



**OTIMIZAÇÃO DE DESENHO DE
AQUISIÇÃO SÍSMICA 3D
TERRESTRE UTILIZANDO
ALGORITMO DE BASE MISTA
PARA INVERSÃO E
ILUMINAÇÃO ORIENTADA AO
ALVO**

ATAHEBSON BEZERRA SANTOS

SALVADOR – BAHIA
MAIO – 2018

OTIMIZAÇÃO DE DESENHO DE AQUISIÇÃO SÍSMICA 3D TERRESTRE UTILIZANDO ALGORITMO DE BASE MISTA PARA INVERSÃO E ILUMINAÇÃO ORIENTADA AO ALVO

por

ATAHEBSON BEZERRA SANTOS

Geofísico (Universidade Federal da Bahia – 1997)

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

Co-orientadora: Dra. Manuelle Santos Góis

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

EM

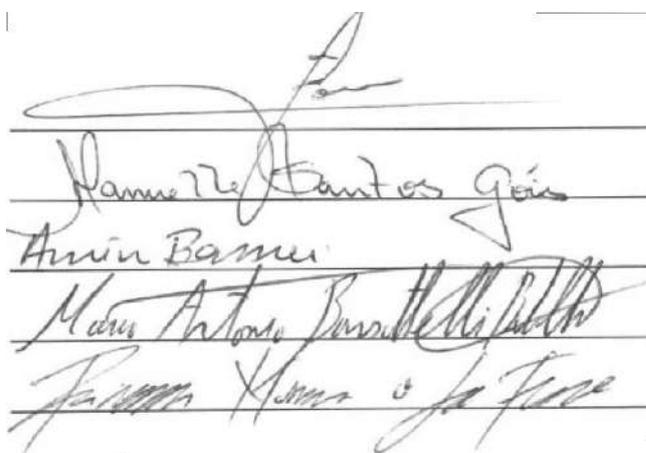
GEOFÍSICA

ao

Conselho Acadêmico de Ensino

da

Universidade Federal da Bahia



Handwritten signatures of the examiners, including Manuelle Santos Góis, Amin Bassrei, Marco Antônio Barsottelli Botelho, and Raimundo Mesquita de Luna Freire.

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani

Dra. Manuelle Santos Góis

Dr. Amin Bassrei

Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho

Dr. Raimundo Mesquita de Luna Freire

Aprovada em 04 de maio de 2018

A presente pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA, com recursos próprios, da CAPES, da CNPq, CTPETRO, ANP, PETROBRAS

Santos, Atahebson Bezerra,

OTIMIZAÇÃO DE DESENHO DE AQUISIÇÃO SÍSMICA
3D TERRESTRE UTILIZANDO ALGORITMO DE BASE
MISTA PARA INVERSÃO E ILUMINAÇÃO ORIENTADA AO
ALVO / Atahebson Bezerra Santos. — Salvador, 2018.

123 f.: il., mapas, fotos.

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

Co-orientadora: Dra. Manuelle Santos Góis

Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de
Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2018.

1. Geofísica 2. Aquisição Sísmica 3. Inversão 4. Base Mista
5. Iluminação I. Porsani, Milton II. Góis, Manuelle III. Título.

À família Bezerra Santos.
À família Soares.
À família dos que nos escolhem.
À família quatro patas.

Resumo

A otimização de desenhos de aquisição de dados sísmicos 3D é tema atual, relevante e aberto a contribuições. As melhorias e aprimoramentos nos desenhos de aquisição, as crescentes demandas de qualidade da indústria do petróleo e os requisitos técnicos, operacionais e financeiros devem ser integrados para a determinação da geometria ótima de aquisição e de seus parâmetros. Os trabalhos existentes, no que tange à determinação do parâmetros de aquisição sísmica 3D terrestres, tratam a questão através de métodos de inversão de escopo local ou global, e não contemplam no funcional de desempenho um fator associado à qualidade da iluminação.

Desenvolvemos um novo método para desenho de aquisição sísmica 3D terrestre utilizando representação em base mista. Essa nova metodologia permite percorrer todas as soluções possíveis do espaço de parâmetros que normalmente se usa na indústria do petróleo, com alta resolução de pesquisa. As funções matemáticas que descrevem os parâmetros da geometria, assim como a função objetivo definida não demandam custo computacional significativo, permitindo a busca e organização dos melhores desempenhos de forma direta e eficiente, prescindindo dos esquemas de inversão determinísticos de escopo local ou dos esquemas probabilísticos de escopo global.

Aplicamos o algoritmo de inversão a um caso sintético e a um dado real, no levantamento tridimensional dos Campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do Bu (3D FAV/RI/RBU). Além de determinarmos a melhor geometria do espaço de pesquisa, obtivemos um conjunto de boas geometrias, concentrando os esforços no atendimento às características geológicas e geofísicas da área de estudo, bem como nas melhores práticas operacionais.

Usando o estado-da-arte das técnicas de iluminação orientada ao alvo, desenhamos um experimento sísmico para definir um indicador quantitativo associado ao desenho de aquisição. Utilizamos o Método de Diferenças Finitas para resolver a equação completa da onda e gerar, para cada ponto alvo de iluminação, uma matriz de energia na superfície de aquisição.

A partir disso, simulamos a feitura do projeto de aquisição sísmica, considerando o conjunto de geometrias validadas na etapa anterior e obtivemos para cada uma o valor

de energia de iluminação. Inserimos esse critério quantitativo no processo de otimização dos parâmetros de aquisição, aliando requisitos técnicos, operacionais e uma estimativa da qualidade da imagem já no desenho de aquisição.

Reavaliamos o conjunto de geometrias resultante da etapa de inversão utilizando o algoritmo de base mista e obtivemos a ordenação final dos melhores desenhos. Essa ordenação mostra que o uso da etapa de iluminação altera a escolha das melhores geometrias, dando peso as suas energias de iluminação como medida do sucesso da aquisição em imagear os alvos.

Completamos o estudo com a avaliação da complexidade do modelo de velocidade nos resultados de iluminação do 3D em estudo. Mostramos que, para esse caso, não houve variação significativa na posição final das melhores geometrias e que mesmo modelos menos complexos podem servir como entrada para a iluminação orientada ao alvo.

É importante notar que o desenvolvimento de métodos rápidos e eficientes para a otimização de desenhos de aquisição sísmica 3D não implicam pura e simplesmente a automatização do processo. Ao contrário, demanda aos profissionais envolvidos uma necessidade maior de integração e refinamento na escolha dos valores alvos, das restrições a serem aplicadas e dos insumos técnicos envolvidos ou seja, focaliza os esforços da escolha das melhores geometrias no entendimento geológico/geofísico da área, nas inovações quanto a modelagem e inversão, nas melhores práticas operacionais e na busca do menor custo possível. Nessa direção demos a contribuição com o nosso trabalho.

Abstract

The 3D seismic survey design optimization is a relevant and contemporary subject, open to contributions. Improvements in seismic survey design, the increasing quality demands of the petroleum industry and technical, operational and financial requirements must be integrated to determine the optimum acquisition geometry and its parameters. The existing works, regarding the determination of 3D acquisition parameters, address the question through local or global optimization methods, and do not consider in the objective function a term associated with the illumination quality.

We have developed a new algorithm for 3D land seismic survey acquisition design using mixed-radix representation. This new methodology allows us to search and evaluate all possible solutions of the parameter space that is normally used in the oil industry, with high search resolution, an improvement from previous works. The mathematical functions that describe the parameters of the geometry as well as the defined objective function are expressions that do not demand significant computational cost, allowing the search and organization of the best performances in a fast and efficient way. As a result the local or global optimization methods may no longer be necessary for this kind of problem.

We applied the inversion algorithm to a synthetic case and to real data, in the three-dimensional survey of Fazenda Alvorada, Rio Itariri and Rio do Bu Fields (3D FAV/RI/RU). Not only do we obtained the optimum acquisition geometry, but also a set of very good acquisition geometries by focusing our efforts on the geological and geophysical requests and on the best operational practices.

Using the state-of-the-art of target oriented illumination analysis, we design a seismic experiment to define a quantitative measure associated with the acquisition design. We use the Finite Difference Method to solve the complete two-way wave equation and to generate, for each illumination point, a wavefield energy distribution at the acquisition surface. Then, we simulate the seismic acquisition itself for the set of geometries validated in the previous step, obtaining for each one its illumination energy. We inserted this quantitative criterion in the optimization process, combining technical and operational requirements with

an estimation of the image quality during the acquisition design process.

We re-evaluated the set of geometries resulting from the inversion step using the mixed-radix algorithm, obtaining the final ranking of the best designs. We show that the use of the illumination analysis has a strong influence on the choice of the best geometries, giving weight to their illumination energies as a measure of the success of the acquisition in imaging the target points.

We completed the study with the evaluation of the complexity of the velocity model in the results of energy distribution and in the acquisition design. We have shown that, in the 3D FAV/RI/RBU, there was no significant variation in the final ranking of the best geometries and, therefore, even less complex velocity models could be used as input for target-oriented illumination analysis.

It is important to notice that the development of fast and efficient methods to 3D seismic survey design optimization should not imply pure and simply entail automating the process. On the contrary, it requires to the acquisition and decision teams more integration and refinement when choosing the target values, the constraints to be applied and all the necessary technical inputs. So that we can concentrate our efforts on choosing the best geometry designs, on the geological and geophysical understanding of the area, on the innovations in modeling and inversion, on the best operational practices and on the search of the lowest possible operational and financial cost. That is the direction we intend our work have contributed with.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumo | 4 |
| Abstract | 6 |
| Índice | 8 |
| Índice de Tabelas | 10 |
| Índice de Figuras | 12 |
| Introdução | 17 |
| 1 Projetando uma Aquisição Sísmica | 23 |
| 1.1 O Caso 2D | 24 |
| 1.1.1 Definição dos Parâmetros de Aquisição | 25 |
| 1.2 O Caso 3D | 27 |
| 1.2.1 Definição dos Parâmetros de Aquisição | 30 |
| 2 A Área de Estudo | 35 |
| 2.1 Localização | 35 |
| 2.2 Informações Geológicas | 36 |
| 2.2.1 Campo de Fazenda Alvorada - FAV | 36 |
| 2.2.2 Campo de Rio Itariri - RI | 36 |
| 2.2.3 Campo de Rio do Bu - RBU | 38 |
| 2.3 História Sísmico da Área | 38 |
| 3 Desenho de Aquisição Usando Representação em Base Mista | 48 |
| 3.1 Representação em Base Mista | 49 |
| 3.2 Aplicação em um modelo sintético | 51 |
| 3.2.1 Exemplos Numéricos | 58 |
| 3.3 Aplicação no 3D FAV/RI/RBU | 65 |
| 3.3.1 Seções Sísmicas e Pontos de Iluminação | 66 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.2 | Modelos de Velocidade | 67 |
| 3.3.3 | Mapas nos Horizontes | 71 |
| 3.3.4 | Função de silenciamento | 81 |
| 3.3.5 | Atenuação de Ruído | 82 |
| 3.3.6 | Controle de Zíper | 84 |
| 3.3.7 | Resultados da Inversão | 87 |
| 4 | Estudo de Iluminação | 100 |
| 4.1 | Iluminação Orientada ao Alvo | 101 |
| 4.2 | Resultados da Iluminação Orientada ao Alvo | 103 |
| 5 | Conclusões | 113 |
| | Referências Bibliográficas | 116 |
| | Agradecimentos | 119 |

Índice de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Elementos formadores da geometria 2D. | 27 |
| 1.2 | Parâmetros da geometria 3D ortogonal com lanço bipartido simétrico e uma linha de rolagem. | 33 |
| 2.1 | Parâmetros típicos dos levantamentos 2D na área de estudo. | 39 |
| 2.2 | Parâmetros do levantamentos 3D ortogonal na área de estudo. | 42 |
| 3.1 | Representação para $N_{\max} = 7$ na base fixa 2 e na base mista (2, 1, 4). | 50 |
| 3.2 | Parâmetros da geometria 3D ortogonal e parâmetros derivados importantes. | 55 |
| 3.3 | Parâmetros da geometria 3D ortogonal reparametrizada para uso na inversão Base Mista e parâmetros derivados importantes. Todos os parâmetros geradores são independentes, inteiros e têm resolução unitária de pesquisa. | 56 |
| 3.4 | Parâmetros da geometria de referência. | 57 |
| 3.5 | Parâmetros P_i usados como valores alvo para a função objetivo, definidos através da geometria de referência, Figuras 3.3(a) a 3.3(f). | 57 |
| 3.6 | 10 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S) e desempenho. | 65 |
| 3.7 | Dimensões do Modelo de Velocidade. O modelo global está inserido na grade do levantamento sísmico. Os modelos locais são fatias do global para uso no estudo de iluminação. Os valores centrais correspondem à projeção em superfície dos pontos sujeitos à iluminação em cada campo. Para cada campo, são dadas as coordenadas de topo e base da camada alvo, que definem os pontos de iluminação. | 72 |
| 3.8 | Parâmetros da geometria 3D ortogonal reparametrizada para uso na inversão Base Mista do 3D FAV/RI/RBU e parâmetros derivados importantes. Todos os geradores são independentes, inteiros e têm resolução unitária de pesquisa. O número de linhas roladas é fixo e não foi usado na inversão. | 88 |
| 3.9 | Parâmetros do 3D FAV/RI/RBU e valores derivados, para referência. Lanço bipartido simétrico e número unitário de linhas roladas. | 89 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.10 | Parâmetros P_i e pesos w_i usados como valores alvo para a função objetivo, definidos através dos dados existentes para o 3D FAV/RI/RBU. | 89 |
| 3.11 | 1-10 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L). | 95 |
| 3.12 | 11-20 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L). | 96 |
| 3.13 | 21-30 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L). | 97 |
| 3.14 | 31-40 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L). | 98 |
| 3.15 | 41-50 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L). | 99 |
| 4.1 | 50 melhores geometrias reordenadas com base no estudo de iluminação orientado ao alvo, com base nos quatro critérios definidos. Modelo com velocidade em profundidade (Modelo 1). | 109 |
| 4.2 | 50 melhores geometrias reordenadas com base no estudo de iluminação orientado ao alvo, com base nos quatro critérios definidos. Modelo de velocidade com variação linear entre horizontes (Modelo 2). | 110 |
| 4.3 | Valores usados para definir a ordenação final das melhores geometrias, com iluminação realizada no modelo de velocidade em profundidade. A primeira linha contém o valor máximo, com o qual foi feita a normalização em cada coluna. | 111 |
| 4.4 | Valores usados para definir a ordenação final das melhores geometrias com iluminação realizada no modelo de velocidade linear. A primeira linha contém o valor máximo, com o qual foi feita a normalização em cada coluna. | 112 |

