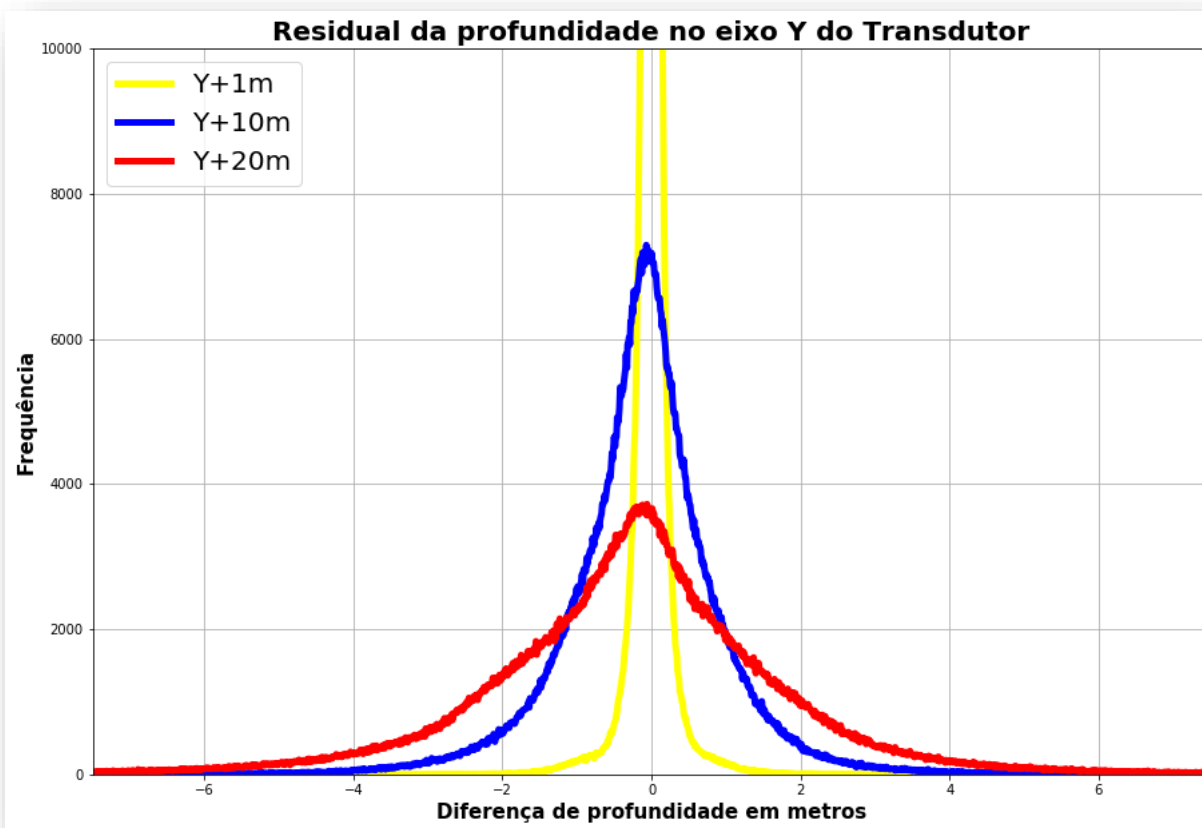


Figura 111 - Comparação das distribuições dos erros +1, +10 e +20 metros em Y, sob mesma escala, no transdutor.

Nos histogramas dos residuais dos erros de *offset* linear em Y do transdutor (Figura 108, Figura 109 e Figura 110), podemos realizar a mesma análise feita nos histogramas dos erros lineares de *offset* no eixo Y do sistema de posicionamento. Na Figura 111, observa-se com clareza que as distribuições dos residuais do eixo Y do sistema de posicionamento e transdutor são muito similares, inclusive mantendo uma moda bem definida próxima de 0.

Foram gerados, também, histogramas com a respectiva gaussiana (Figura 112, Figura 113 e Figura 114), assim como os intervalos da gaussiana e do dado, de 90, 95 e 99%, para poder compreender melhor a distribuição dos erros. Os dados utilizados foram os residuais obtidos nas superfícies diferença.

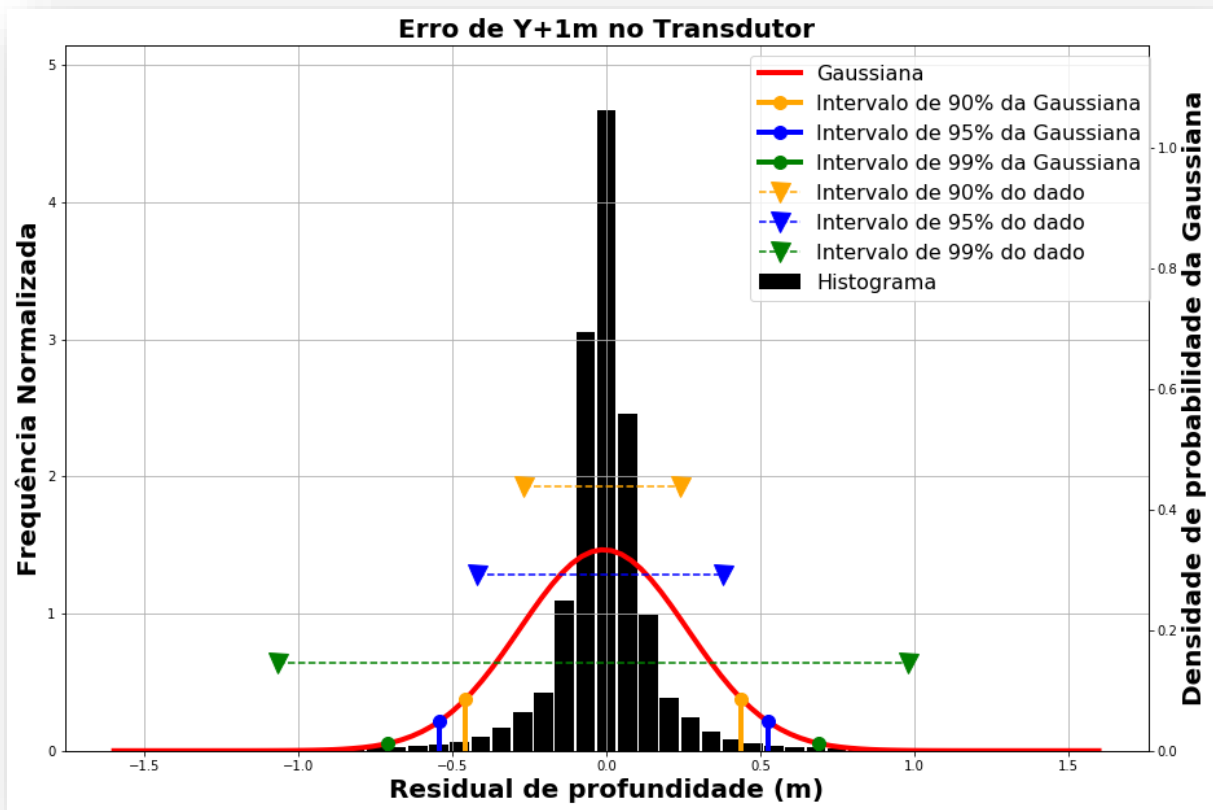


Figura 112 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+1m de erro no transdutor.