Índice de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Modelo geológico simplificado, mostrando os principais alvos do levantamento. | 24 |
| 1.2 | Definição dos parâmetros da geometria 2D. Modificados de Cordsen et al. (2000) | 24 |
| 1.3 | Tipos de geometria 3D. As geometrias lineares são as mais utilizadas na indústria de petróleo (modificado de Vermeer, 2012). | 28 |
| 1.4 | Geometria ortogonal, com definição das direções principais e linhas. | 28 |
| 1.5 | Definição da macrocela (<i>Box</i>), elemento representativo da geometria ortogonal. | 28 |
| 1.6 | Definição de cela na macrocela com o ponto médio associado. | 29 |
| 1.7 | Definição da cobertura desejada em um cela da macrocela. | 29 |
| 1.8 | Dispositivo de registro (<i>template</i>) e elementos que o compõem. | 29 |
| 1.9 | Definição dos subprogramas (<i>swaths</i>) com nomenclatura típica. | 29 |
| 1.10 | Posição inicial do dispositivo de registro com seus deslocamentos consecutivos ($\Delta_{in-line}$ e $\Delta_{cross-line}$) e suas rolagens in-line e cross-line associadas. | 30 |
| 1.11 | Parâmetros básicos de aquisição da geometria 3D ortogonal associados aos elementos de fonte (IPT e ILT) e de recepção (IE e ILR). | 31 |
| 1.12 | Definição do máximo afastamento mínimo na macrocela. | 31 |
| 1.13 | Definição do máximo afastamento no dispositivo de registro. | 31 |
| 1.14 | Determinação da cobertura média para um dado afastamento. A área hachurada (S_{fold}) normalizada pela área da macrocela fornece o valor médio de cobertura. | 34 |
| 2.1 | Mapa de localização na Bacia do Recôncavo do levantamento sísmico 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do Bu. | 35 |
| 2.2 | Mapa de localização, compartimentação e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo. | 37 |
| 2.3 | Seção geológica esquemática do Campo de Fazenda Alvorada. | 37 |
| 2.4 | Seção geológica esquemática do Campo de Rio Itariri. | 38 |
| 2.5 | Seção geológica esquemática do Campo de Rio do Bu. | 39 |
| 2.6 | Linha sísmica 2D adquirida no campo de Fazenda Alvorada em 1984. | 40 |
| 2.7 | Linha sísmica 2D adquirida no campo de Rio do Bu em 1983. | 40 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.8 | Linha sísmica 2D adquirida no campo de Fazenda Alvorada em 1993. | 40 |
| 2.9 | Mapa de detalhe no compartimento norte da Bacia do Recôncavo do levantamento sísmico 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do Bu. | 41 |
| 2.10 | Dispositivo de registro do 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do BU. | 43 |
| 2.11 | Mapa de cobertura do 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do BU. | 43 |
| 2.12 | Histograma de afastamentos do 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do BU. | 44 |
| 2.13 | Distribuição azimutal do 3D nos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do BU. | 44 |
| 2.14 | Seção sísmica <i>dip</i> estrutural que mostra a compartimentação nordeste em dois meios-grábens, o Patamar de Patioba e o Baixo de Quiambina. | 45 |
| 2.15 | Seção geológica esquemática <i>dip</i> estrutural que mostra a compartimentação nordeste em dois meios-grábens e os contextos geológicos associados ao campos de estudo. | 45 |
| 2.16 | Seção <i>dip</i> estrutural representativa do Campo de Fazenda Alvorada, extraída do volume sísmico. | 46 |
| 2.17 | Seção <i>dip</i> estrutural representativa do Campo de Rio Itariri, extraída do volume sísmico. | 46 |
| 2.18 | Seção <i>dip</i> estrutural representativa do Campo de Rio do Bu, extraída do volume sísmico. | 46 |
| 3.1 | Esquema de divisões sucessivas para determinação da representação do número inteiro N na base mista $B = (b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_1, b_0)$. N é unicamente representado na Base Mista B por $x = (x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0)$ | 50 |
| 3.2 | Geometria ortogonal regular com definição de alguns de seus elementos e domínios. (a) Representação da forma em que os dados são adquiridos no campo (dispositivo de registro) com a linha de receptores ativos (em preto), o salvo de tiros e a definição usada para o “salvo” de receptores. (b) Representação da geometria ortogonal nos domínios do dispositivo e do lanço cruzado, mostrando as principais definições dos afastamentos. | 53 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.3 | Valores da geometria de referência e valores usados como alvos da função objetivo: (a) Número total de 4800 canais ativos. (b) Cobertura total (C_{3D}) igual a 100. (c) Afastamento máximo ($X_{max_{3D}}$) de ≈ 4200 m. (d) Máximo mínimo afastamento ($X_{max_{min}}$) de ≈ 400 m. (e) Cobertura média no alvo raso (C_{raso}) igual a 10. (f) Cobertura média no alvo profundo (C_{prof}) igual a 100. Fator de silenciamento de 15%. | 61 |
| 3.4 | Resultados da inversão base mista das melhores geometrias. (a) Desempenho de todas as geometrias selecionadas em ordem decrescente. (b) Desempenho das 1000 melhores geometrias, em ordem decrescente. (c-r) Evolução dos parâmetros da geometria e dos valores alvos para as 1000 melhores geometrias. Para cada uma delas, o valor de referência está representado na figura. . . . | 64 |
| 3.5 | Definição dos pontos de iluminação (in-line,cross-line) em superfície para os campos de FAV (270,427), RI (260,258) e RBU (208,258). | 67 |
| 3.6 | Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 270 (b) Cross-Line 427. | 68 |
| 3.7 | Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 260 (b) Cross-Line 258. | 69 |
| 3.8 | Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 208 (b) Cross-Line 258. | 70 |
| 3.9 | Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de FAV na IL 270 e XL 427. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade. | 73 |
| 3.10 | Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de RI na IL 260 e XL 258. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade. | 74 |
| 3.11 | Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de RBU na IL 208 e XL 258. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade. | 75 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.12 | Mapa de profundidade dos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento. | 77 |
| 3.13 | Mapa de mergulho dos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento. | 78 |
| 3.14 | Mapa de velocidades nos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento. | 79 |
| 3.15 | Mapa de dimensão linear associada à cela nos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento. | 80 |
| 3.16 | Função média de silenciamento para o 3D FAV/RI/RBU definida na região do campo de Rio do BU, onde os horizontes estão mais profundos. O ajuste linear na função de silenciamento obtida no 3D fornece um valor de 35 %, que será então usado para o cálculos dos afastamentos máximos e coberturas médias. O envelope de 0 % a 100 % foi utilizado para referência. | 81 |
| 3.17 | Atenuação de arranjos com tamanho equivalente a 30 m e 40 m para o horizonte principal raso no FAV, onde $V_{rms} = 2500$ m/s. O efeito do fator de estiramento na atenuação foi calculado para o valor de 35 %. Estão destacados os valores de -3 dB, em que a atenuação é desprezível e -20 dB, considerado limite de ruído. | 83 |
| 3.18 | Atenuação de arranjos com com tamanho equivalente a 30 m e 40 m para o horizonte principal raso no RI/RBU, onde $V_{rms} = 3500$ m/s. O efeito do fator de estiramento na atenuação foi calculado para o valor de 35 %. Estão destacados os valores de -3 dB, em que a atenuação é desprezível e -20 dB, considerado limite de ruído. | 83 |
| 3.19 | Ilustração esquemática do conceito de zíper. a) mapa de cobertura do 3D sem divisão. b) mapa de cobertura com 1 zíper, admitindo divisão do programa ao meio, mas sem repetição de canais. Os limites internos criam uma área de cobertura incompleta na região central. c) Recuperação da cobertura utilizando a repetição de canais (em azul). A cada metade do programa (Parte 1 e Parte 2) se deve adicionar o equivalente a um lanço. | 85 |

- 3.20 Cálculo do número de zíperes necessários para o 3D FAV/RI/RBU considerando intervalos de estações de 25 m, 40 m e 50 m. A dimensão in-line é de 13 600 m e o número de linhas de registro igual a 8. Para a quantidade de canais disponíveis (2400), apenas no caso onde $IE = 50$ m o número de zíper é nulo. A aquisição foi feita com o intervalo de 40 m, necessitando de uma divisão. A redução para 25 m exigiria 4 divisões de programa, mostrando a significância desse parâmetros na determinação do desenho de aquisição. 86
- 3.21 Resultados da inversão base mista das melhores geometrias. (a) Desempenho de todas as geometrias selecionadas (total de 50) em ordem decrescente. (b-r) Evolução dos parâmetros da geometria e dos valores alvos para as 50 geometrias selecionadas. Em cada figura, o valor de referência do 3D FAV/RI/RBU está representado por uma seta. 94
- 4.1 Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de FAV para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 192 e na cross-line 192 (modelo local), equivalente à posição (270,427) no modelo global. 106
- 4.2 Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de RI para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 208 e na cross-line 208 (modelo local), equivalente à posição (260,258) no modelo global. 107
- 4.3 Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de RBU para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 208 e na cross-line 208 (modelo local) equivalente à posição (208,258) no modelo global. 108

Introdução

O projeto de uma aquisição sísmica foi sendo aprimorado à medida que os avanços tecnológicos na área de computação, instrumentação e logística foram sendo feitos. O aumento no número de canais possibilitou realizar levantamentos bidimensionais (2D) cada vez mais completos, contemplando não só a obtenção de uma boa imagem dos diversos alvos de uma campanha mas também melhores requisitos de amostragem, tanto do sinal sísmico quanto do ruído coerente presente na área. Esse esforço contínuo em tecnologia possibilitou a feitura de levantamentos tridimensionais (3D), em que os fatores qualidade de imagem, menores intervalos de amostragem, custo do levantamento e restrições operacionais atingiram ponto significativo de relevância.

Nos primórdios da utilização do método sísmico para exploração de hidrocarbonetos, o foco se dava no fator tecnologia de equipamentos. Os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de J.C. Karcher nos anos de 1917 a 1921 (Dobrin, 1976) foram pioneiros, culminando no experimento histórico de Vine Creek, Oklahoma, 1921; onde, pela primeira vez, um contato geológico conhecido foi mapeado através do uso de dados sísmicos de reflexão, usando essencialmente um elemento fonte e um elemento receptor, separados de 300 m, e um número de registros da ordem de grandeza igual a 10. Na década de 30, um número maior de canais já era utilizado e Westby (1935), ao usar sete geofones e uma configuração de tiro 3D, apontou não apenas na direção de novos conceitos na exploração sísmica, como também na necessidade de um cuidado maior na determinação da geometria de aquisição e dos intervalos de amostragem, em especial o de estações receptoras. Seus resultados foram bastante animadores, demonstrando a potencialidade do método sísmico de reflexão na localização de reservatórios de hidrocarbonetos.

No trabalho de DeGolyer (1935), faz-se uma descrição do primeiro ciclo completo de utilização dos métodos sísmicos de refração e reflexão e o trabalho de Weatherby (1940) faz um levantamento histórico dos métodos de prospecção sísmica até o final da década de 30. As questões predominantes diziam respeito ao padrão de tiro empregado (*updip* ou *downdip*), ao mapeamento de falhas e ao comparativo e aplicabilidade das técnicas de reflexão e refração. E, apesar de no final dos anos 40 já ser possível encontrar aquisições com até 20 traços

por tiro, elas ainda eram do tipo multiplicidade única (*single-fold*), em que cada ponto em subsuperfície era amostrado uma única vez. Esse cenário só mudaria uma década depois.

Na década de 50, o desenho de aquisições sísmicas já era parte importante do processo exploratório devido ao aumento da capacidade instalada de geofones, que viria a possibilitar a realização de 3Ds do tipo lanços cruzados (*cross-spreads*), sem redundância de informação. O advento dos recursos computacionais possibilitou estudar o efeito da não colinearidade entre fontes e receptores, de importância fundamental para a feitura das aquisições do tortuosas (*crooked lines*), onde em geral os dados são registrados aproveitando o traçado de uma estrada ou rodovia. De fato, a década seguinte se valeu desses estudos para tratar com mais flexibilidade os efeitos de azimutalidade fonte-receptor e os desvios decorrentes de obstáculos operacionais e juntamente com a nova tecnologia de aquisição *Vibroseis* atraiu a atenção da comunidade geofísica. O desenvolvimento desse tipo de fonte, para dados terrestres, está para o desenvolvimento do cabo sísmico (*streamer*) para dados marítimos no que diz respeito a realização de levantamentos com múltipla cobertura (*multifold*). Junto com o início da era digital, impactaram a consolidação da técnica CMP, desenvolvida e patenteada por Mayne em 1956, que revolucionaria a aquisição e o processamento de dados sísmicos.

A partir dos trabalhos de Mayne (1962, 1967), que buscou conferir ao dado sísmico um caráter aproximado de seção geológica através da formação de uma imagem, o tratamento do ruído começaria a ser em parte contemplado dentro da aquisição sísmica, assim como os aspectos referentes à teoria da amostragem. O conceito de multiplicidade (cobertura) como elemento ativo na atenuação do ruído foi um avanço significativo, que trouxe especial atenção à escolha da geometria de aquisição. A cobertura de um levantamento e o afastamento necessário para amostrar corretamente a profundidade dos alvos, a preocupação em utilizar arranjos de geofones como elementos de recepção e o desenvolvimento da teoria de arranjos como elementos de filtro do ruído superficial (*ground-roll*), iniciados nos anos 50, foram questões que passaram a ser incorporadas ao desenho da aquisição sísmica. Além disso, as então recentes técnicas de registro digitais possibilitaram avanços nas taxas de amostragem, nos procedimentos de gravação de dados, na quantidade de canais usados e, conseqüentemente, na possibilidade de obtenção de maiores redundâncias operacionalizando os levantamentos de cobertura múltipla.

Com a consolidação dos registros digitais na década de 70 e o aumento do número de canais para uma ordem de grandeza igual a 100, foi possível o desenvolvimento de novos padrões de tiro que desembocariam no padrão de aquisição denominado de *Swath*, embrionário dos levantamentos do tipo 3D com cobertura múltipla, ainda hoje utilizado na indústria do petróleo. Não apenas uma quantidade maior de informação por tiro estava disponível, mas

também implicações decorrentes da tridimensionalidade dos dados se fizeram presentes no processamento sísmico e na forma de projetar a aquisição. A incorporação de uma nova dimensão de espalhamento de tiros e receptores aumentou consideravelmente o número de graus de liberdade de um projeto de aquisição, exigindo maior esforço computacional. A revisão das teorias de arranjos para o caso 3D, a modificação do conceito CDP para contemplar uma área de contribuição em subsuperfície, a cela (*Bin*), o estudo caso a caso das distribuições de cobertura, afastamentos e azimutes para cada cela reforçaram essa necessidade de recursos computacionais.

A disponibilidade crescente de canais, por sua vez, implicou aumento no custos de equipamentos, na dificuldade operacional e no tempo de uma campanha de aquisição sísmica. Esse foi um caminho sem retorno que além de agregar valor ao planejamento da aquisição, tornou imprescindível obter procedimentos e ferramentas de desenvolvimento e avaliação de desenhos de aquisição satisfatórios do ponto de vista técnico, operacional e financeiro.

Apesar de a primeira campanha de aquisição sísmica 3D ser de 1967 e a primeira com cobertura múltipla ter sido realizada no início da década de 70, foi apenas no fim da década de 80 que se tornou economicamente viável devido as limitações de custo e tecnologia, e especialmente no que diz respeito ao longo tempo necessário à entrega de um volume processado. Foi nesse período também que floresceu a migração 3D pós-empilhamento em tempo, dentro da filosofia de acoplamento tecnologia-aquisição-processamento de dados. As dificuldades inerentes ao levantamento 2D como a presença de ruídos, a sensibilidade ambiental na área de aquisição, os obstáculos operacionais naturais e culturais, aspectos climáticos, as dificuldades relacionadas à subsuperfície, os atendimentos a cronogramas exploratórios e as limitações impostas por recursos humanos e financeiros foram desafios chave para alavancar o estudo e desenvolvimento de desenhos de aquisição, que agora deveria contemplar aspectos próprios ao caso 3D.

A literatura refletia o cenário de desenvolvimento com importantes publicações (Vermeer, 1990; Stone, 1994; Cordsen et al., 2000). O trabalho de Liner et al. (1999) foi pioneiro em formular um procedimento de otimização de parâmetros de aquisição submetidos a critérios geofísicos. Os trabalhos de Morrice et al. (2001) e Vermeer (2003) refinam esse conceito, inserindo na função de otimização fatores operacionais e econômicos.

A escolha dos parâmetros de aquisição e da geometria a ser utilizada (desenho de aquisição) é, ainda hoje, objeto de estudos na obtenção de dados com maior qualidade possível, eficiência operacional e minimização de custos. Quando se tem informações adicionais sobre o modelo de velocidade, típico de alvos exploratórios, é possível submeter o desenho de aquisição a um estudo de iluminação (Chang et al., 2001; da Silva et al., 2011; Cao e

Brewer, 2013). A existência de um modelo geológico de subsuperfície permite realizar uma modelagem direta de dados sísmicos, com subseqüentes análises de atributos da aquisição, processamento e interpretação, fornecendo assim critérios de validação em atender aos requisitos da campanha sísmica nos horizontes de interesse. Não obstante a extrema importância desse procedimento e de seu alto custo humano e computacional, caso não seja feito de forma integrada, nem o projeto de aquisição se valerá das informações dos estudos de iluminação, nem estes anteciparão os melhores parâmetros que podem ser definidos no momento da chamada parametrização de um levantamento sísmico.

A busca por técnicas cada vez mais robustas de otimização de parâmetros é tema atual, relevante e aberto a várias contribuições (Maurer et al., 2010; McWhorter et al., 2012; Góis e Porsani, 2013; Heidari et al., 2013). A visão tradicional, estática, de processo Aquisição → Processamento → Interpretação, face aos grande avanços tecnológicos e desafios enfrentados, necessita de avaliação de sorte a torná-lo mais integrado e dinâmico, onde a procura pelos melhores parâmetros percorra essa cadeia em vários sentidos, respondendo não só as necessidades inerentes à aquisição dos dados, mas também aquelas desejadas no processamento sísmico e na caracterização dos alvos, sejam eles exploratórios ou de mais detalhe, no âmbito dos estudos de reservatório.

O problema inerente ao desenho de aquisição é multidimensional, em que a pesquisa dos vários parâmetros é área-dependente, não só em função de suas dimensões e localização, como também da complexidade geológico-estrutural dos alvos de interesse. O objetivo principal dessa tese é a otimização de parâmetros de aquisição sísmica terrestre utilizando algoritmo de base mista (Schönheim, 1967; Johnson e Frigo, 2007), onde a não-linearidade e a multidimensionalidade do problema são bem exploradas, e a inserção, nesse processo, de indicadores de qualidade associados as etapas de processamento e interpretação sísmicas através de um esquema de iluminação orientada ao alvo (Alves et al., 2008; Alves et al., 2009). Deseja-se obter um desenho de aquisição adequado tecnicamente, que seja compatível com as necessidades operacionais, e que antecipe requisitos de qualidade das cadeias subseqüentes agregando valor ao processo de desenhar um levantamento de dados sísmicos. Essa é uma contribuição original ao estado-da-arte do processo de desenho de aquisição sísmica.

Uma função objetivo será avaliada através de um novo algoritmo de inversão usando base mista, para o caso de levantamentos 3D ortogonais terrestres, geometria que ao mesmo tempo é bastante utilizada na indústria de petróleo e que guarda semelhanças com os levantamentos marítimos do tipo *Nodes*. Um conjunto com grande número de parâmetros será gerado e avaliado, selecionando aqueles desenhos que apresentarem o melhor desempenho técnico e operacional. Através de um estudo de iluminação ao alvo será inserido no processo de

inversão um indicador de processamento/interpretação sísmica, antecipando qualitativa e quantitativamente seus resultados.

Os pontos principais da pesquisa desenvolvida são:

- Desenvolvimento de um novo método para o desenho de aquisição sísmica 3D terrestre através de uma técnica de inversão usando um algoritmo de base mista, que contempla os principais requisitos técnicos e operacionais disponíveis;
- Utilização de uma metodologia de iluminação orientada ao alvo com extrapolação do campo de ondas pelo método de diferenças finitas para incluir no desenho de aquisição um indicador quantitativo da geometria que forneça a melhor energia de iluminação para os horizontes alvo e
- Estratégia de incorporação à otimização dos parâmetros de aquisição de resultados concomitantes ao processo de modelagem e iluminação e de informações oriundas do processamento e da interpretação sísmica, conferindo ao tradicional fluxo em linha aquisição → processamento → interpretação um caráter cíclico e de retroalimentação.

Essa metodologia integrada de inversão atende as demandas intrínsecas e cada vez mais determinantes de um modelo de aquisição compatível com as condicionantes operacionais e com os objetivos geológico/geofísicos, utilizando um método novo e eficiente de inversão de parâmetros usando base mista para fornecer não só uma geometria ótima de referência, mas um conjunto de boas geometrias. E, concomitantemente, inclui informações críticas oriundas do processamento e interpretação já na etapa de determinação desses parâmetros, bem como avalia elementos de predição do sucesso da geometria de aquisição nas etapas seguintes da cadeia exploratória, interligando-os de forma sinérgica.

No Capítulo 1 abordaremos tópicos importantes para projetar uma aquisição sísmica. Dado que o foco do trabalho é o desenho de uma aquisição 3D terrestre do tipo ortogonal, os elementos que a compõem serão definidos. As relações fundamentais descritas servirão de base para a reformulação necessária à etapa de inversão.

No Capítulo 2 apresentaremos a área de estudo onde foi realizado um levantamento 3D terrestre ortogonal, 3D FAV/RI/RBU. Esses dados sísmicos servirão de entrada para aplicação das etapas de inversão dos parâmetros da geometria através do algoritmo de base mista para inversão e iluminação orientada ao alvo. Será feita uma descrição da localização e geologia da área e das informações geofísicas disponíveis.

No Capítulo 3 serão desenvolvidos os conceitos da nossa metodologia para desenho de aquisição sísmica 3D terrestre do tipo ortogonal. Definiremos o conceito de representação em base mista e mostraremos que essa é uma solução direta, natural e eficiente para o problema. Primeiro, a metodologia foi aplicada em um conjunto de dados sintéticos, onde foi possível controlar e comparar os resultados com uma geometria ótima de referência. Depois, desenhamos a aquisição sísmica referente ao 3D FAV/RI/RBU completando o estudo em um caso real.

No Capítulo 4 realizamos um experimento sísmico orientado ao alvo usando o estado da arte de iluminação sísmica. Utilizando a metodologia de Alves et al. (2008), que trata a questão através da solução da equação acústica completa da onda por diferenças finitas aliado ao princípio da reciprocidade, pudemos gerar as matrizes de energia de iluminação referentes aos objetivos geológicos principais para todas as desenhos de aquisição obtidos através da inversão pelo algoritmo de base mista. As geometrias foram então submetidas ao critério quantitativo da energia de iluminação e a ordem dos melhores modelos foi atualizada, fechando o ciclo de integração proposto.

No Capítulo 5 colocamos em perspectiva os pontos relevantes abordados nos capítulos da tese, pontuamos os principais resultados obtidos e fazemos a recomendação de trabalhos futuros.

1

Projetando uma Aquisição Sísmica

A aquisição de dados sísmicos, primeiro passo da cadeia exploratória com uso de métodos sísmicos, tem por objetivo fornecer dados de qualidade para que se possa obter imagens de maior resolução possível e inferir com maior acurácia as propriedades de subsuperfície, minimizando o risco exploratório e os custos financeiro, operacional e ambiental.

As geometrias de aquisição devem ter sucesso na preservação tanto do sinal quanto do ruído coerente e no imageamento dos refletores de interesse, fatores preponderantes na construção de tais imagens. Dessa forma, pode-se contemplar as necessidades de processamento de dados e da interpretação sísmica.

Houve avanços significativos dos métodos sísmicos desde o início de sua aplicação à exploração de petróleo nas primeiras décadas do século 20. Os levantamentos sísmicos eram quase que exclusivamente 2D até meados da década de 80, utilizados predominantemente na fase exploratória e secundariamente no suporte à exploração, na interpolação de dados entre poços. Desde então, tornou-se efetiva a utilização das técnicas de aquisição 3D, cujos resultados iniciais revelaram melhores imagens, permitindo maior definição no mapeamento de reservatórios, inclusive aqueles considerados de menor escala como conjuntos de pequenos canais, falhas e fraturas.

A aquisição de dados evoluiu para tratar os desafios da alta complexidade superficial e geológica, com os levantamentos de riqueza azimutal, (Hastings-James et al., 2000; Zwartjes et al., 2010), aqueles da fase exploratória, principalmente com o advento das aquisições 4D (Calvert, 2005; Dartigalongue et al., 2011) para monitoramento da produção, e até os relacionados às melhores estimativas de propriedades das rochas, através de levantamentos multicomponentes (Gaiser et al., 2001; Bansal e Gaiser, 2013).

Dentro do contexto histórico do desenvolvimento das teorias de projeto de aquisição, os elementos essenciais fonte, receptor, suas respectivas relações espaciais (geometria), e aspectos de instrumentação sempre foram elementos chave, inerentes ao desenho de todo e qualquer levantamento sísmico. Iniciar pelo caso 2D permite acompanhar os passos desse processo, formular os aspectos necessários ao desenho da aquisição e proceder naturalmente ao próximo nível da escala, definindo os conceitos que serão necessários ao caso 3D.

1.1 O Caso 2D

A definição dos parâmetros de aquisição envolve algum conhecimento da camada superficial e dos principais horizontes que se deseja mapear. A Figura 1.1 mostra um modelo geológico onde se observam os alvos e a camada superficial (ZBV), e a Figura 1.2 os elementos que definem a geometria, quais sejam, os afastamentos mínimo (X_{\min}) e máximo (X_{\max}) que definem, respectivamente, a distância entre o ponto de tiro e a primeira e última estações receptoras, o intervalo entre estações receptoras ou canais (IE), o intervalo entre pontos de tiro (IPT) e o número de canais (NC) no dispositivo de registro. O lanço do levantamento, distância entre o ponto de tiro e a última estação receptora em linha equívale, apenas no caso 2D, ao afastamento máximo.

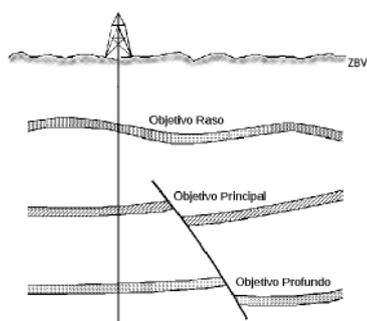


Figura 1.1: Modelo geológico simplificado, mostrando os principais alvos do levantamento.

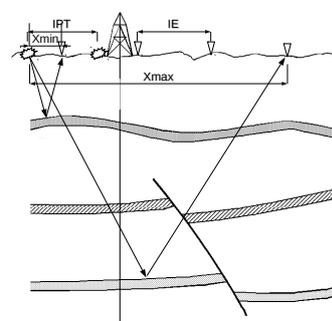


Figura 1.2: Definição dos parâmetros da geometria 2D. Modificados de Cordsen et al. (2000)

Desde que a geometria no caso 2D é definição direta da colinearidade de seus elementos, a relação entre estes e as propriedades do modelo, bem como os critérios de imageamento e resolução são os pontos críticos para sua determinação:

- A camada superficial: Em geral, essa camada possui baixa velocidade e é importante na determinação dos efeitos associados ao ruído coerente mais deletério aos dados sísmicos terrestres, o *ground-roll*, e aos problemas associados à correção estática. De

importância secundária no processo de desenho de aquisição sísmica propriamente dito, é de fundamental importância na escolha dos elementos fonte e na quantificação da fração de energia útil disponível, bem como no cuidado com os elementos de recepção;

- O horizonte raso: é o primeiro alvo secundário do levantamento, que tem impacto direto na definição do afastamento mínimo a ser escolhido. Embora não seja crítico na definição da geometria 2D, tem importância significativa no caso 3D. O conhecimento, ou uma estimativa de sua velocidade, profundidade e mergulho são parâmetros de entrada importantes. A boa definição desse horizonte é importante no processo de análise de velocidade e na interpretação dos horizontes mais profundos. Para que se tenha informação desse horizonte, é necessário que o afastamento mínimo seja, no máximo, igual a profundidade do horizonte, de sorte que se tenha cobertura nesse alvo. Na prática do caso 2D, o afastamento mínimo é muito menor do que esta profundidade fornecendo uma boa aproximação de afastamento nulo e possibilitando uma boa cobertura de traços próximos. No caso da geometria 3D ortogonal, isso não ocorre e veremos as implicações dessa limitação ao desenho dos parâmetros;
- O horizonte principal: nele reside o foco do processo de parametrização, exigindo a maior quantidade de informações disponíveis. Além de profundidade, velocidade e mergulho, é importante associar o nível de resolução desejado à qualidade sísmica da área e ao objetivo do programa sísmico, que impactarão a escolha dos diversos parâmetros do levantamento, como intervalo entre estações receptoras, o número de canais necessários, e
- O horizonte profundo: assim como o raso, é alvo secundário do levantamento e essencial a interpretação sísmica da área, em geral associado ao embasamento. O lanço do levantamento, via de regra, é função da profundidade desse horizonte, assim como o tempo total de registro e a potência da fonte sísmica.

1.1.1 Definição dos Parâmetros de Aquisição

De posse do modelo geológico, ou de sua representação geofísica nas propriedades físicas velocidade, profundidade, mergulho, e dos critérios específicos de processamento e interpretação, pode-se proceder a definição dos parâmetros de aquisição:

- Intervalo entre estações - IE
Escolher IE contempla a correta amostragem espacial do campo de ondas para os objetivos da aquisição, em especial aqueles dos horizontes alvos. Tanto o sinal quanto

o ruído coerente devem ser amostrados sem falseamento, e em consonância com a resolução pretendida. O critério de Nyquist para amostragem espacial é

$$IE_{\text{CMP}} < \frac{1}{2|k|_{\text{max}}} = \frac{V_{\text{min}}}{2f_{\text{max}}}, \quad (1.1)$$

onde V_{min} é a velocidade aparente mínima do evento a ser amostrado e f_{max} a frequência máxima esperada do evento no registro sísmico. Como em geral se deixa a amostragem do ruído a cargo do arranjo dos elementos de recepção, a relação abaixo é a de fato utilizada para a determinação do intervalo entre estações:

$$IE_{\text{CMP}} < \frac{V_{\text{int}}}{4f_{\text{max}} \sin \theta}, \quad (1.2)$$

onde IE_{CMP} é a amostragem em subsuperfície ($IE_{\text{CMP}} = IE/2$) e V_{int} , f_{max} e θ são, respectivamente a velocidade intervalar no nível do objetivo, a frequência máxima nesse horizonte e seu mergulho máximo.

- Número de canais - NC

Para definição do NC , deve-se levar em conta fatores operacionais, a disponibilidade de equipamento e em especial o afastamento máximo necessário. Na Figura 1.2, pode-se ver que ele está associado ao alvo mais profundo a ser imageado e a aos mergulho dos eventos. Além disso, a geometria fonte-receptor deve contemplar o registro suficiente de afastamentos que permitam a otimização dos processos de correção de sobretempo normal (NMO), silenciamento do estiramento (Mute), análise de velocidade e atenuação de múltiplas. Com base no cálculo de X_{max} a determinação de NC é realizada de forma direta, através da relação

$$NC = \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{IE} + 1. \quad (1.3)$$

- Intervalo entre pontos de tiro - IPT

A escolha do IPT , dentro do conceito *stack-array* (Anstey, 1986) em levantamentos 2D é fortemente condicionada ao IE . Em geral, faz-se esses intervalos coincidirem maximizando a simetria e a cobertura do levantamento, a menos que questões operacionais e financeiras demandem seu afrouxamento. Caso a área apresente problemas severos de estática, pode-se preferir posicionar a fonte na condição de afastamento nulo, sobre a primeira estação receptora, ao custo de perda de diversidade de parte dessa informação. Um fator preponderante para sua determinação é a cobertura desejada para o levantamento, que é uma medida do número de vezes em que a subsuperfície é amostrada, dada por:

$$\text{Cobertura} = \frac{NC \times IE}{2 \times IPT}. \quad (1.4)$$

A determinação da cobertura é função da qualidade sísmica da área, desde que ela age como elemento ativo no aumento da razão sinal/ruído do dado sísmico.

Com a definição de IE , IPT , X_{\min} e NC a geometria básica do levantamento 2D está praticamente definida do ponto de vista técnico. Há ainda a definição de parâmetros instrumentais e dos arranjos de fontes e receptores, que são função da natureza da aquisição, das características da área de pesquisa e dos recursos disponíveis, não sendo pois tratados nesse momento.

A Tabela 1.1 abaixo mostra os parâmetros que definem a geometria 2D, considerando um lanço bipartido simétrico. Os elementos de fonte e recepção não estão sendo contemplados, mas serão discutidos no Capítulo 3.

| Parâmetros 2D | Definição |
|----------------------|------------------------------------|
| IE | Intervalo entre estações (m) |
| IPT | Intervalo entre pontos de tiro (m) |
| X_{\min} | Afastamento mínimo (m) |
| NC | Número de canais |

Tabela 1.1: Elementos formadores da geometria 2D.

1.2 O Caso 3D

A definição da geometria e dos parâmetros de um levantamento 3D envolve um aumento significativo na quantidade de informações de entrada, quando comparada às aquisições 2D. Não apenas os objetivos geológicos e geofísicos têm de ser definidos com maior rigor, mas também os desafios operacionais têm valor significativo, podendo inclusive inviabilizar a campanha sísmica, dado seu peso nos itens técnico e financeiro. Os esforços relacionados a operacionalização envolvem requisitos de segurança (obras de engenharia, ambientes urbanos, e.g.), de meio ambiente (matas, florestas, mangues, e.g.), de permissão de áreas frente aos proprietários, de movimentação humana e de material (operação helitransportada, e.g.), de cronogramas físicos e aqueles determinados pelos agentes regulatórios, entre outros.

A amostragem areal do campo de ondas e a azimutalidade fonte-receptor, próprios aos levantamentos 3D, implicam uma variedade de geometrias e de parâmetros de formação que devem ser definidos para que se possa proceder aos estudos propriamente ditos de parametrização e projeto da aquisição. A Figura 1.3 mostra as várias geometrias possíveis em um levantamento 3D.

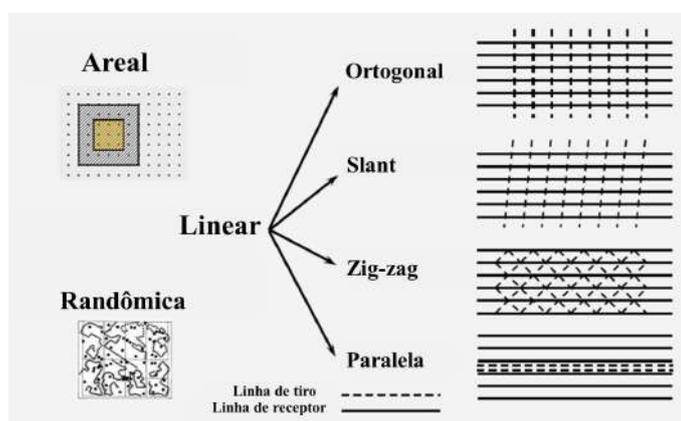


Figura 1.3: Tipos de geometria 3D. As geometrias lineares são as mais utilizadas na indústria de petróleo (modificado de Vermeer, 2012).

Neste trabalho será adotada apenas a geometria do tipo ortogonal, que melhor atende aos pressupostos de amostragem simétrica (Vermeer, 2012), além de facilitar as atividades de campo.

A geometria é dita ortogonal porque as linhas de receptores (*LR*) e de tiros (*LT*) são projetadas a formar um ângulo reto entre si, Figura 1.4. As linhas de receptores definem a chamada direção *in-line* do levantamento, ao passo que as linhas de tiros definem a direção *cross-line*. A área compreendida entre duas linhas consecutivas de tiros e de receptores formam uma macrocela (*Box*), Figura 1.5, que é o elemento representativo da aquisição onde todas as suas propriedades podem ser analisadas sem perda de generalidade. Para cada par

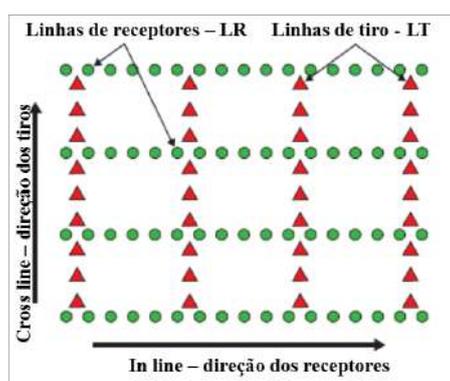


Figura 1.4: Geometria ortogonal, com definição das direções principais e linhas.