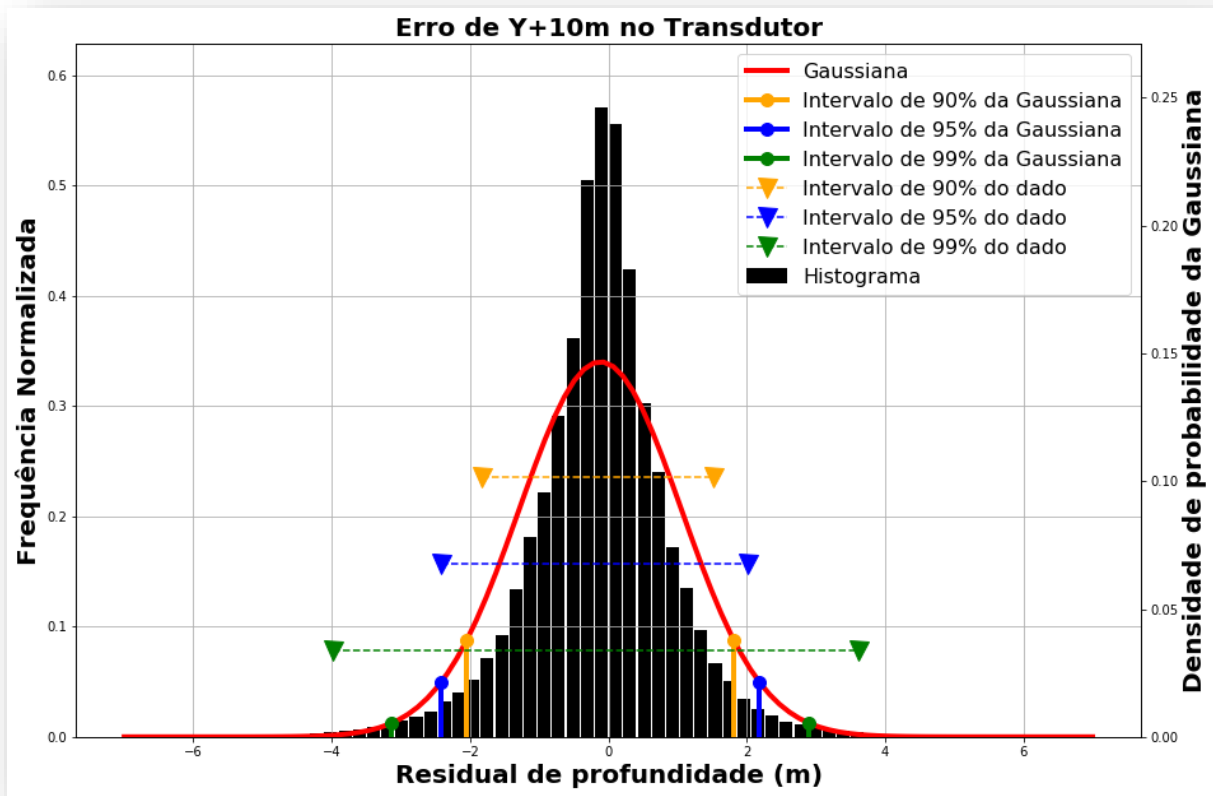


Figura 113 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+10m de erro no transdutor.

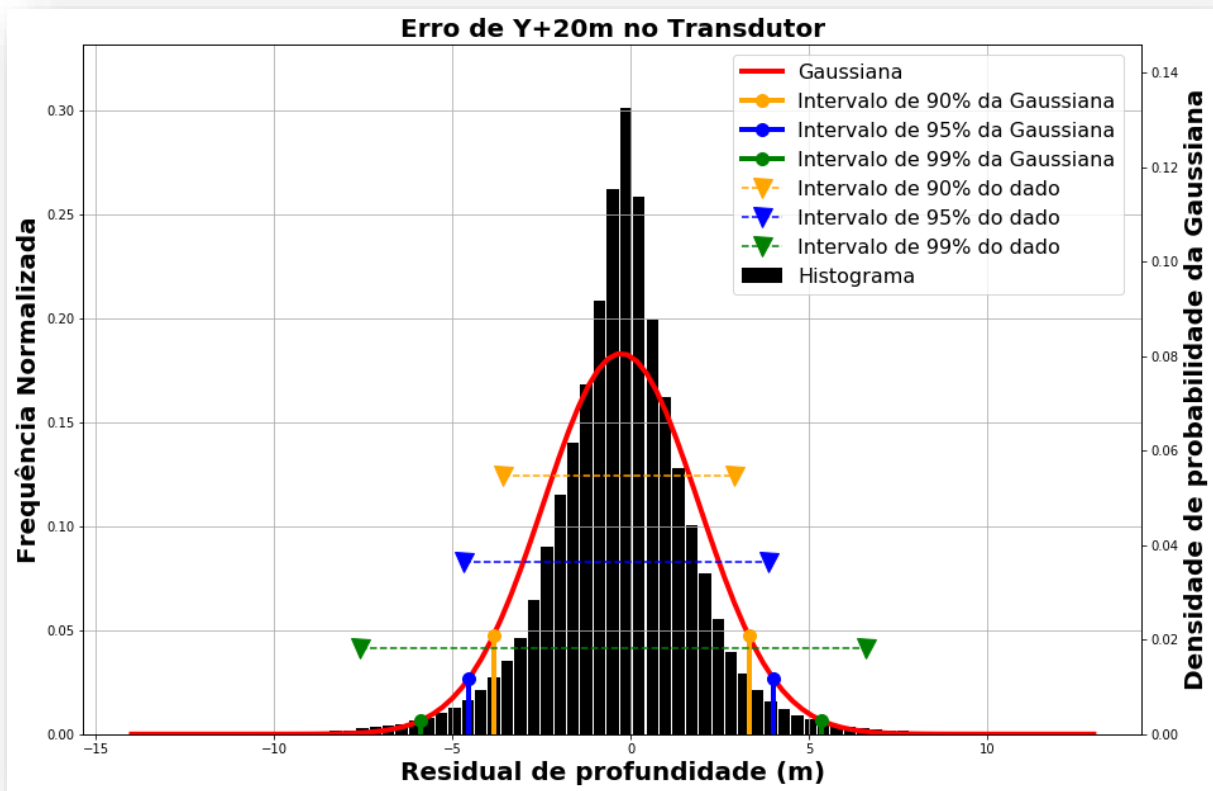


Figura 114 - Histograma com sua gaussiana, da superfície Y+20m de erro no transdutor.

As gaussianas da Figura 112, Figura 113 e Figura 114 são iguais as gaussianas dos erros de *offset* linear do eixo Y do sistema de posicionamento. Se analisarmos a média e o desvio padrão do erro de +10m inserido no eixo Y do transdutor, obteremos -0,1174m e 1,1724m respectivamente. No sistema de posicionamento, obtemos 0,0876m e 1,1373m respectivamente. Há, portanto, uma pequena diferença visualmente não perceptível entre as superfícies.

6.4.3) Alteração no Eixo Z do Transdutor

As alterações de *offset* linear no eixo Z do transdutor são iguais as alterações em -Z do sistema de posicionamento. Foi averiguado que as superfícies não apresentaram nenhum tipo de deformidade: apenas houve deslocamento em Z da superfície como um todo. Foram geradas superfícies com +10m de erro em Z no sistema de navegação, com +10m de erro em Z do transdutor e, com a superfície de referência, foi realizado um perfil (Figura 115 e Figura 116).

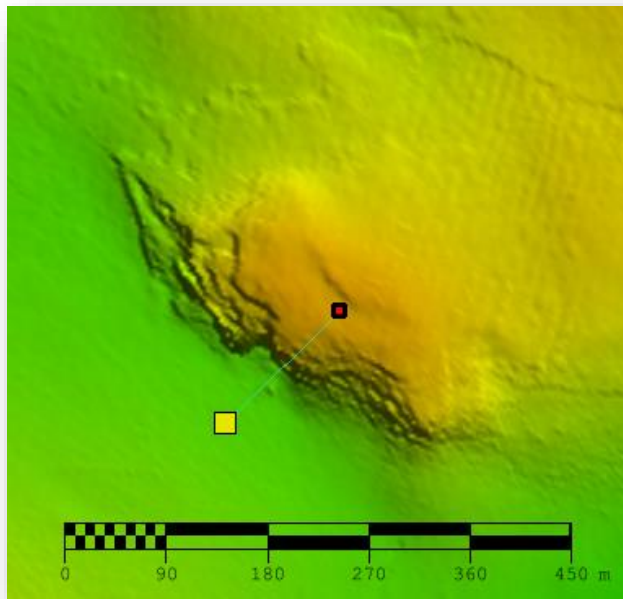


Figura 115 – Perfil que foi utilizado para avaliar erros no eixo Z.

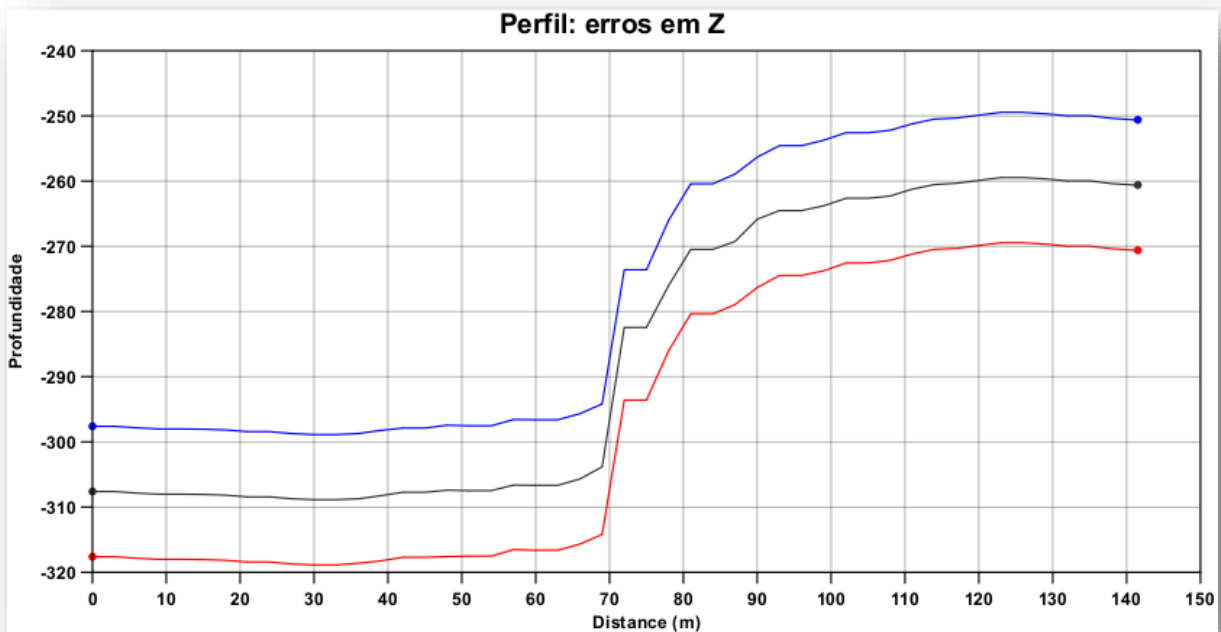


Figura 116 – Perfil mostrando a superfície com +10m de erro no sistema de posicionamento (linha azul), +10m de erro no transdutor (linha vermelha) e superfície de referência (linha preta). Ambos os erros no eixo Z.

7) DISCUSSÕES

7.1) Sistema de posicionamento

Erros lineares de *offset* no sistema de posicionamento nos eixos X e Y deslocam, no respectivo eixo, cada linha. Em casos de linhas paralelas e de mesmo sentido, temos a formação de uma superfície inteiramente deslocada, no respectivo eixo o qual foi induzido erro. Em casos de linhas paralelas e de sentidos opostos, ocorre o fenômeno da dupla detecção do fundo marinho. Considerando um referencial XY estático, cada linha (ou conjunto de linhas) de determinado sentido desloca a superfície em X (ou Y), e cada linha (ou conjunto de linhas) do oposto sentido desloca a superfície em -X (ou -Y). Dessa forma, estruturas detectadas por linhas de ambos os sentidos são deslocadas, afastando-se ou aproximando-se, gerando uma dupla detecção das estruturas. Todo erro induzido nos eixos X e Y afetam somente regiões com determinado gradiente ou estrutura que apresente alguma escarpa. Superfícies planas e não inclinadas não sofrem alteração.

A dupla detecção gera deformidades na superfície: rugosidade, que apresenta-se em região onde as duplas detecções possuem similar densidade de dados, fazendo com que o algoritmo CUBE tenha dificuldade em detectar o real fundo marinho; formação de degraus, ocasionado por duplas detecções com densidade de dados distintas; e multiplicação de estruturas, onde o deslocamento em X ou Y de determinada estrutura gera duplas detecções que são igualmente consideradas reais pelo CUBE.