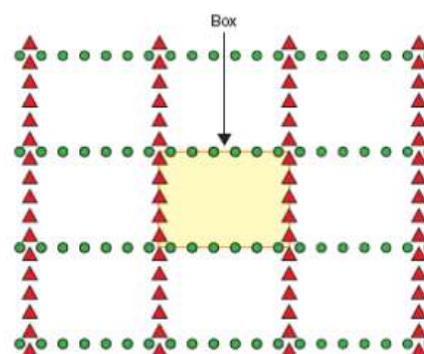


Figura 1.5: Definição da macrocela (*Box*), elemento representativo da geometria ortogonal.

fonte-receptor está associado um ponto médio, agora espalhado dentro da macrocela, que por sua vez é subdividida em área retangulares, ou celas (*CMP Bin*), Figura 1.6. Cada cela amostra traços que possuem o ponto médio comum, mas com afastamentos e azimutes diferentes, levando a extensão do conceito de cobertura para o caso 3D, em que se tem

contribuições nas duas direções. O número de traços que cai em cada cela, e que serão submetidos ao processo de empilhamento, formam a cobertura (grau de redundância) total do levantamento, Figura 1.7.

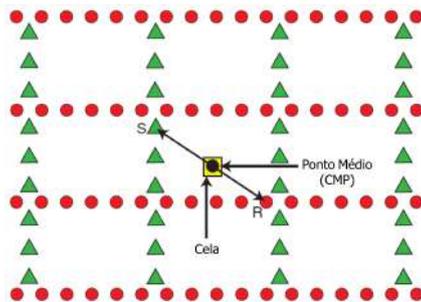


Figura 1.6: Definição de cela na macro-cela com o ponto médio associado.

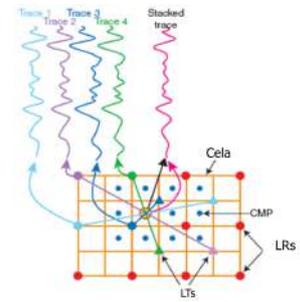


Figura 1.7: Definição da cobertura desejada em uma cela da macro-cela.

O próximo passo é definir a área ativa de aquisição, o dispositivo de registro (*template*), que define quais estações estarão ativas, e em geral fixas, quando da detonação de um salvo de tiros (Figura 1.8). O salvo, então, quantifica o número de tiros que é dado antes que o dispositivo se mova dentro da área de aquisição, quer seja na direção *in-line* ou na *cross-line*. A movimentação completa do dispositivo de registro na direção *in-line* define um subprograma (*Swath*), Figura 1.9, termo histórico associado a técnica de aquisição em que as linhas de tiro e receptor eram ortogonais. A movimentação do dispositivo de registro em

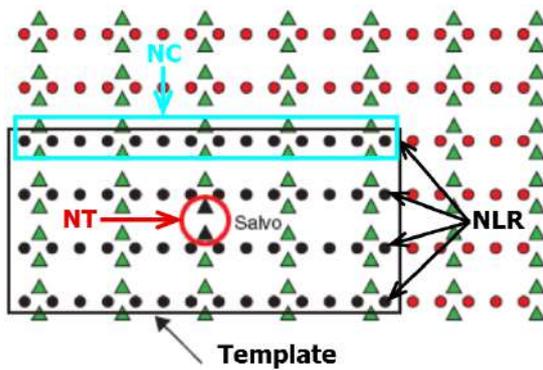


Figura 1.8: Dispositivo de registro (*template*) e elementos que o compõem.

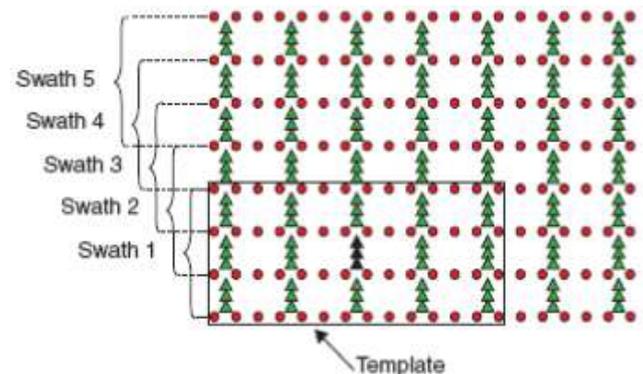


Figura 1.9: Definição dos subprogramas (*swaths*) com nomenclatura típica.

todos os subprogramas através de rolagens *in-line* e *cross-line*, Figura 1.10, mapeia a área completa de aquisição e constrói o mapa de cobertura do levantamento.

1.2.1 Definição dos Parâmetros de Aquisição

Tendo em mãos os elementos principais que compõem a geometria 3D, segue a definição dos parâmetros de aquisição, conforme Figura 1.11:

- Intervalo entre estações e pontos de tiro - IE e IPT

As mesmas condições do caso 2D são válidas aqui, especialmente aquela referente a simetria do levantamento, alvo de um bom trabalho de projeto de aquisição. Ao contrário do caso 2D anterior, os pontos de tiro são detonados na direção *cross-line*, Figura 1.11), nas linhas de tiros do programa. De importância fundamental na geometria ortogonal, eles definem as dimensões da cela ($IE/2 \times IPT/2$), mas são elementos de custo e, portanto, o equilíbrio técnico-financeiro-operacional deve ser buscado em suas escolhas. A flexibilização da cela na direção *cross-line* pode ser avaliada, se necessário, através de uma equação similar a Equação (1.1), em que agora é possível calcular as celas necessárias nas duas direções com base nos mergulhos máximos dos horizontes de estudo

$$Cela_x < \frac{V_{int}}{4f_{max} \sin \theta_x} \quad Cela_y < \frac{V_{int}}{4f_{max} \sin \theta_y}, \quad (1.5)$$

onde θ_x e θ_y são os mergulhos máximos dos horizontes nas direções *in-line* e *cross-line*, respectivamente.

- Intervalos de linhas de tiros e receptores - ILT e ILL

A Figura 1.5 nos dá o primeiro indício do que deve ser observado para a escolha desses intervalos. A área da macrocela é função direta de ILT e ILL e, pois o número de celas contidos dentro dela. Um número grande de celas dentro da macrocela tem o efeito deletério de aumentar a variação de atributos entre celas contíguas.

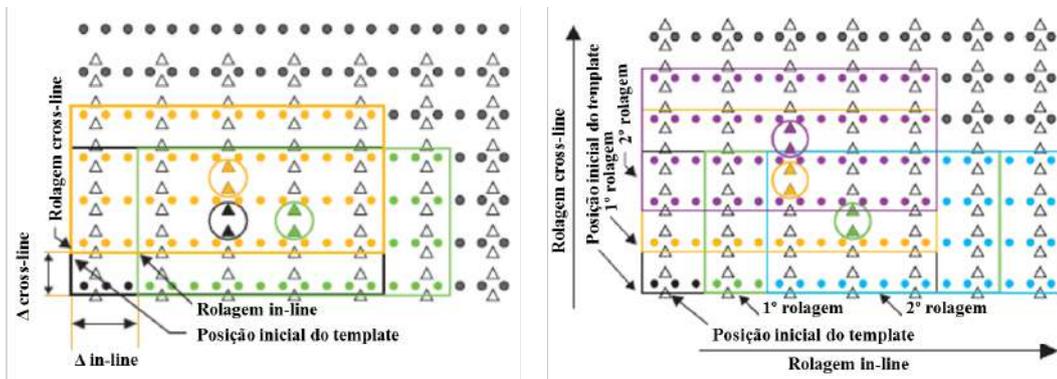


Figura 1.10: Posição inicial do dispositivo de registro com seus deslocamentos consecutivos ($\Delta_{in-line}$ e $\Delta_{cross-line}$) e suas rolagens in-line e cross-line associadas.

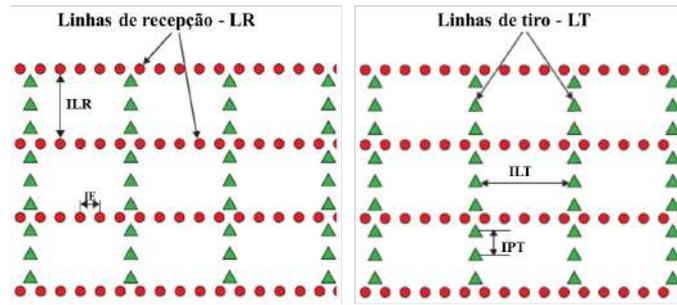


Figura 1.11: Parâmetros básicos de aquisição da geometria 3D ortogonal associados aos elementos de fonte (IPT e ILT) e de recepção (IE e ILR).

Além disso, o mapeamento de objetivos rasos, que em geral não constitui fonte de preocupação na aquisição 2D, agora é um fator crítico de escolha, através da definição do afastamento mínimo 3D, que aqui se denomina máximo afastamento mínimo ($X_{max_{min}}$). Ele representa o menor dos afastamentos que são amostrados na cela central da macrocela, e portanto o nível mínimo em profundidade em que se tem amostragem através do dado sísmico, Figura 1.12, dado por:

$$X_{max_{min}} \approx (ILT^2 + ILR^2)^{1/2} . \tag{1.6}$$

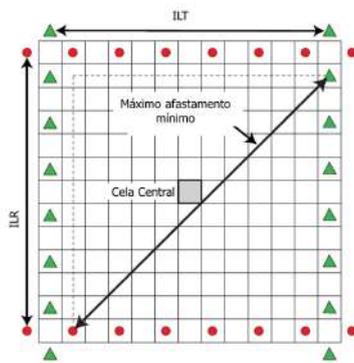


Figura 1.12: Definição do máximo afastamento mínimo na macrocela.

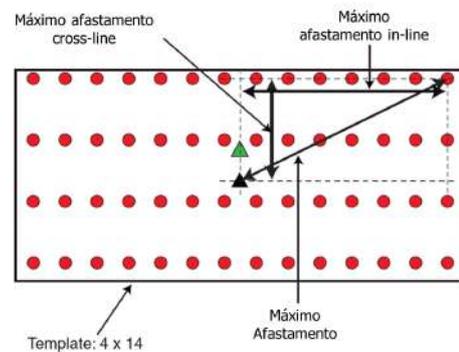


Figura 1.13: Definição do máximo afastamento no dispositivo de registro.

- Número de canais no dispositivo de registro - NC_{3D}

O número de canais no dispositivo de registro é um compromisso entre a quantidade de canais ativos espalhados na direção *in-line*, NC_{LR} , e o número de linhas de registros, NLR , que será usado na direção *cross-line*. A quantidade de canais disponíveis na equipe e fatores associados a custo e produtividade são mandatórios em sua definição.

Do ponto de vista técnico, é preciso prover a definição do afastamento máximo na geometria ortogonal para que se possa examinar os itens que contribuem para a escolha de NC e NLR . A Figura 1.13 mostra que o máximo afastamento na geometria ortogonal, $X_{max_{3D}}$, é aproximadamente metade da diagonal do dispositivo de registro, dada por

$$X_{max_{3D}} \approx (X_{max_i}^2 + X_{max_c}^2)^{1/2}, \quad (1.7)$$

onde X_{max_i} e X_{max_c} são os máximos afastamentos nas direções do levantamento.

A escolha de $X_{max_{3D}}$ sofre influência da profundidade do objetivo mais profundo, e de aspectos relacionados à correção de NMO, das características das múltiplas na área, entre outros. Quando já se dispõe de dados sísmicos, pode-se usar a função de silenciamento para determinar de forma mais precisa os afastamentos necessários a uma boa amostragem dos horizontes principal e secundários. Os parâmetros NC_{LR} e NLR do dispositivo de registro podem ser, então, associados aos afastamentos definidos, de sorte que

$$NC_{LR} = \frac{X_{max_i}}{IE}, \quad \text{e} \quad NLR = 2 \times \frac{X_{max_c}}{ILLR}. \quad (1.8)$$

Na prática, como o número total de canais pode ser um fator limitante, essas equações são fortemente acopladas e em geral é a definição de um parâmetro que limita a faixa de variação do outro. Além disso, a cobertura do levantamento é outro item a ser avaliado, e que acopla significativamente todos os elementos da geometria, dada por:

$$C_{3D} = \underbrace{\frac{NC_{LR} \times IE}{2 \times ILLT}}_{C_i} \times \underbrace{\frac{NLR}{2}}_{C_x}, \quad (1.9)$$

onde C_i e C_x são as coberturas associadas, respectivamente, as direções *in-line* e *cross-line* do levantamento do tipo ortogonal. A cobertura média para um dado afastamento pode ser calculada através da avaliação da área do círculo abrangido por esse afastamento, normalizado pela área da macrocela, Figura 1.14. A Tabela 1.2 mostra os 6 parâmetros que definem a geometria 3D ortogonal com lança bipartido simétrico e rolagem de linhas unitária.

| Parâmetros 3D | Definição |
|----------------------|---|
| IE (m) | Intervalo entre estações |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro |
| ILR (m) | Intervalo entre linhas de receptor |
| ILT (m) | Intervalo entre linhas de tiro |
| NC_{LR} | Número de canais ativos por linha de registro |
| NLR | Número de linhas de registro |

Tabela 1.2: Parâmetros da geometria 3D ortogonal com lanço bipartido simétrico e uma linha de rolagem.

No próximo capítulo definiremos o conjunto de informações geológicas e geofísicas oriundas do 3D FAV/RI/RBU. Esse conjunto de dados será de fundamental importância para o processo de otimização do desenho de aquisição e para a metodologia de iluminação orientada ao alvo, que serão descritos em sequência no Capítulo 3 e Capítulo 4.

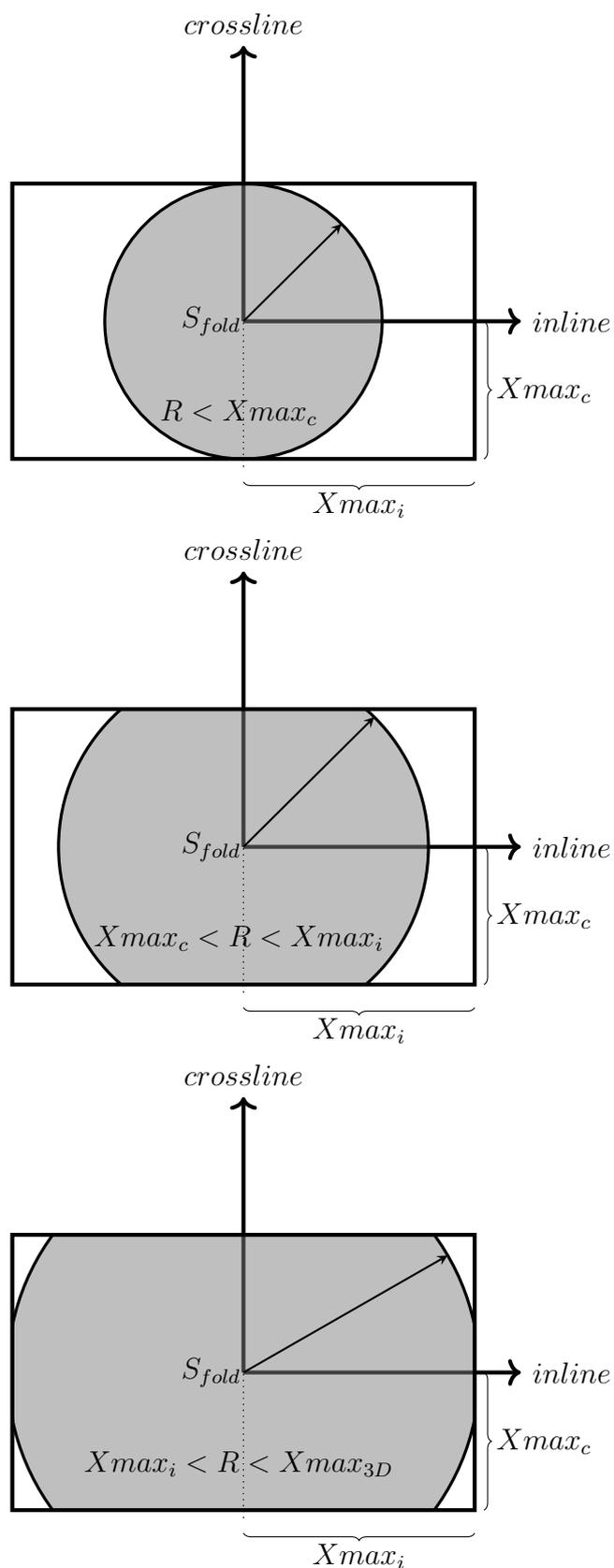


Figura 1.14: Determinação da cobertura média para um dado afastamento. A área hachurada (S_{fold}) normalizada pela área da macrocela fornece o valor médio de cobertura.

2

A Área de Estudo

2.1 Localização

A área de estudo engloba os Campos de Fazenda Alvorada (FAV), Rio Itariri (RI) e Rio do Bu (RBU) e está localizada no compartimento mais setentrional da Bacia do Recôncavo, denominado Compartimento Nordeste. Situa-se no Município de Esplanada, Estado da Bahia, a cerca de 145 km a nordeste da cidade de Salvador, Figura 2.1.

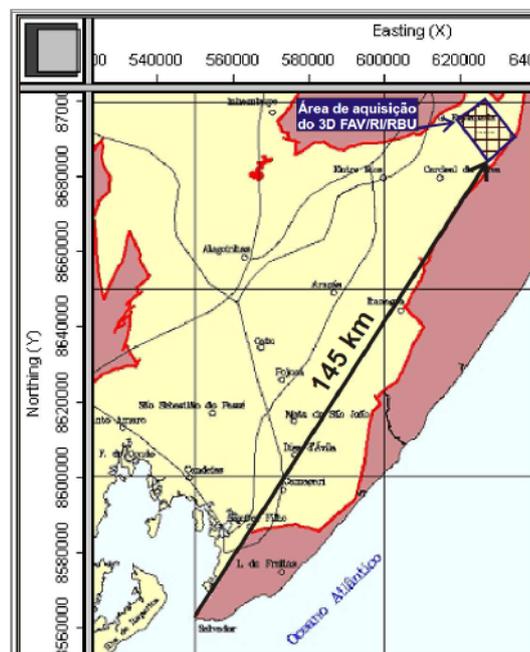


Figura 2.1: Mapa de localização do 3D FAV/RI/RBU na Bacia do Recôncavo. Modificado da Proposta de Levantamento Sísmico 3D (2007).

2.2 Informações Geológicas

A área está no contexto da feição estrutural denominada Patamar de Patioba (Figura 2.2), que apresenta mergulho regional das camadas para *SE*, variando de 10° a 22°. Regionalmente, está localizada no bloco alto da Falha de Pedras (*NE-SW*) com principais feições estruturais:

- A lesta da Bacia, a Falha de Borda associada aos conglomerados da Fm. Salvador;
- A falha de Patioba, de direção *NE-SW*, com rejeito variável de até 1000 m, e
- Na porção noroeste da área, a falha de Pedras, de direção *NE-SW* e rejeito da ordem de 800 m.

Os pacotes sedimentares encontram-se assentados sobre rochas metamórficas do Cráton do São Francisco, período Pré-Cambriano e os reservatórios nos campos estão associados às Fms. Água Grande e Sergi e as areias do Mb. Gomo da Fm. Candeias. O principal tectonismo que afetou a área ocorreu durante a deposição da seção pré-rite, sendo caracterizado por falhas normais de direções *NE-SW* (sistemas de Falhas de Patioba) e *NW-SE* (Falha de Fazenda Alvorada), e padrão geométrico concordante com os principais esforços da Bacia (sistema de Falhas de Salvador).

A seguir tem-se uma descrição sumária das características específicas de cada campo.

2.2.1 Campo de Fazenda Alvorada - FAV

O campo de Fazenda Alvorada tem área de ocorrência de hidrocarbonetos de aproximadamente 3.0 km² e área de concessão (*ring-fence*) de 10.0 km². Os principais reservatórios produtores de óleo do campo encontram-se nos arenitos das Fms. Água Grande, Itaparica - ambos flúvio-eólicos-lacustrinos - e Sergi (rios entrelaçados). O campo de FAV é constituído por três blocos principais e independentes, separados por falhas normais também de direção *NW-SE*, apresentando estruturas homoclinais com camadas mergulhando aproximadamente 25° para sudeste, Figura 2.3. O pacote sedimentar possui espessura média da ordem de 1050 m.

2.2.2 Campo de Rio Itariri - RI

O campo de Rio Itariri tem área de ocorrência de hidrocarbonetos de aproximadamente 2.3 km² com área de concessão de 5.9 km². Os principais reservatórios produtores de óleo

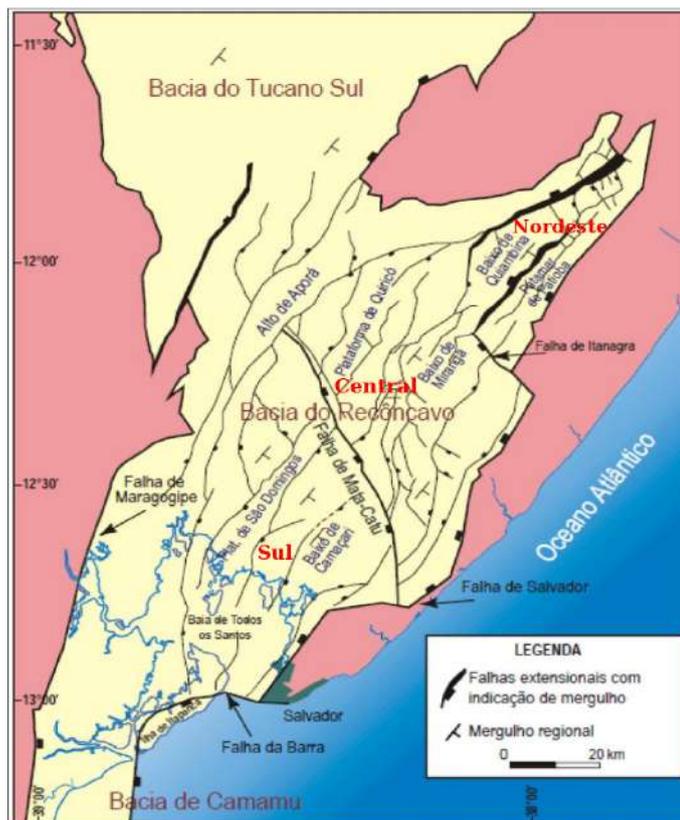


Figura 2.2: Mapa de localização, compartimentação e arcabouço estrutural da Baía do Recôncavo. Modificado de Milhomem et al. (2003).

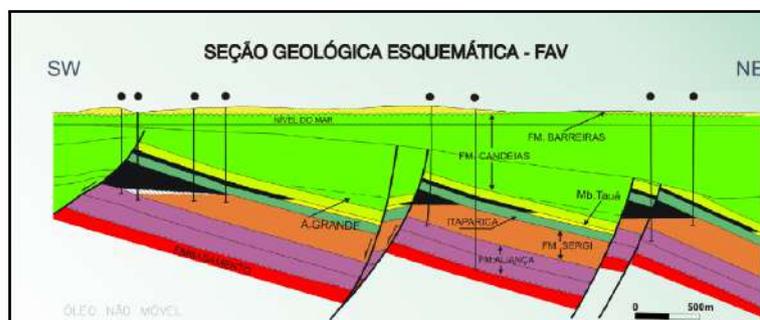


Figura 2.3: Seção geológica esquemática do Campo de Fazenda Alvorada.

do campo correspondem aos arenitos turbidíticos do Membro Gomo da Fm. Candeias, Figura 2.4. No campo, a estrutura do reservatório corresponde a um semidomo com eixo desenvolvido na direção *NW-SE* e estratos mergulhando em todas as direções com inclinações variando entre 8° e 14° . O pacote sedimentar possui espessura média da ordem de 1800 m.

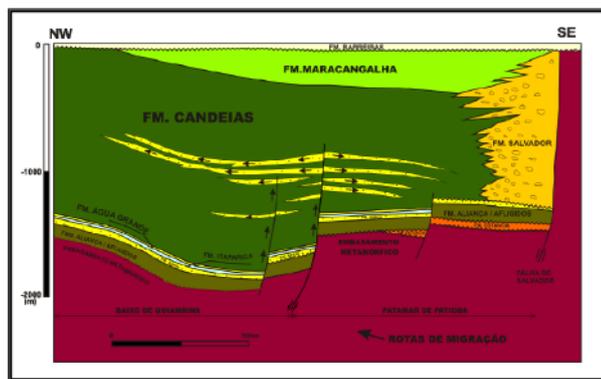


Figura 2.4: Seção geológica esquemática do Campo de Rio Itariri.

2.2.3 Campo de Rio do Bu - RBU

O campo de Rio do Bu tem área de ocorrência de hidrocarbonetos de aproximadamente 4.0 km^2 com área de concessão de 8.9 km^2 . Os principais reservatórios produtores de óleo do campo, assim como no campo RI, encontram-se nos arenitos da Fm. Candeias, Figura 2.5. O campo é dividido estruturalmente em duas partes pelo Sistema de Falhas de Patioba: Bloco Sul e Bloco Norte. O Bloco Norte apresenta feição homoclinal, com mergulhos acentuados de 20° para *SE*, com reservatórios tendo forte controle estratigráfico devido ao acunhamento deposicional para *NE* e *NW*. No Bloco Sul, por outro lado, as acumulações têm forma dômica, com leve alongamento na direção *NE*. Neste campo, o pacote sedimentar possui espessura média da ordem de 1.500 m.

2.3 História Sísmica da Área

Originalmente, a interpretação geofísica dos campos foi baseada em linhas sísmicas 2D mal distribuídas, com malha de espaçamento entre 600 m a 800 m, adquiridas no início da década de 80. A esparsidade da malha e a resolução sísmica regular a deficiente foram considerados fatores preponderantes para a pouca definição dos modelos estruturais propostos. A Tabela 2.1 mostra os parâmetros típicos dos levantamentos 2D da época.

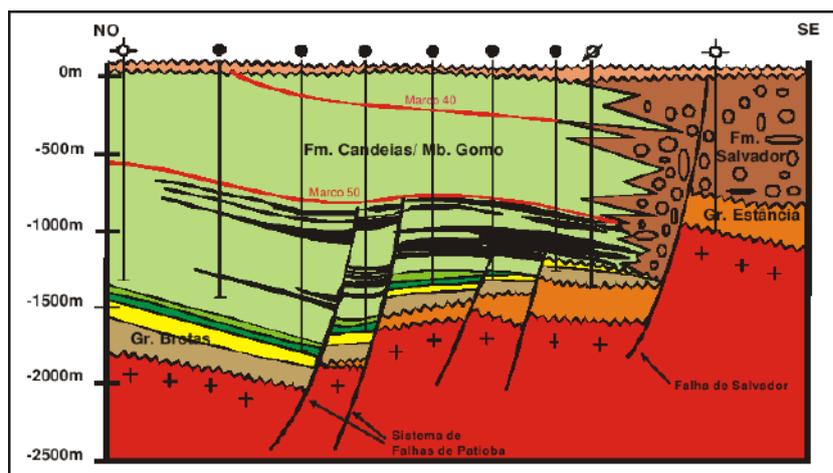


Figura 2.5: Seção geológica esquemática do Campo de Rio do Bu.

| Parâmetro | Definição | Valor |
|---------------|--|-------|
| IE (m) | Intervalo entre estações | 50 |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro | 50 |
| X_{min} (m) | Distância ponto de tiro ao primeiro receptor | 200 |
| NC | Número de canais | 48 |

Tabela 2.1: Parâmetros típicos dos 2Ds na área de estudo.

As seções sísmicas representadas nas Figuras 2.6 a 2.7 mostram a qualidade dos dados sísmicos 2D adquiridos no início da década de 80, de acordo com os parâmetros da Tabela 2.1. Já na Figura 2.8 pode-se um ver um dado 2D adquirido no campo de FAV em 1993, com parâmetros mais adensados, quais sejam: $IE = IPT = 15$ m, $X_{min} = 30$ m e $NC = 240$. A melhor amostragem espacial e da parte rasa da seção e o aumento da cobertura dos levantamentos (de 24 para 120) justificam o aumento de qualidade da última seção.

Em 2007 foi realizado um levantamento sísmico 3D ortogonal de 128 km² englobando as áreas dos campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do Bu, denominado 3D FAV/RI/RBU. Na Figura 2.9 tem-se o mapa de detalhe de localização do levantamento. O objetivo geral foi agregar melhorias ao modelo geológico estrutural dos objetivos, visando auxiliar projetos de injeção e locações. Em termos específicos, os objetivos foram:

- Na seção rifte, prover melhor imageamento dos corpos turbidíticos da Fm. Candéias;
- No pré-rifte, prover melhor imageamento dos arenitos das Fms. Água Grande e Sergi;
- Melhorar a definição dos planos das Falhas de Patioba e Pedras, e

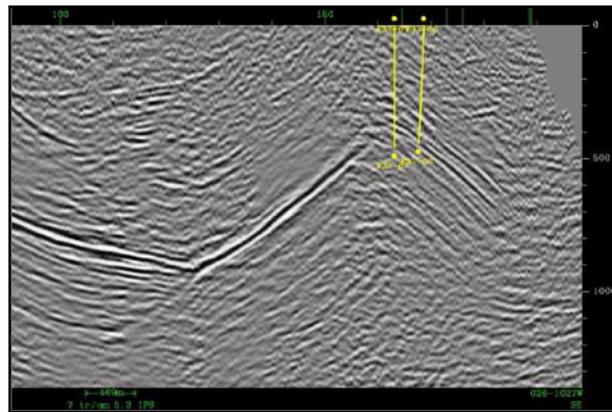


Figura 2.6: Linha sísmica 2D adquirida no campo de FAV em 1984.

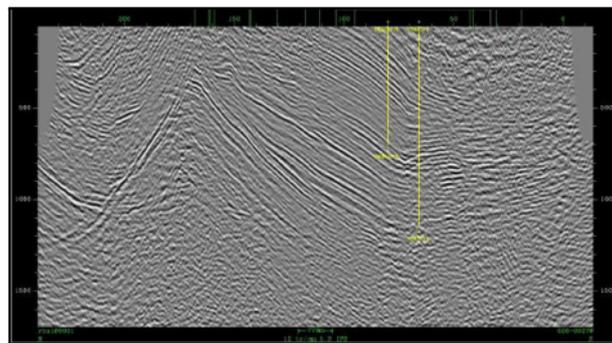


Figura 2.7: Linha sísmica 2D adquirida no campo de RBU em 1983.

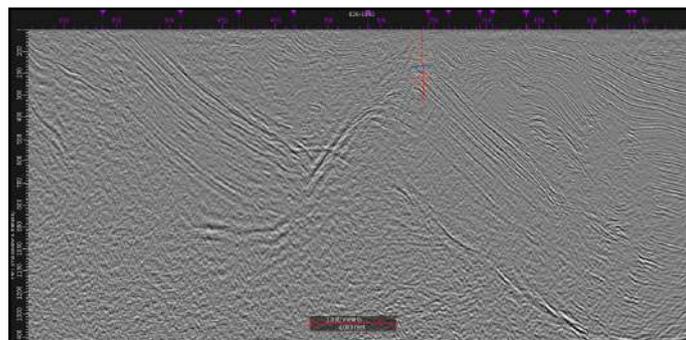


Figura 2.8: Linha sísmica 2D adquirida no campo de FAV em 1993.

- Auxiliar projetos de locações (exploratória e exploratória) e de injeção via um melhor entedimento do arcabouço estrutural.

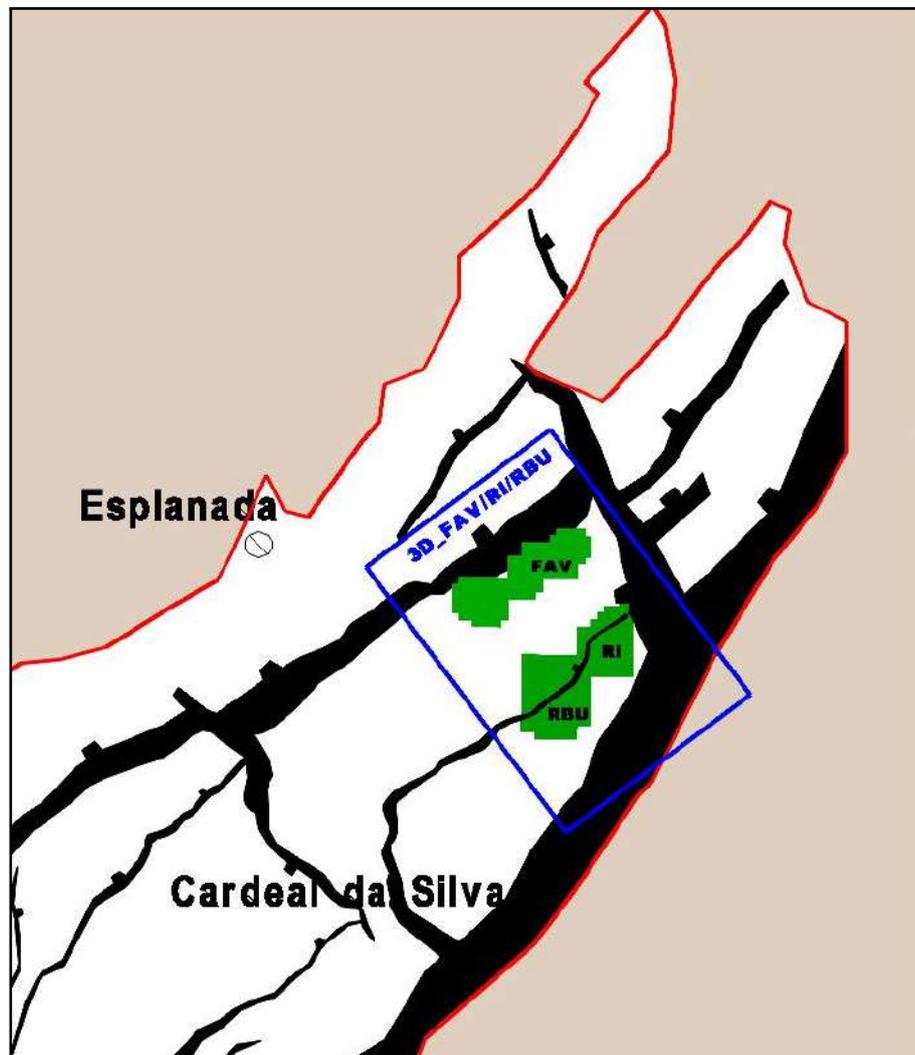


Figura 2.9: Mapa de detalhe no compartimento norte da Bacia do Recôncavo do 3D FAV/RI/RBU. Em azul o polígono delimitador do 3D e em verde a identificação dos campos abrangidos com seus polígonos de concessão.