As alterações de profundidade associadas a erros nos eixos X e Y são associadas somente a regiões que apresentam gradiente considerável e estruturas que contém escarpa(s), como foi evidenciado pela Figura 42.

É importante ressaltar que, para que duplas detecções sejam consideradas duas leituras distintas do fundo marinho, elas não devem possuir intersecção. É necessário que haja um espaçamento sem dados entre as detecções, caso contrário o algoritmo CUBE interpretará como apenas uma detecção. Esta consideração é evidenciada nas apresentações tridimensionais do resultado, onde uma alteração de +1m de erro no eixo X ou Y criaram nenhum artefato na superfície (Figura 24, Figura 30, Figura 37).

Os histogramas evidenciam a natureza da distribuição dos erros nos eixos X e Y separadamente. A ‘cauda’ do histograma, que apresenta as maiores magnitudes de residual de profundidade, corresponde às maiores escarpas, evidenciadas nas superfícies diferença. Já a

parte central do histograma, que contém a maior densidade de frequência, corresponde mais aos planos de leve gradiente, correspondendo a maior parte da superfície do dado, também evidenciado nas superfícies diferença. Entretanto, como o relevo apresentou poucas grandes escarpas se compararmos com a quantidade de planos inclinados em baixo gradiente, os mais altos valores de diferença de profundidade dos residuais (superfícies diferença) foram desprezíveis estatisticamente – as barras inicial e final dos histogramas não contemplaram os limites observados nas respectivas superfícies diferença. Foi observado também uma melhora do ajuste do histograma em relação à gaussiana, conforme aumentou-se o erro. Entretanto nenhum ajuste foi ideal, justamente por causa da natureza do dado: muitos planos inclinados de leve gradiente aumentaram muito a densidade de frequência em torno da mediana do dado, fazendo a gaussiana não conseguir conter em seu interior todos dados próximos da mediana. Caso o dado possuísse uma topografia mais escarpada, provavelmente os histogramas se ajustariam melhor em suas respectivas gaussianas. Nota-se que, em todos os histogramas gerados, o intervalo de 99% do dado é sempre maior que o intervalo de 99% da gaussiana, relevando a importância e impacto estatístico da ‘cauda’, que representa os gradientes mais elevados do dado. Observa-se também, no eixo X do sistema de posicionamento, um deslocamento da mediana do dado para a direita – assumindo valores médios positivos de residual, afastando-se do zero. Ressalta-se que todas superfícies diferença foram geradas pela superfície simulada subtraída da superfície de referência. Portanto, o resultado residual apresentou dados ligeiramente mais positivos de diferença de profundidade. Este fenômeno ocorre na parte central do histograma, ou seja, é relativo aos planos de baixo gradiente presentes no dado. Uma hipótese razoável para tal desvio da mediana é a direção predominante do relevo do dado, que se aprofunda conforme o sentido NO-SE; e do sentido das linhas de navegação. Neste arranjo, a superfície simulada em X da navegação diminuiu, em geral, um pouco mais a profundidade. Curiosamente, este efeito de deslocamento da mediana não foi observado nos erros inseridos no eixo Y.

Erros positivos em X deslocam a linha sentido estibordo, enquanto erros positivos em Y deslocam a linha sentido proa.

Erros associados ao eixo Z somente alteram a medição de profundidade, deslocando a superfície inteiramente. Erros positivos em Z reduziram a profundidade de medição.

Os erros lineares de *offset* no sistema de posicionamento, nos eixos X, Y e Z, são classificados como erros estáticos.

7.2) MRU

As simulações de erros de *offset* no MRU nos eixos X e Y criam *heave* induzido. No eixo X, o *heave* induzido ocorre em função do *roll*; enquanto no eixo Y ocorre em função do *pitch*. As frequências de oscilação do *heave* induzido são proporcionais as frequências de oscilação do *roll* (no caso do eixo X) e do *pitch* (no caso do eixo Y). Em termos de amplitude, foi observado amplitudes um pouco maiores na oscilação do *roll* do que do *pitch*. Por conseguinte, as amplitudes nas oscilações do *heave* induzido no eixo Y foram menores em relação ao eixo X. As alterações na medição de profundidade não foram significativas, conforme análise qualitativa na superfície diferença e quantitativa nos histogramas. Somente com +20m de erro em X foi possível observar o efeito de *swell* do *heave* induzido na superfície, de aproximadamente 1 metro de amplitude – a oscilação do *roll* foi menor que o intervalo de -1 a 1 grau, o que justifica o reduzido efeito de *heave* induzido. No eixo Y, +20m de erro não foram suficientes para ver qualquer tipo de diferença na superfície – a amplitude de oscilação do *pitch* foi quase metade da do *roll*, portanto o *heave* induzido foi imperceptível. A única forma de constatar o *heave* induzido com clareza foi através da superfície diferença, e mesmo assim de forma muito sutil: somente com uma escala de -1 a +1m na superfície diferença foi possível observá-lo no eixo X, e -0,3 a +0,3m no eixo Y, considerando +20m de erro em ambos os eixos.

Os erros lineares de *offset* no MRU, nos eixos X e Y, são classificados como erros dinâmicos, pois variam de acordo com a oscilação do *roll* e do *pitch*, respectivamente.

Os histogramas relativos aos erros induzidos nos eixos X e Y apresentaram uma magnitude de erro muito baixa, como já esperado devido ao fraco efeito do *heave* induzido. Conclui-se então que foi verificado o efeito de *swell*, e que este é proporcional ao *roll* (no caso do eixo X) e ao *pitch* (no caso do eixo Y), no que diz respeito à frequência e à amplitude. Os resultados tímidos do *heave* induzido foram apenas circunstanciados pela favorável condição maregráficas, tamanho considerável da embarcação e ao fato de que a área de estudo de situa em região abrigada. A ‘cauda’ dos histogramas, no caso dos erros de *offset* lineares do MRU, representa as maiores amplitudes de oscilação do *roll* (para o eixo X) e do *pitch* (para o eixo Y). A distribuição de maior frequência (em torno do zero) representa as menores oscilações de *roll* (no caso do eixo X) e do *pitch* (no caso do eixo Y). Entretanto, reitera-se que não foi observado efeito de *swell* na superfície onde houve 200% de sobreposição ou mais de linhas. Mas, na superfície diferença, foi constatado que havia, sim, efeito de *swell* em toda dimensão do dado. Todavia, a intersecção de linhas gerou uma intersecção de efeitos de *swell* de

diferentes amplitudes e frequências, mascarando o efeito de *heave* induzido na superfície. Pressupõe-se que o algoritmo CUBE, na região de 200% ou mais de sobreposição de linhas, não identificou o *heave* induzido como fundo verdadeiro. Desta forma entende-se que a maior parte dos residuais, na parte central do histograma, não alteraram a medição de profundidade. E, por conseguinte, as maiores magnitudes dos residuais representam as regiões com apenas 100% de cobertura de fundo marinho.