Na Tabela 2.2, pode-se ver a descrição completa dos parâmetros da geometria do 3D FAV/RI/RBU, definidos de acordo com as seguintes premissas:

- O objetivo principal encontra-se no pré-rifte em profundidades variando de 400 m a 2000 m;
- O objetivo secundário encontra-se no rifte em profundidades variando de 1000 m a 1400 m;
- O embasamento encontra-se em profundidades variando de 800 m a 2400 m;

- Mergulhos máximos das camadas de 5° a 15° no objetivos e de 30° a 60° nas falhas;
- Frequência máxima de 80 Hz ao nível do objetivo, e
- Número máximo de 2400 canais disponíveis para espalhamento em campo.

| 3D FAV/RI/RBU | | |
|---|--------------------------------------|--------------|
| Parâmetro | Definição | Valor |
| <i>IE</i> (m) | Intervalo entre estações | 40 |
| <i>IPT</i> (m) | Intervalo entre pontos de tiro | 40 |
| <i>ILR</i> (m) | Intervalo entre linhas de registro | 200 |
| <i>ILT</i> (m) | Intervalo entre linhas de tiro | 200 |
| <i>NC</i> | Número total de canais ativos | 1200 |
| <i>NLR</i> | Número de linhas de registro | 8 |
| <i>NLRR</i> | Número de linhas de registro roladas | 1 |
| Tipo de Lanço : Bipartido simétrico | | |
| Esquema de detonação : Ligando e desligando nas bordas | | |
| Arranjos | | |
| Receptores : 6 elementos espaçados de 6.5 m | | |
| Tiros : 3 furos de 3 m com 0.5 kg, espaçados de 10 m | | |

Tabela 2.2: Parâmetros do 3D FAV/RI/RBU.

Nas Figuras 2.10 a 2.13 pode-se ver o planejamento do mapa de cobertura, das características de geometria e das distribuições de afastamento e azimute do 3D. A área de interesse geológico está completamente imageada com cobertura completa, os afastamentos foram planejados dentro das premissas de forma a ter uma faixa de amostragem de aproximadamente 250 m a 3100 m e o levantamento tem uma distribuição azimutal considerada pobre para os horizontes médios e profundos.

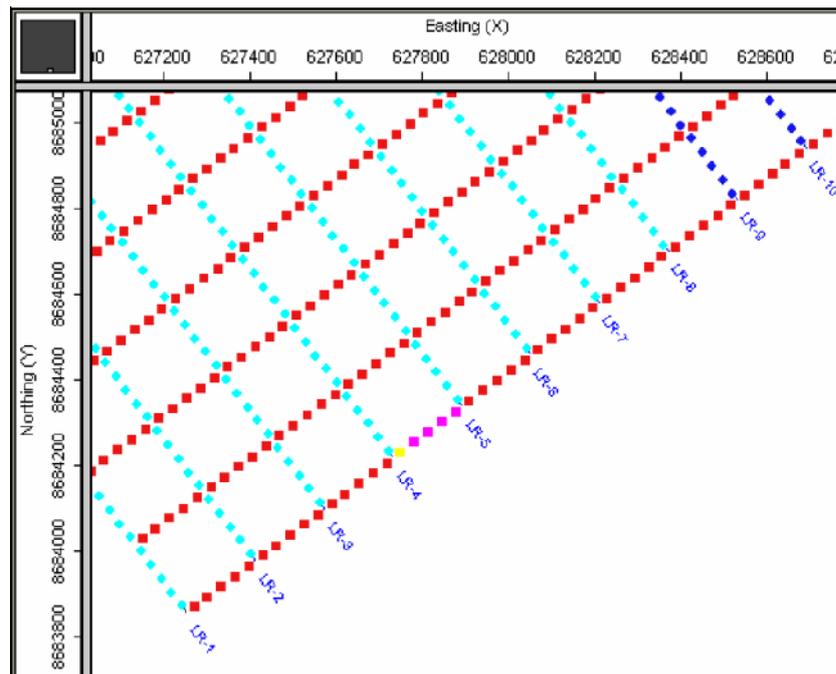


Figura 2.10: Dispositivo de registro do 3D FAV/RI/RBU. Detalhe das 8 primeiras linhas de registro ativas com salvo de 5 tiros centrais.

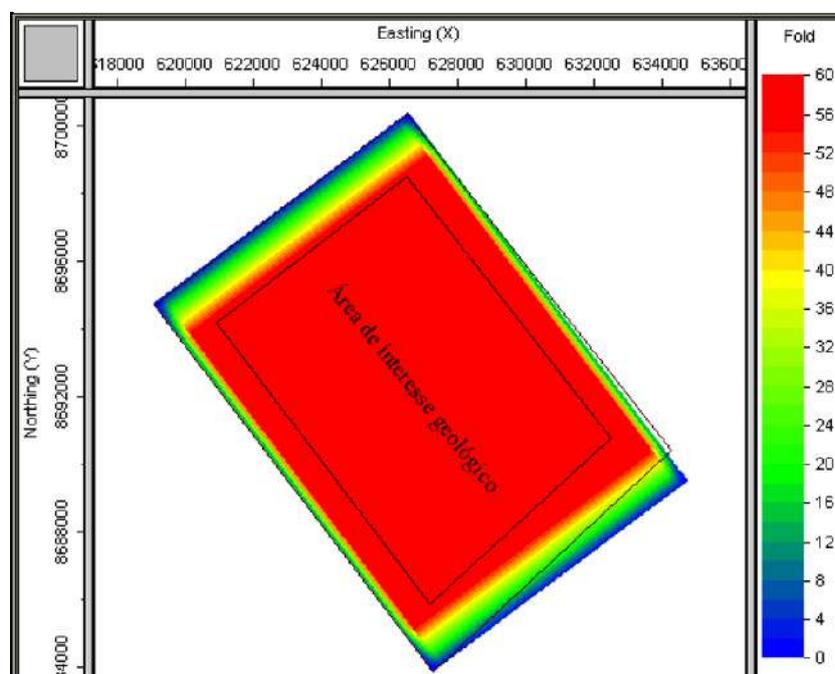


Figura 2.11: Mapa de cobertura do 3D FAV/RI/RBU. A área de interesse geológico está englobada pela região de cobertura completa.

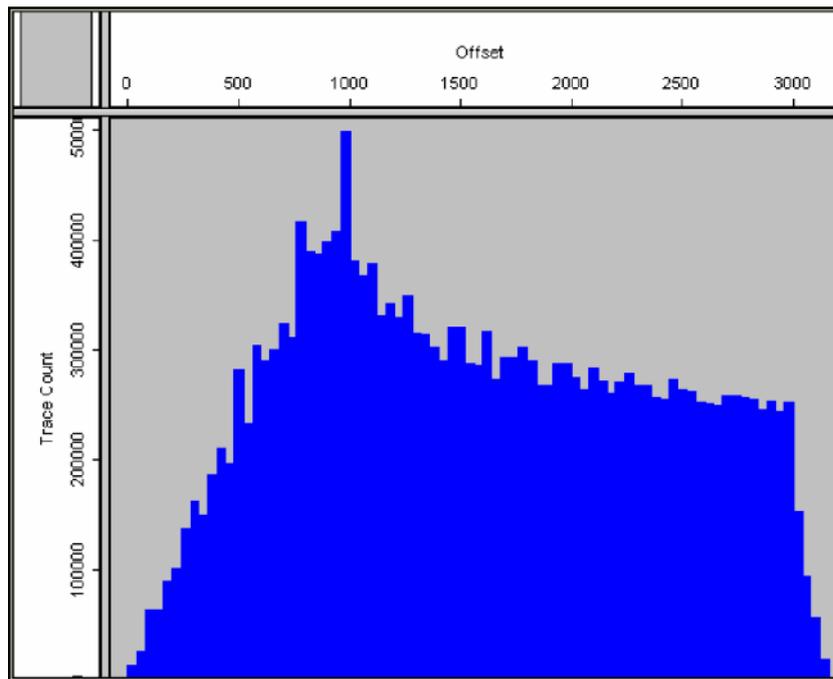


Figura 2.12: Histograma de afastamentos do 3D FAV/RI/RBU, contemplando a faixa de profundidades de 280 m a 3100 m.

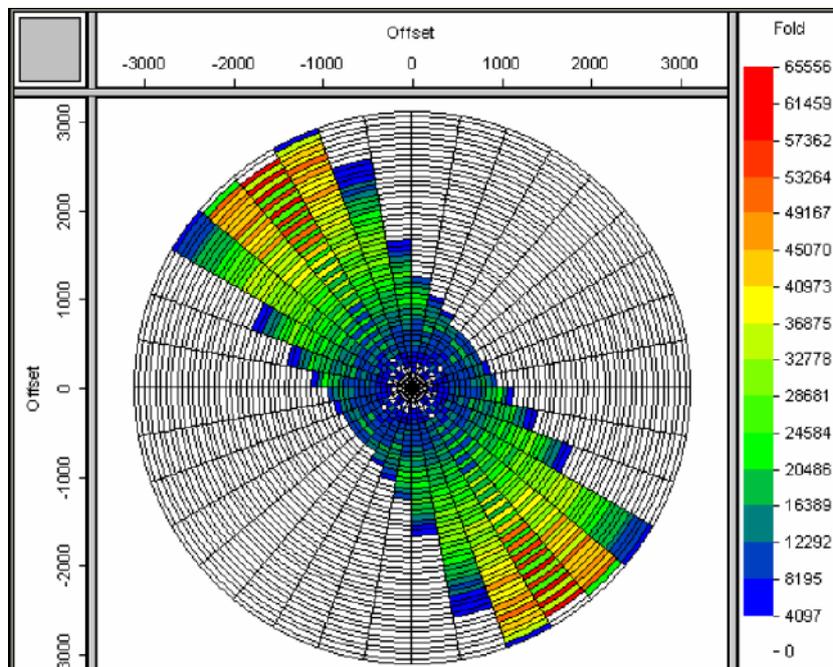


Figura 2.13: Distribuição azimutal do 3D FAV/RI/RBU. Note que a baixa razão de aspecto (≈ 0.27) é causa da concentração de azimutes na direção das linhas de receptor.

A qualidade sísmica do 3D adquirido foi qualificada como regular no campo de Fazenda Alvorada, boa na seção rifte mas regular a deficiente no pré-rifte dos campos de Rio Itariri e Rio do Bu. A Figura 2.14 mostra uma seção sísmica *dip* estrutural do compartimento nordeste, onde pode-se ver sua subdivisão em dois meios- grábens: O Patamar de Patioba e o Baixo de Quiambina, separados, respectivamente, pela Falha de Patioba e Falha de Pedras. A Figura 2.15, por sua vez, mostra uma seção geológica esquemática equivalente, apontando os contextos geológicos associados ao campos de FAV, RI e RBU. Essa contextualização é de fundamental importância para a definição e entendimento das escolhas associadas ao processo de inversão do parâmetros do levantamento 3D de acordo com a metodologia proposta nessa tese. Nas Figuras 2.16 a 2.18 pode-se ver seções sísmicas *dip* estruturais representativas dos três campos, extraídas do volume de dados adquirido. Nota-se a diferença significativa entre a profundidade dos objetivos dos campos, a degradação da parte mais rasa no FAV e mais profunda da seção (embasamento), fatores que serão mais discutidos nas restrições e valores alvos associados a função objetivo do processo de inversão no Capítulo 3.

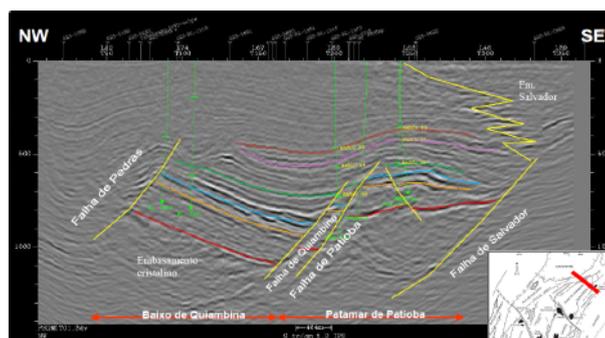


Figura 2.14: Compartimentação nordeste em dois meios-grábens, o Patamar de Patioba e o Baixo de Quiambina no dado sísmico. Modificado de Brandão (2015)

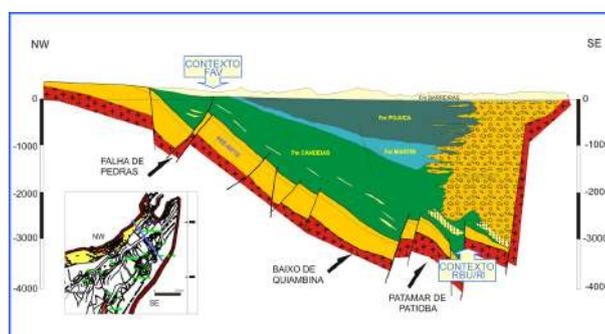


Figura 2.15: Seção geológica esquemática *dip* estrutural que mostra a compartimentação nordeste em dois meios-grábens e os contextos geológicos associados ao campos de estudo.

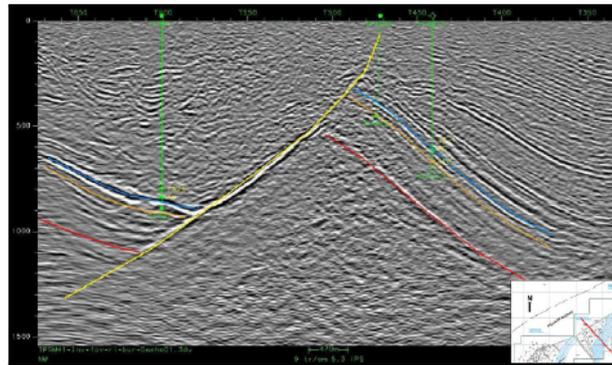


Figura 2.16: Seção *dip* estrutural representativa do Campo de Fazenda Alvorada, extraída do 3D FAV/RI/RBU.

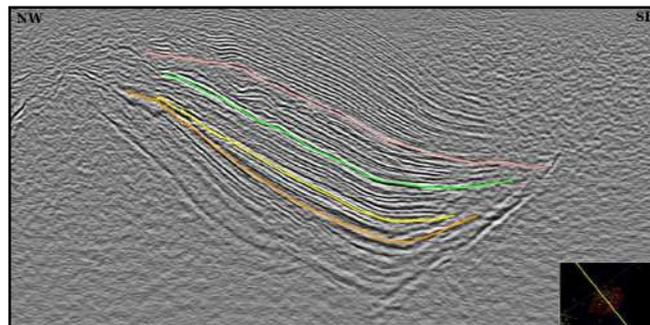


Figura 2.17: Seção *dip* estrutural representativa do Campo de Rio Itariri, extraída do 3D FAV/RI/RBU.

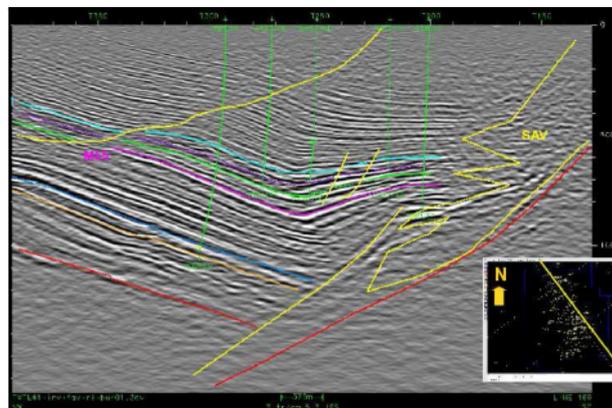


Figura 2.18: Seção *dip* estrutural representativa do Campo de Rio do Bu, extraída do 3D FAV/RI/RBU.

No próximo capítulo o desenho de aquisição será formulado em termos de inversão utilizando o algoritmo de base mista. Será feita a definição da representação base mista, a reformulação dos parâmetros da geometria ortogonal para esse novo modelo, e a aplicação em dados sintético e real, no 3D FAV/RI/RBU.

3

Desenho de Aquisição Usando Representação em Base Mista

Neste capítulo desenvolvemos uma metodologia de inversão de parâmetros de geometria de levantamentos sísmicos 3D terrestres ortogonais baseados em um método de pesquisa direta usando um algoritmo de base mista. A função objetivo escolhida contempla parâmetros alvos associados aos elementos da geometria de aquisição, que estão diretamente relacionados as restrições geofísicas e operacionais. O espaço de busca é discretizado em uma base que depende dos valores extremos e da resolução de pesquisa para cada parâmetro e, valendo-se do fato que a função objetivo que definimos para o problema não tem custo computacional significativo, todos os modelos do espaço de parâmetros são testados de forma bastante eficiente. Mostraremos que é possível reparametrizar a geometria de aquisição ortogonal de sorte a obter, com o algoritmo de inversão base mista não só o melhor modelo, mas um conjunto de excelentes modelos que atendem aos objetivos propostos e as restrições aplicadas, organizados por grau decrescente de desempenho a um custo computacional que não é significativo, aliando velocidade e precisão na obtenção dos resultados. Com o conjunto de melhores geometrias, é possível estabelecer uma comparação direta entre elas, analisando diretamente sua aderência aos requisitos técnicos e operacionais de acordo com a disponibilidade e o grau de detalhamento de cada um. O algoritmo é bastante flexível e sua aplicação pode ser estendida a qualquer ambiente e tipo de geometria de aquisição, e em qualquer fase de estudo de uma área, seja ela regional, exploratória ou explotatória.