Foi observado, também, um desvio da distribuição dos erros para a direita conforme o aumento do erro linear de *offset* no eixo X do MRU. Tal fenômeno é explicado por haver, em determinadas linhas de navegação, alguma forçante (maré ou vento) atuando sobre a embarcação. Foi observado no *Attitude Editor* (CARIS HIPS and SIPS) que houve deslocamentos da oscilação de *roll* em determinadas linhas, como exemplificado na Figura 117.

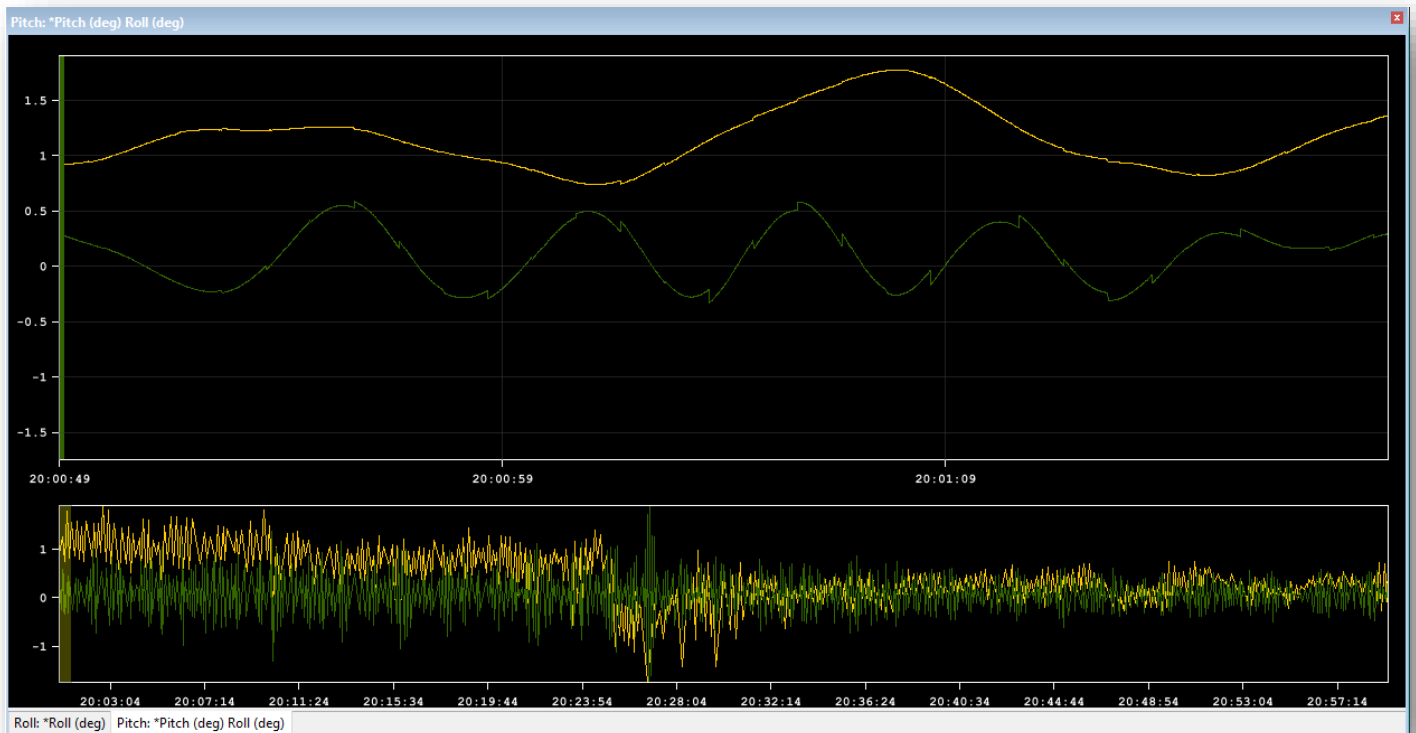


Figura 117 - Exemplo de linha, no *Attitude Editor*. Em verde, as oscilações de pitch. Em amarelo, as de Roll. No quadro superior, é evidente que o roll oscila em torno de 1 grau, enquanto o pitch oscila em torno de 0 graus. No quadro inferior, é notável que o roll se comporta de duas formas distintas: primeiramente oscilando em torno de 1 grau e, depois, oscilando em torno de 0 graus. Tal efeito é causado por alguma forçante (vento ou maré) sobre a embarcação.

O gráfico da gaussiana não foi um bom ajuste para os erros do MRU, pois a magnitude dos residuais de profundidade foram muito baixas.

No eixo Z, não houve nenhuma alteração significativa na superfície. Erros induzidos com magnitude de +1, +10 e +20m apresentaram o mesmo resultado. Houve apenas, em superfície diferença, alguns *spykes* associados às regiões escarpadas. A hipótese mais plausível

para esse resultado é que houve apenas um resíduo ocasionado pelo próprio algoritmo do CARIS HIPS and SIPS, o que caracteriza um erro proveniente do próprio sistema.

7.3) Transdutor

Os erros lineares de *offset* associados ao transdutor foram iguais aos de navegação, entretanto seus eixos ficaram inversos: os deslocamentos em X, Y e Z da navegação foram iguais aos deslocamentos em -X, -Y e -Z do transdutor. Isso ocorreu devido à disposição geométrica dos sensores (Figura 118).

Como o sistema de posicionamento está à frente do transdutor, deslocar o transdutor para +Y significa, em termos de deslocamento relativo, deslocar o sistema de posicionamento para -Y.

Como o sistema de posicionamento está à bombordo do transdutor, deslocar o transdutor para +X significa, em termos de deslocamento relativo, deslocar o sistema de posicionamento para -X.

Como o sistema de posicionamento está mais ao alto em relação ao transdutor, deslocar o transdutor para +Z significa, em termos de deslocamento relativo, deslocar o sistema de posicionamento para -Z.

Point	x(+stb)	y(+fwd)	z(+up)	Description
Seapath Port	-0.780	16.111	20.721	Centre Antenna
Seapath Stb	1.720	16.190	20.746	Centre Antenna
GPS PORT	-2.510	16.587	20.960	Centre Antenna
GPS STB	3.417	16.620	21.042	Centre Antenna
New MRU	0.000	0.000	0.000	Centre top MRU
MRU 1	-1.913	4.809	0.119	Centre top MRU
MRU 2	2.881	4.788	0.108	Centre top MRU
Sub bottom Profiler	0.231	27.950	-10.057	Center face
TX	1.042	27.447	-10.061	Center face
RX	0.468	23.452	-10.063	Center face
Hipap underside head	-0.739	-0.868	-10.761	Fully Extended
COG Light ship cond.	0.352	3.597	-2.457	Calculated from offsets given

Figura 118 – Offsets da embarcação Almirante Maximiano. Fonte: relatório de offsets medidos da embarcação Almirante Maximiano. Seapath Stb corresponde ao posicionamento do sistema de navegação. Tx e Rx são, respectivamente, o transmissor e o receptor do sinal batimétrico.

Os erros nos eixos X, Y e Z do transdutor são, assim como no sistema de posicionamento, classificados como estáticos.

Os histogramas apresentaram mesmo comportamento, porém quase simétricos, em relação aos histogramas gerados pelos residuais do sistema de posicionamento.

Caso os erros de *offset* linear dos eixos X ou Y do transdutor fossem iguais aos erros de *offset* linear do sistema de posicionamento, as gaussianas de ambos teriam o mesmo desvio padrão, para uma mesma magnitude de erro no eixo. Além disso, suas médias deveriam ser iguais em módulo. Entretanto, encontramos diferenças entre os desvios padrão e as médias, o que comprovou que ambos os erros não se comportam de forma absolutamente igual. A explicação para tal fenômeno é a realização do SVC: para deslocar o transdutor, é necessário realizar novamente a correção de velocidade do som para reordenar a direção dos feixes. Portanto, a pequena diferença de desvio padrão e de média que observamos nas gaussianas foram consequência da reorientação dos feixes, necessária pois alterar o transdutor é modificar a posição de saída do sinal batimétrico.

7.4) Comparação com outros trabalhos

Conforme Hughes Clarke (2003), existem duas formas de erros de *offset* linear: estáticos e dinâmicos. Todos os erros encontrados nas simulações realizadas nesse trabalho se enquadraram nesta definição. Hughes Clarke (2003) também descreveu e ilustrou (Figura 9) o fenômeno de *heave induzido*, que foi constatado neste trabalho nas variações dos eixos X e Y do MRU.

Segundo Dunnewold (1998), erros de *offset* lineares da movimentação dos eixos X, Y e Z acarretam erros na razão 1:1, como foi constatado em todas as visualizações 2D do *Subset Editor*. Dunnewold (1998) também ilustrou (Figura 10 e Figura 11) esquematicamente como é o comportamento de tais erros, que foi corroborado pelas simulações feitas neste trabalho. Entretanto, algumas observações podem ser feitas: feixes muito espessos podem mascarar o erro de *offset* linear nos eixos X e Y do transdutor e do sistema de posicionamento, em se tratando de análises de superfície, caso a magnitude seja menor que a espessura do feixe. Tal fenômeno foi constatado nas simulações com +1m de erro induzido, onde as visualizações 3D da superfície não apresentaram nenhuma mudança significativa; Erros de *offset* linear no

transdutor podem apresentar comportamento reverso (erro em X e/ou Y e/ou Z, deslocamento em -X e/ou -Y e/ou -Z), dependendo do posicionamento entre o transdutor, o sistema de posicionamento e o sistema de coordenadas.

8) CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DE PESQUISA

Finalmente, através da demonstração de como erros de *offset* lineares deformam e deslocam a superfície, se torna evidente a importância de uma boa calibração linear de *offset* para aquisição de dados batimétricos de qualidade. E, igualmente importante, é a habilidade dos operadores de campo e de processamento de dados identificarem estes erros. Como foi mostrado no capítulo Metodologia, é possível corrigir estes erros no software CARIS HIPS and SIPS, através de configuração do arquivo de *vessel*, procedida de realização do SVC.

Portanto, é interessante ressaltar que erros de medição de *offset* podem ser corrigidos, e que linhas coletadas com estes erros podem ser recuperadas, caso se tenha em mãos os *offsets* corretos. Caso não se tenha os *offsets* corretos, é possível em teoria corrigir manualmente erros em X e Y do transdutor, do sistema de posicionamento e do MRU. Para tal, é necessária uma compreensão bem clara do comportamento destes erros, para proceder de acordo com o método proposto pelo Dunnewold (1998), no caso dos erros em X e Y do transdutor e do sistema de posicionamento. Para solucionar os erros do MRU, não pode haver erros em X e Y simultaneamente, pois o *heave* induzido seria uma resposta conjunta das oscilações do *roll* e *pitch*, simultaneamente. Só há possibilidade de resolução caso o erro de *offset* linear ocorra em algum eixo (X ou Y) isoladamente. Desta forma, seria necessário correlacionar a altura do *swell* com seu respectivo pico de amplitude do *roll* (no caso do eixo X) ou do *pitch* (no caso do eixo Y) em algum ponto em *nadir* (direção do eixo Z da embarcação) e tentar estimar, por trigonometria, o *heave* induzido. Tal método é uma das possibilidades de continuidade da pesquisa: um aprofundamento da calibração *patch test* durante o processamento dos dados, envolvendo também *offsets* lineares. Erros em Z do transdutor (*Waterline Height*) e do sistema de posicionamento são impossíveis de corrigir, caso não se tenha os *offsets* corretos da embarcação. Erros em Z do MRU são indetectáveis e indiferentes.

Este trabalho foi o início de uma linha de pesquisa sobre calibração de *offsets*. Futuramente, havendo continuidade, é interessante realizar a mesma análise com a calibração angular de *offsets* (*roll*, *pitch* e *yaw*) e latência, com a finalidade de estudar todos estes erros de

calibração conjuntamente, assim como a relação entre eles. É interessante, também, realizar o estudo sugerido utilizando dados batimétricos provenientes de levantamento de Ordem Especial (NORMAM-25; S-44). Desta forma, o trabalho teria uma dimensão de maior importância dentro do contexto do mercado de trabalho e confecção de cartas náuticas, onde seriam avaliados critérios objetivos da própria Ordem Especial. Após análise completa dos *offsets*, a sugestão de continuidade seria aprofundar a questão do *patch test* durante a etapa de processamento dos dados, criando uma diretriz de solução de erros de *offset* lineares simultaneamente com angulares.

9) REFERÊNCIAS

- Ainslie, M. A., & Morfey, C. L. (2005). “Transmission loss” and “propagation loss” in undersea acoustics. *J Acoust Soc Am*, *118*(2), 603–604.
<https://doi.org/10.1121/1.1960170>
- Coppens, A. B. (1976). *An introduction to the sonar equations with applications*. 121.
Retrieved from <http://hdl.handle.net/10945/28967>
- Cronin, B. D., Broadus, M., Reed, B., Office, N. O., & Space, S. (2000). *Hydrographic Workflow - From Planning to Products*.
- Dunnewold, J. (1998). *Dynamic calibration of multibeam systems*.
- Etter, P. C. (2003). *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*.
<https://doi.org/10.4324/9780203417652>
- Ferreira, I. O. (2013). *Coleta , processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilistic*. 70.
- Fisher, F., & Simmons, V. (1977). Sound absorption in sea water. *The Journal of the Acoustical Society of ...*, *62*(May), 558–564. Retrieved from
<http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/62/3/10.1121/1.381574>
- Gagg, G. (2016). *LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS – NOÇÕES GERAIS*. 1–41.
- Godin, A. (1998). The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems. In *UNB Geodesy and Geomatics Engineering*.
- Gueriot, D., Chedru, J., Daniel, S., & Maillard, E. (2000). The patch test: a comprehensive calibration tool for multibeam echosounders. *Proceedings of the OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition.*, *3*, 1655–1661.
<https://doi.org/10.1109/OCEANS.2000.882178>
- Hansen, R. E. (2014). Introduction to SONAR. *Igarss 2014*, *2010*(1), 1–5.
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Hare, R. (1995). Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding.