3.1 Representação em Base Mista

A representação de um número natural N em uma base mista $B = (b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_2, b_1, b_0)$, pode ser feita através de uma soma ponderada:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} x_i W_i, \quad (3.1)$$

onde:

$$\begin{cases} b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_1, b_0 \in \mathbb{N}_{>0} = \{1, 2, 3, \dots\}; \\ N < B_n = b_{n-1} \times b_{n-2} \times \dots \times b_1 \times b_0, \text{ e} \\ W_0 = 1, \quad W_1 = b_0, \quad W_2 = b_1 \times b_0, \quad \dots, \quad W_{n-1} = b_{n-2} \times b_{n-3} \times \dots \times b_1 \times b_0. \end{cases}$$

Cada coeficiente x_i é um número natural menor que b_i e N é representado na base mista B unicamente pelo vetor $x = [x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0]$ com pesos $W = [W_{n-1}, W_{n-2}, \dots, W_1, W_0]$. Na base mista os pesos são dados por $W_i = b_{i-1} \times b_{i-2} \dots b_1 \times b_0$, de onde se extrai que no caso particular do sistema de base B fixo ($b_i = b$), os pesos serão dados por $W_i = b^i$, e o número natural N sera escrito como $N = b^{n-1} \times x_{n-1} + b^{n-2} \times x_{n-2} + \dots + b \times x_1 + x_0$.

A aplicação no processo de inversão dos elementos da geometria de um levantamento sísmico é direta, desde que cada parâmetro a ser determinado identifica uma dimensão associada do problema. O total de geometrias é dado pela combinação de todos as possibilidades de todos os parâmetros, definidas por seus valores extremos e a pela resolução desejada de pesquisa em cada um deles. O algoritmo de base mista, portanto, é uma solução eficiente para a redução da multidimensionalidade do problema, indexando univocamente um arranjo de varias dimensões em um vetor. Cada elemento do vetor converte-se em um conjunto de parâmetros a ser testado, i.e., existe apenas um vetor $[x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0]$ que representa N . A Figura 3.1 mostra o esquema de divisões sucessivas que deve ser efetuado para representar N na base mista B através do vetor x , onde cada elemento desse vetor representa um conjunto de parâmetros da geometria. O resto da divisão de N por b_0 fornece x_0 . O quociente dessa divisão, Q_0 , por sua vez ao ser dividido por b_1 tem como resto x_1 . O processo segue até a última divisão, onde x_{n-1} é determinado.

Como exemplo tomemos um caso onde se deseja determinar três parâmetros: P_1 , P_2 e P_3 . A Tabela 3.1 mostra a indexação para os casos onde cada parâmetro tem duas possibilidades, simulando a base fixa 2, e onde P_1 tem duas possibilidades, P_2 tem uma possibilidade e P_3 tem quatro possibilidades, simulando a base mista $(2, 1, 4)$. O número total de parâmetros a determinar em ambos os casos é igual a 8 ($N_{\max} = 7$).

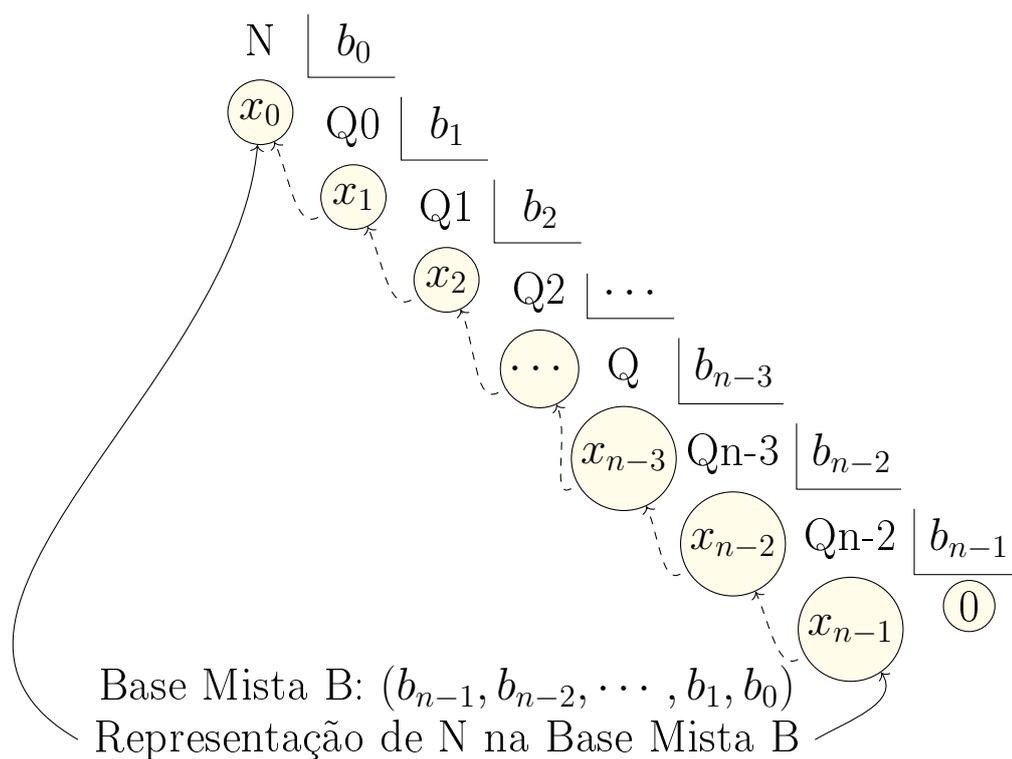


Figura 3.1: Esquema de divisões sucessivas para determinação da representação do número inteiro N na base mista $B = (b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_1, b_0)$. N é unicamente representado na Base Mista B por $x = (x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0)$.

| Índice | Base fixa 2 | Base mista (2, 1, 4) |
|--------|-------------|----------------------|
| 0 | 0 0 0 | 0 0 0 |
| 1 | 0 0 1 | 0 0 1 |
| 2 | 0 1 0 | 0 0 2 |
| 3 | 0 1 1 | 0 0 3 |
| 4 | 1 0 0 | 1 0 0 |
| 5 | 1 0 1 | 1 0 1 |
| 6 | 1 1 0 | 1 0 2 |
| 7 | 1 1 1 | 1 0 3 |

Tabela 3.1: Representação para $N_{\max} = 7$ na base fixa 2 e na base mista (2, 1, 4).

3.2 Aplicação em um modelo sintético

Uma contextualização histórica e da literatura disponível esclarece os pontos chave que estamos solucionando. O trabalho de Liner et al. (1999) foi pioneiro em formular um procedimento de otimização de parâmetros de aquisição submetidos a critérios geofísicos. Usando a geometria do tipo ortogonal, seis parâmetros foram determinados através da minimização de uma função custo, calculando os desvios normalizados em relação aos valores alvos. Um grande número de possibilidades foram testadas, mas com repetição de geometrias, restrição dos valores dos parâmetros aos mais usuais e minimização através de um método de escopo local.

Os trabalhos de Morrice et al. (2001) e Vermeer (2003) refinaram esse conceito, inserindo na função de otimização fatores operacionais e econômicos. Morrice et al. incorporaram no processo um modelo específico de avaliação econômica, invertendo treze variáveis associadas a geometria. Vermeer usou a função de avaliação econômica de Morrice et al., mas descreveu a geometria ortogonal regular simétrica com uma linha de rolagem usando apenas seis parâmetros, dos quais somente os intervalos de tiro e receptor não necessariamente eram inteiros. Métodos de escopo local também foram utilizados para encontrar a melhor solução. A abordagem aqui utilizada para a descrição da geometria ortogonal regular é bastante similar àquela de Vermeer, mas todos os parâmetros são inteiros, além de independentes entre si.

Góis e Porsani (2013) propuseram uma metodologia de otimização de parâmetros de aquisição sísmica terrestre 3D com aplicação nas bacias sedimentares brasileiras. O ponto central desta metodologia era criar uma função aquisição, um funcional integrado com dependência direta dos elementos da geometria de aquisição, arranjos de fonte e receptor, além de análises de custo e tempo de execução. Os autores realizaram a modelagem direta analisando os parâmetros associados à geometria com objetivo futuro de incorporar outros elementos de decisão e determinar o conjunto de parâmetros que resultam em um melhor dado geofísico para uma dada bacia sedimentar, aliando menores custo e tempo das frentes de campo.

Neste trabalho, o desenho da aquisição sísmica foi atacado através de um esquema eficiente de pesquisa direta, usando um algoritmo de inversão de base-mista (Schönheim, 1967; Singleton, 1969; Kekre e Gorty, 2013). A geometria adotada foi a do tipo ortogonal regular com lança bipartido simétrico. Nas Figuras 3.2(a) e 3.2(b) os principais elementos da geometria nos domínios do dispositivo de registro e do lança cruzado são apresentados. A fim de adaptar os seis elementos da geometria ortogonal regular com uma linha de rolagem ao algoritmo de inversão base mista, eles foram definidos, sem perda de generalidade, como números inteiros e independentes. Só então aplicamos a metodologia de inversão através do

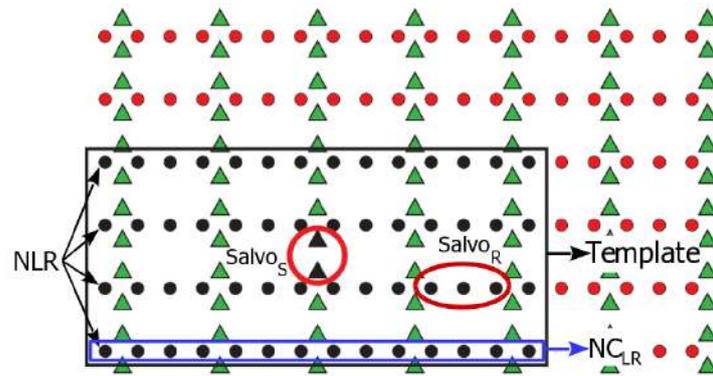
cômputo do desempenho de uma função objetivo, submetido a restrições geofísicas e operacionais. As primeiras estão associadas a iluminação dos objetivos geológicos principais, dos afastamentos e das relações de simetria necessárias. A restrição operacional foi definida como função da quantidade total de canais disponíveis.

Desejamos obter não só a melhor geometria mas um conjunto significativo de boas geometrias organizadas por desempenho, facilitando a tomada de decisão sobre qual será de fato realizada. Para controle de todas as etapas do processo, todos os dados necessários foram simulados através de uma geometria sintética modelo. Os resultados são dados graficamente e em uma tabela, com as 10 melhores geometrias. Eles demonstram a potencialidade do algoritmo de inversão de geometrias de aquisição sísmica usando base mista a casos reais, onde as melhores soluções técnicas serão aliadas as boas práticas operacionais e referências de custo.

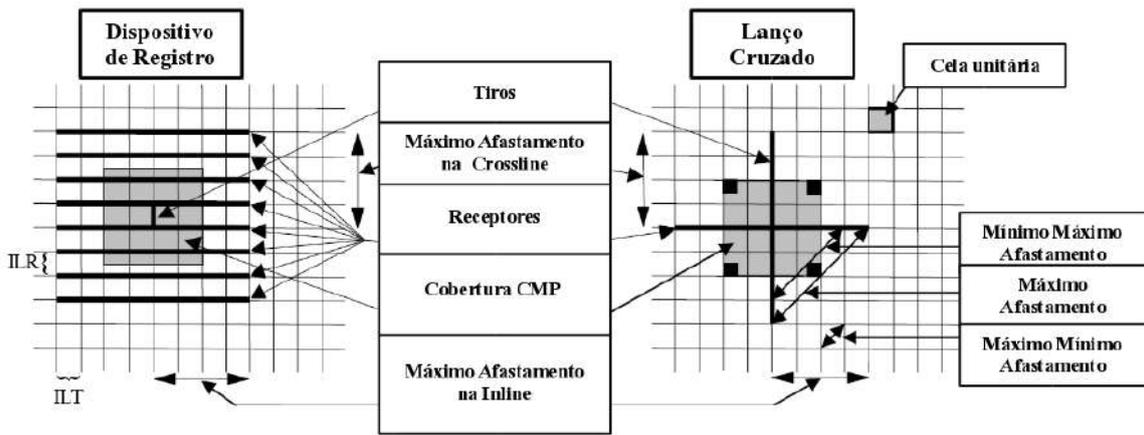
A aplicação da representação em base mista à determinação dos melhores parâmetros da geometria ortogonal pode ser feita através da reparametrização de seus elementos. A Tabela 3.2 mostra os parâmetros naturais geradores da geometria ortogonal da forma que se adquire os dados de campo, via dispositivo de registro, assim como outros parâmetros importantes derivados. Os sete parâmetros naturais são a distância entre tiros e receptores (IE e IPT), os intervalos entre linhas de registro e de tiros (ILR e ILT), o número de canais ativos por linha de registro (NC_{LR}), o número de linhas ativas de registro (NLR) e o número de linhas de registro roladas (NLRr). Embora a descrição dos parâmetros naturais da geometria ortogonal baseada no dispositivo de registro seja bastante importante e intuitiva, deve-se realizar uma nova descrição, mais adequada ao sistema de representação em base mista.

Na Tabela 3.3 selecionamos como variáveis naturais parâmetros que têm importância fundamental na definição do problema e que, ao mesmo tempo, fornecem em seu conceito os valores extremos e a resolução de pesquisa adequadas a inversão das melhores geometrias via sistema de representação em base mista. São elas a distância entre tiros e receptores, a cobertura in-line e cross-line, o salvo de tiro e receptor e o número de linhas de registro roladas.

Para cada elemento da geometria, estão indicados os valores mínimos e máximos típicos, e pode-se ver que todos podem ser descritos por números inteiros com resolução unitária. Essa resolução é adequada à descrição do desenho de aquisição do ponto de vista prático, fazendo com que a pesquisa do espaço de parâmetros seja representativa das geometrias de aquisição sísmica normalmente utilizadas. Além disso, todos os elementos são independentes entre si,



(a)



(b)

Figura 3.2: Geometria ortogonal regular com definição de alguns de seus elementos e domínios. (a) Representação da forma em que os dados são adquiridos no campo (dispositivo de registro) com a linha de receptores ativos (em preto), o salvo de tiros e a definição usada para o “salvo” de receptores. Modificado de Chaouch e Mari (2006). (b) Representação da geometria ortogonal nos domínios do dispositivo e do lanço cruzado, mostrando as principais definições dos afastamentos. Modificado de Vermeer (2003).

permitindo a criação de uma base mista. Como o número de linhas de registro roladas é uma variável fixa, assumindo valor único e unitário, não há necessidade de incluí-la no processo de inversão.

Com os valores máximos, mínimos e as resoluções definidas na Tabela 3.3 para a base mista ($C_x, C_i, \text{Salvo}_T, \text{IPT}, \text{Salvo}_R, \text{IE}$) teremos um total aproximado de 33×10^6 possibilidades de geometrias (N_p) a serem testadas. O número de possibilidades para cada base é dado por (12, 17, 13, 31, 13, 31). Sendo assim, com cada valor atribuído para a base mista pode-se simular o conjunto de parâmetros definidos na Tabela 3.3 assim como os valores alvos.

A natureza do problema de inversão de geometrias de aquisição sísmica é tal que definir uma função objetivo do tipo agregação linear é bastante adequada. Neste trabalho, essa função será especificada como um medida de desempenho computada para cada modelo testado ($m_{j < N}$) através de uma soma ponderada normalizada. Dados M valores alvos e fixos (P_1, P_2, \dots, P_M), o valor do desempenho de cada modelo m_j com valores calculados (p_1, p_2, \dots, p_M) é dado por:

$$fit(m_j) = \sum_{i=1}^M w_i f(p_i), \quad (3.2)$$

onde:

- $f(p_i) = 1 - 2 \times \frac{(p_i - P_i)^2}{(p_i - P_i)^2 + (p_i + P_i)^2}$, $0 \leq f(p_i) \leq 1$, e
- w_i é uma função peso que define o grau de importância e sensibilidade de cada valor p_i para cada geometria m_j .