- International Hydrographic Review*, (March), 37–69.
- Hare, R. (2008). *NEW DATA PROCESSING TRENDS IN Multi-beam Error Management*.
- Hell, B. B., & Öiås, H. (2014). *A new bathymetry model for the baltic sea*. (November), 21–32.
- Hughes Clarke, J. E. (2003). Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data : Ironing out the Creases. *International Hydrographic Review*, 4(March 2003), 6–23.
- IOC, I. O. C. (1985). Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume III: Reappraisals and Recommendations. *JCOMM Technical Report, I*, 75. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001477/147773e.pdf>
- Krueger, C. P. (1999). Integração do GPS e da ecobatimetria. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 5, 55–68.
- L-3 Communication SeaBeam Instrument. (2000). *Multibeam Sonar Theory of Operation*. Retrieved from <https://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/MB-System/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>
- Lopes, C. F. R., Jos, C. D., Eng, M. R., Dolores, M., Brand, T. E. N., & Os, C. (2002). *ANAIS do Instituto Hidrográfico*.
- OHI. (2005). MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE. In *Manual de Hidrografia, pub. C-13* (pp. 115–190).
- Ramos, A. M. (2007). *APLICAÇÃO, INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA DE REDUÇÕES BATIMÉTRICAS ATRAVÉS DO METODO GPS DIFERENCIAL PRECISO*.
- Real, V., & Ant, S. (2001). *Esquema de Funcionamento da Batimetria em Tempo Real*. 1–12.
- Tang, Q. H., Zhou, X. H., Liu, Z. C., & Du, D. W. (2005). Processing multibeam backscatter data. *Marine Geodesy*, 28(3), 251–258. <https://doi.org/10.1080/01490410500204595>
- Viana, F. (2014). *Caracterização sedimentar glaciomarinha da deglaciação da baía do almirantado desde o último máximo glacial, arquipélago das shetland do sul, antártica*.
- Vidal, J., Berrocoso, M., & Fernández-Ros, A. (2012). Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 24(2), 193–201.

<https://doi.org/10.1017/S095410201100068X>

10) BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

AN INTRODUCTION TO UNDERWATER ACOUSTICS: Principles and Applications. 2002, Xavier Lurton.

FÍSICA: UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA – Volume 2, Termodinâmica e Óptica; Randall D. Knight.

Geofísica de Exploração. Autores: Philip Kearey, Michael Brooks, Ian Hill.

11) OUTRAS FONTES:

An Invitation to Oceanography; presentation; 2003; Jones and Barlett Presentation

CARIS HIPS and SIPS 10.4 User Guide

CARIS HIPS and SIPS Reference Guide, version 11.2

Caris Support Services

EM 302 Product Specification

HIPS and SIPS Technical Note Sound Velocity Correction Kongsberg EM Data

Métodos Acústicos – Princípios e métodos I; ministrada pelo PhD Arthur Ayres Neto em 2016; Notas de aula.

Relatório dos *offsets* da embarcação Almirante Maximiano.

ANEXO A

Percentil (%)	Residuais de Erros no Sistema de Posicionamento (m)					
	Y+1m	Y+10m	Y+20m	X+1m	X+10m	X+20m
2,50	-0,36	-2,03	-3,92	-0,39	-3,17	-6,34
5,00	-0,23	-1,50	-2,90	-0,25	-2,40	-4,88
7,50	-0,17	-1,22	-2,36	-0,19	-1,97	-4,04
10,00	-0,14	-1,03	-2,01	-0,15	-1,65	-3,40
12,50	-0,12	-0,88	-1,75	-0,12	-1,42	-2,92
15,00	-0,10	-0,76	-1,53	-0,10	-1,22	-2,53
17,50	-0,09	-0,66	-1,33	-0,08	-1,03	-2,17
20,00	-0,08	-0,57	-1,15	-0,07	-0,86	-1,85
22,50	-0,07	-0,49	-0,99	-0,05	-0,70	-1,54
25,00	-0,06	-0,42	-0,85	-0,04	-0,55	-1,26
27,50	-0,05	-0,35	-0,71	-0,04	-0,43	-1,00
30,00	-0,04	-0,29	-0,59	-0,03	-0,32	-0,74
32,50	-0,04	-0,23	-0,47	-0,02	-0,22	-0,51
35,00	-0,03	-0,18	-0,36	-0,01	-0,15	-0,32
37,50	-0,02	-0,13	-0,26	-0,01	-0,08	-0,15
40,00	-0,02	-0,09	-0,16	0,00	-0,01	0,01
42,50	-0,01	-0,05	-0,07	0,00	0,05	0,15
45,00	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,11	0,29
47,50	0,00	0,04	0,09	0,01	0,17	0,43
50,00	0,00	0,07	0,17	0,02	0,23	0,58
52,50	0,00	0,11	0,25	0,02	0,30	0,73
55,00	0,01	0,15	0,34	0,03	0,37	0,89
57,50	0,01	0,19	0,42	0,03	0,44	1,06
60,00	0,02	0,24	0,51	0,04	0,52	1,23
62,50	0,02	0,28	0,61	0,04	0,60	1,40
65,00	0,03	0,33	0,71	0,05	0,69	1,57
67,50	0,04	0,38	0,82	0,06	0,78	1,74
70,00	0,04	0,43	0,94	0,06	0,88	1,91
72,50	0,05	0,49	1,08	0,07	0,98	2,08
75,00	0,06	0,56	1,23	0,08	1,08	2,26
77,50	0,06	0,64	1,39	0,09	1,19	2,45
80,00	0,07	0,72	1,56	0,10	1,30	2,66
82,50	0,08	0,82	1,74	0,11	1,43	2,90
85,00	0,10	0,93	1,94	0,13	1,58	3,16
87,50	0,12	1,07	2,19	0,15	1,75	3,47
90,00	0,14	1,24	2,49	0,18	1,95	3,86
92,50	0,18	1,45	2,89	0,22	2,24	4,42
95,00	0,24	1,77	3,47	0,28	2,70	5,33
97,50	0,39	2,35	4,50	0,44	3,46	6,79

ANEXO B

Percentis (%)	Residuais dos erros no MRU (m)								
	X+1m	X+10m	X+20m	Y+1m	Y+10m	Y+20m	Z+1m	Z+10m	Z+20m
2,50	-0,19	-0,30	-0,54	-0,18	-0,21	-0,25	-0,19	-0,19	-0,19
5,00	-0,10	-0,21	-0,40	-0,09	-0,11	-0,14	-0,10	-0,10	-0,10
7,50	-0,07	-0,15	-0,28	-0,06	-0,07	-0,09	-0,07	-0,06	-0,07
10,00	-0,05	-0,11	-0,21	-0,04	-0,05	-0,07	-0,05	-0,05	-0,05
12,50	-0,04	-0,08	-0,15	-0,03	-0,04	-0,05	-0,04	-0,04	-0,04
15,00	-0,03	-0,06	-0,11	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03	-0,04
17,50	-0,03	-0,04	-0,08	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
20,00	-0,02	-0,02	-0,05	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03
22,50	-0,02	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
25,00	-0,02	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	-0,02
27,50	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,02
30,00	-0,01	0,02	0,03	-0,01	0,00	0,01	-0,01	-0,01	-0,02
32,50	-0,01	0,03	0,05	0,00	0,00	0,01	-0,01	-0,01	-0,01
35,00	-0,01	0,03	0,06	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01
37,50	-0,01	0,04	0,07	0,00	0,01	0,02	-0,01	-0,01	-0,01
40,00	-0,01	0,05	0,09	0,00	0,01	0,02	-0,01	-0,01	-0,01
42,50	0,00	0,05	0,10	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	-0,01
45,00	0,00	0,06	0,11	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	-0,01
47,50	0,00	0,07	0,12	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00
50,00	0,00	0,07	0,13	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00
52,50	0,00	0,08	0,15	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00
55,00	0,00	0,08	0,16	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00
57,50	0,01	0,09	0,17	0,01	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00
60,00	0,01	0,10	0,18	0,01	0,03	0,05	0,01	0,01	0,00
62,50	0,01	0,10	0,19	0,01	0,03	0,05	0,01	0,01	0,00
65,00	0,01	0,11	0,21	0,02	0,03	0,06	0,01	0,01	0,01
67,50	0,01	0,12	0,22	0,02	0,04	0,06	0,01	0,01	0,01
70,00	0,02	0,13	0,23	0,02	0,04	0,07	0,01	0,01	0,01
72,50	0,02	0,13	0,25	0,02	0,04	0,07	0,01	0,02	0,01
75,00	0,02	0,14	0,27	0,02	0,05	0,08	0,02	0,02	0,01
77,50	0,03	0,15	0,29	0,03	0,05	0,08	0,02	0,02	0,02
80,00	0,03	0,17	0,31	0,03	0,06	0,09	0,02	0,03	0,02
82,50	0,04	0,18	0,33	0,04	0,06	0,10	0,03	0,03	0,03
85,00	0,04	0,20	0,36	0,04	0,07	0,11	0,03	0,04	0,03
87,50	0,05	0,22	0,39	0,05	0,08	0,12	0,04	0,04	0,04
90,00	0,06	0,25	0,43	0,06	0,09	0,14	0,05	0,05	0,05
92,50	0,08	0,28	0,48	0,08	0,12	0,17	0,07	0,07	0,07
95,00	0,12	0,33	0,55	0,12	0,16	0,22	0,11	0,11	0,11
97,50	0,23	0,44	0,69	0,22	0,27	0,33	0,21	0,21	0,21

ANEXO C

Percentis (%)	Residuais dos Erros no Transdutor (m)					
	X+1m	X+10m	X+20m	Y+1m	Y+10m	Y+20m
2,50	-0,42	-3,47	-6,87	-0,42	-2,42	-4,68
5,00	-0,27	-2,76	-5,48	-0,27	-1,84	-3,57
7,50	-0,21	-2,33	-4,61	-0,20	-1,52	-2,96
10,00	-0,17	-2,02	-4,02	-0,16	-1,31	-2,56
12,50	-0,14	-1,81	-3,61	-0,13	-1,14	-2,26
15,00	-0,12	-1,63	-3,28	-0,11	-1,01	-2,03
17,50	-0,11	-1,49	-3,00	-0,10	-0,90	-1,82
20,00	-0,10	-1,36	-2,76	-0,09	-0,80	-1,63
22,50	-0,09	-1,24	-2,55	-0,08	-0,71	-1,45
25,00	-0,08	-1,14	-2,35	-0,07	-0,62	-1,29
27,50	-0,07	-1,04	-2,17	-0,06	-0,55	-1,15
30,00	-0,06	-0,94	-1,99	-0,05	-0,48	-1,01
32,50	-0,06	-0,85	-1,83	-0,05	-0,42	-0,88
35,00	-0,05	-0,76	-1,66	-0,04	-0,36	-0,77
37,50	-0,04	-0,68	-1,50	-0,03	-0,31	-0,66
40,00	-0,04	-0,59	-1,34	-0,03	-0,26	-0,56
42,50	-0,03	-0,51	-1,17	-0,02	-0,22	-0,46
45,00	-0,03	-0,43	-1,01	-0,02	-0,17	-0,37
47,50	-0,02	-0,35	-0,85	-0,01	-0,13	-0,28
50,00	-0,02	-0,28	-0,69	-0,01	-0,09	-0,20
52,50	-0,02	-0,22	-0,53	0,00	-0,04	-0,12
55,00	-0,01	-0,15	-0,38	0,00	0,00	-0,03
57,50	-0,01	-0,09	-0,25	0,01	0,04	0,05
60,00	0,00	-0,03	-0,12	0,01	0,08	0,14
62,50	0,00	0,03	0,02	0,02	0,13	0,23
65,00	0,01	0,09	0,16	0,02	0,18	0,33
67,50	0,01	0,16	0,33	0,03	0,23	0,44
70,00	0,02	0,24	0,52	0,04	0,29	0,55
72,50	0,02	0,33	0,76	0,05	0,35	0,68
75,00	0,03	0,45	1,02	0,05	0,42	0,82
77,50	0,04	0,59	1,32	0,06	0,49	0,96
80,00	0,05	0,75	1,63	0,07	0,57	1,12
82,50	0,06	0,94	1,96	0,09	0,66	1,31
85,00	0,08	1,14	2,33	0,10	0,77	1,51
87,50	0,10	1,36	2,73	0,12	0,90	1,74
90,00	0,12	1,63	3,24	0,14	1,05	2,02
92,50	0,16	1,97	3,90	0,18	1,24	2,37
95,00	0,23	2,42	4,76	0,24	1,52	2,90
97,50	0,36	3,17	6,23	0,38	2,02	3,87