O método foi testado tendo como base uma geometria de referência ortogonal com uma linha de rolagem, considerando uma área em que se deseja mapear dois objetivos: um principal, e mais raso, a 1100 m e um secundário, e mais profundo a 3250 m. A Tabela 3.4 mostra a geometria de referência, que foi utilizada para estimar os parâmetros alvos a serem utilizados como entradas da função objetivo, quais sejam: número total de canais (NC_{3D}), máximo afastamento ($X_{\max_{3D}}$), máximo mínimo afastamento ($X_{\max_{\min}}$), coberturas médias nos alvos raso (C_{raso}) e profundo (C_{prof}) e razões de aspecto da macrocela (RA_b) e do 3D (RA_{3D}). Foi usado um fator de silenciamento de 15% para cálculos de coberturas médias e definições de afastamentos. A Tabela 3.5 mostra os valores alvos utilizados no processo de inversão. Esses valores foram definidos através das Figuras 3.3(a) a 3.3(f). Na simulação não há diferença de pesos entre cada um deles e por melhor prática, fez-se $\text{IPT} = \text{IE}$ e $\text{NLRR} = 1$. Com a nova base (12, 17, 13, 1, 13, 31) temos um total aproximado de 10^6 geometrias possíveis. O tempo de execução foi de 32s em uma Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2687W 0 @ 3.10 GHz, 128 GHz de RAM.

| Parâmetros 3D Ortogonal | | |
|--|---|--|
| Parâmetros Geradores | Definição | |
| IE (m) | Intervalo entre estações | |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro | |
| ILR (m) | Intervalo entre linhas de registro | |
| ILT (m) | Intervalo entre linhas de tiro | |
| NC _{LR} | Número de canais ativos/LR | |
| NLR | Número de linhas de registro | |
| NLRR | Número de linhas roladas | |
| Parâmetros Derivados | Definição | Formulação |
| Salvo _T | Salvo de Tiros | ILR/IPT |
| Salvo _R | "Salvo" de Receptores | ILT/IE |
| Cela _i | Dimensão inline da cela | IE/2 |
| Cela _x | Dimensão crossline da cela | IPT/2 |
| C _i | Cobertura in-line | (NC _{LR} · IE)/(2 · ILT) |
| C _x | Cobertura cross-line | (NLR · IPT)/(2 · ILR) · (Salvo _T /NLRR) |
| C _{3D} | Cobertura total | C _i · C _x |
| Xmax _i (m) | Máximo afastamento in-line | ILT · C _i |
| Xmax _c (m) | Máximo afastamento cross-line | ILR · C _x |
| Xmax _{3D} (m) | Máximo afastamento | $\sqrt{Xmax_i^2 + Xmax_c^2}$ |
| Xmax _{min} (m) | Máximo mínimo afastamento | $\sqrt{(ILT - IE/2)^2 + (ILR - IPT/2)^2}$ |
| Xmin _{max} (m) | Mínimo máximo afastamento | $\sqrt{(Xmax_i - ILT)^2 + (Xmax_c - ILR)^2}$ |
| RA _c | Razão de aspecto da cela | IPT/IE |
| RA _b | Razão de aspecto do Box | ILR/ILT |
| RA _{3D} | Razão de aspecto do 3D | Xmax _c /Xmax _i |
| D _{tiro} (/km ²) | Densidade de tiros (/km ²) | 10 ⁶ /(IPT · ILT) |
| D _{rec} (/km ²) | Densidade de receptores (/km ²) | 10 ⁶ /(IE · ILR) |
| D _{traço} (/km ²) | Densidade de traços (/km ²) | (10 ⁶ · Cela _i · Cela _x)/C _{3D} |

Tabela 3.2: Parâmetros da geometria 3D ortogonal e parâmetros derivados importantes.

| Parâmetros 3D Ortogonal - Representação Base Mista | | |
|--|---|--|
| Parâmetros Geradores | Definição | Faixa típica |
| IE (m) | Intervalo entre estações | [20, 21, 22, ..., 49, 50] |
| Salvo _R | Salvo de Receptores | [3, 4, 5, ..., 13, 14, 15] |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro | [20, 21, 22, ..., 49, 50] |
| Salvo _T | Salvo de Tiros | [3, 4, 5, ..., 13, 14, 15] |
| C _i | Cobertura in-line | [4, 5, 6, ..., 18, 19, 20] |
| C _x | Cobertura cross-line | [4, 5, 6, ..., 13, 14, 15] |
| NLRR | Número de linhas roladas | 1 |
| Parâmetros Derivados | Definição | Formulação |
| ILR (m) | Intervalo entre linhas de registro | Salvo _T × IPT |
| ILT (m) | Intervalo entre linhas de tiros | Salvo _R × IE |
| NC _{LR} | Número de canais ativos/LR | 2 × Salvo _R × C _i |
| NLR | Número de linhas de registro | 2 × C _x |
| Cela _i | Dimensão inline da cela | IE/2 |
| Cela _x | Dimensão crossline da cela | IPT/2 |
| C _{3D} | Cobertura total | C _i · C _x |
| Xmax _i (m) | Máximo afastamento in-line | ILT · C _i |
| Xmax _c (m) | Máximo afastamento cross-line | ILR · C _x |
| Xmax _{3D} (m) | Máximo afastamento | $\sqrt{Xmax_i^2 + Xmax_c^2}$ |
| Xmax _{min} (m) | Máximo mínimo afastamento | $\sqrt{(ILT - IE/2)^2 + (ILR - IPT/2)^2}$ |
| Xmin _{max} (m) | Mínimo máximo afastamento | $\sqrt{(Xmax_i - ILT)^2 + (Xmax_c - ILR)^2}$ |
| RA _c | Razão de aspecto da cela | IPT/IE |
| RA _b | Razão de aspecto do Box | ILR/ILT |
| RA _{3D} | Razão de aspecto do 3D | Xmax _c /Xmax _i |
| D _{tiro} | Densidade de tiros (/km ²) | 10 ⁶ /(IPT · ILT) |
| D _{rec} | Densidade de receptores (/km ²) | 10 ⁶ /(IE · ILR) |
| D _{traço} | Densidade de traços (/km ²) | (10 ⁶ · Cela _i · Cela _x)/C _{3D} |

Tabela 3.3: Parâmetros da geometria 3D ortogonal reparametrizada para uso na inversão Base Mista e parâmetros derivados importantes. Todos os parâmetros geradores são independentes, inteiros e têm resolução unitária de pesquisa.

| Geometria de referência | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Parâmetros mínimos | | Valor |
| IE (m) | Intervalo entre estações | 25 |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro | 25 |
| $ILLR$ (m) | Intervalo entre linhas de registro | 300 |
| $ILLT$ (m) | Intervalo entre linhas de tiro | 300 |
| NC_{LR} | Número de canais ativos/LR | 240 |
| NLR | Número de linhas de registro | 20 |
| NC_{3D} | Número de canais do dispositivo | 4800 |

Tabela 3.4: Parâmetros da geometria de referência.

| Definição dos valores alvo da função objetivo | | |
|--|--------------|--------------------------------|
| Parâmetro (P_i) | Valor | Peso (w_i) |
| NC_{3D} | 4800 | (100/7)% |
| C_{raso} | 14 | (100/7)% |
| C_{prof} | 100 | (100/7)% |
| $X_{\max_{\min}}$ (m) | 400 | (100/7)% |
| $X_{\max_{3D}}$ (m) | 4200 | (100/7)% |
| RA_b | 1.0 | (100/7)% |
| RA_{3D} | 1.0 | (100/7)% |

Tabela 3.5: Parâmetros P_i usados como valores alvo para a função objetivo, definidos através da geometria de referência, Figuras 3.3(a) a 3.3(f).

3.2.1 Exemplos Numéricos

Todas as geometrias foram testadas utilizando o esquema de base mista desenvolvido anteriormente, (Algoritmo 1, abaixo), em que cada uma delas é descrita por um número natural N ($0 \leq N < N_p$), convertido a base mista (12, 17, 13, 1, 13, 31). Além dos valores alvos P_i

Algorithm 1 Algoritmo de Inversão Base Mista B_M

Ler: $[IE, Salvo_R, IPT, Salvo_T, C_i, C_x]_{Max}$ ▷ parâmetros and resoluções

Ler: $[IE, Salvo_R, IPT, Salvo_T, C_i, C_x]_{Min}$

Ler: $[IE, Salvo_R, IPT, Salvo_T, C_i, C_x]_{Res}$

Calcular: N_p : Número total de geometrias possíveis

- 1: **for** $N < N_p$ **do**
 - 2: Converte N na base mista $B_M \rightarrow N_{B_M}$
 - 3: Gera o conjunto de parâmetros naturais da geometria N , indexada na base mista B_M, N_{B_M}
 - 4: Gera o conjunto de parâmetros derivados da geometria
 - 5: Aplica as restrições estabelecidas $N \rightarrow N_S$
 - 6: Calcula o desempenho da geometria selecionada N_S
 - 7: Seleciona a geometria por grau decrescente de desempenho : $(N_S, fit(N_S))$
 - 8: Converte N_S no conjunto de parâmetros via base mista B_M
 - 9: Escreve os melhores resultados $I = (1, 2, \dots, N_S)$ ▷ melhor conjunto de geometrias
 - 10: **end for**
-

definidos para a função objetivo, que determina o desempenho de cada elemento testado, as soluções foram submetidas a um teste de validade, só sendo aceitas aquelas que atendessem as seguintes restrições geofísicas e operacionais:

- Número máximo de 6000 canais disponíveis: $NC_{3D} \leq 6000$,
- O máximo mínimo afastamento da geometria de referência é ≈ 400 m: $X_{max_{min}} \leq 500$ m;

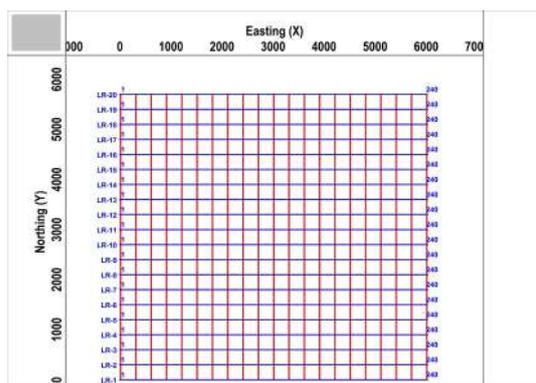
- O mínimo máximo afastamento não deve ser menor que 3700 m, para que o alvo profundo seja contemplado no processamento sísmico, com 15% de fator de estiramento;
- Para termos uma aquisição com riqueza azimutal e para controlar a esparsidade da macrocela, respectivamente, foram usadas as relações: $1/2 \leq AR_{3D} \leq 2$ e $2/3 \leq AR_b \leq 3/2$, e
- Para imagear abaixo do objetivo principal mais profundo, o máximo afastamento não deve ser menor que 4000 m: $X_{max_{3D}} \geq 4000$ m.

A Figura 3.4(a) mostra o desempenho de todas as geometrias selecionadas, com o valor da geometria de referência em destaque para comparação. Dessas, o desempenho das 1000 melhores geometrias estão sendo mostradas na Figura 3.4(b), onde se pode ver com mais clareza que a geometria de referência foi aquela que apresentou o melhor desempenho. As Figuras 3.4(c) a 3.4(r) mostram como cada parâmetro da geometria e cada valor alvo da função objetivo varia em torno do valor da geometria de referência e em função de sua posição I de melhor desempenho. De um total aproximado de 10^6 geometrias testadas, um total 26 057 satisfizeram os critérios de restrição aplicados. A análise dos gráficos nos permite ver que, a medida que o desempenho cai, aumenta o espalhamento ao redor dos valores de referência. Além disso, é possível ainda analisar para cada geometria, I fixo, o comportamento de seus parâmetros naturais e derivados. Qualquer subconjunto que se deseje é facilmente selecionável, permitindo analisar as diversas geometrias e suas características.

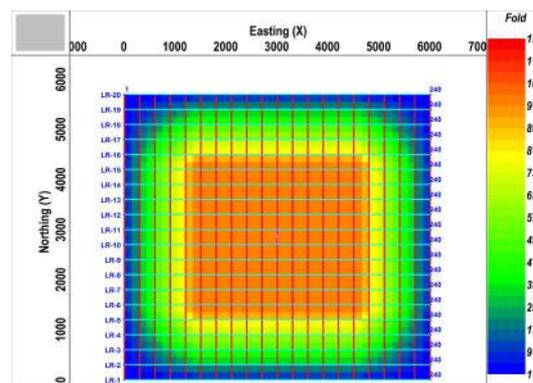
Os 10 melhores desenhos estão sumarizados na Tabela 3.6, e pode-se diretamente realizar tantas análises comparativas quanto necessário: caso se deseje maior amostragem espacial, a solução 2 é mais adequada, usando 20 canais a mais por linha de registro. As soluções 6 e 7 têm mesmo desempenho, mas diferem na simetria do dispositivo de registro, um item de importância quando se deve analisar que direção deve ser melhor iluminada. Em resumo, pode-se analisar o desenho de maior desempenho em comparação com todos os desenhos alternativos e decidir, com base nos requisitos disponíveis, qual a solução que representa o melhor compromisso.

Do ponto de vista prático, não só mais valores alvos como mais itens de restrição estão disponíveis, o que reduziria a quantidade de geometrias finais válidas. Além disso o algoritmo permite a flexibilidade de incorporar na função objetivo como valor alvo e nos critérios de restrição aspectos que não foram contemplados e que são igualmente importantes para a definição das melhores geometrias, quais sejam os elementos associados a eficiência operacional

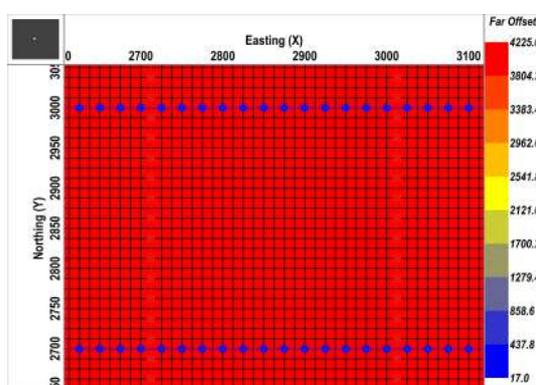
(e até financeira) de uma campanha de aquisição sísmica, sem interferência significativa no custo computacional associado. São essas questões que teremos oportunidade de verificar na próxima seção, onde aplicaremos o algoritmo base mista para inversão dos parâmetros de aquisição do 3D FAV/RI/RBU.



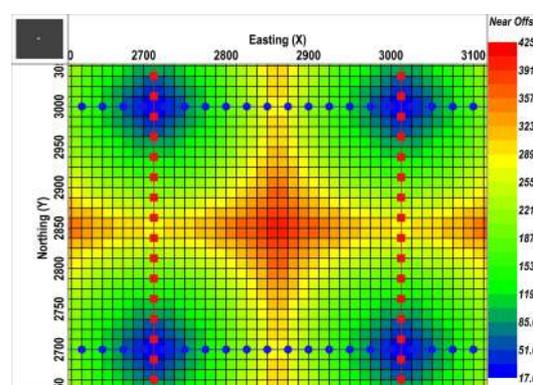
(a)



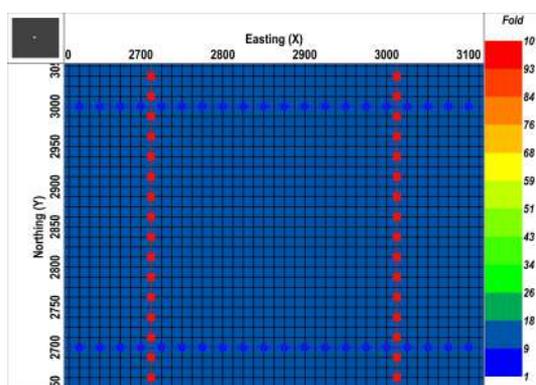
(b)



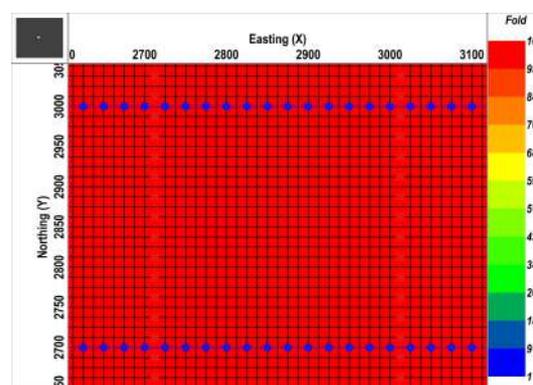
(c)



(d)

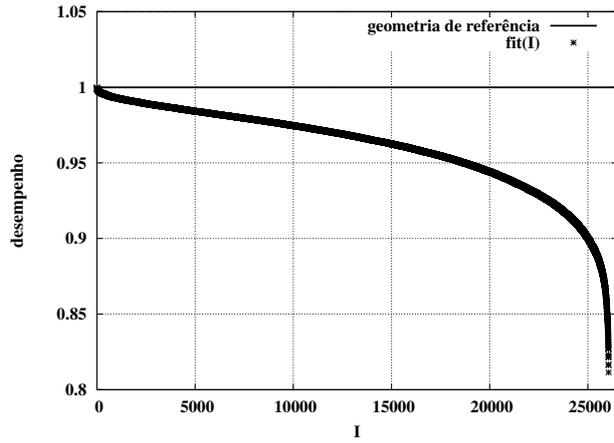


(e)

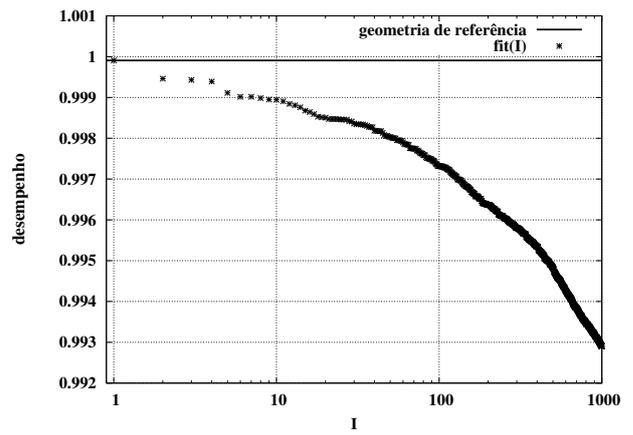


(f)

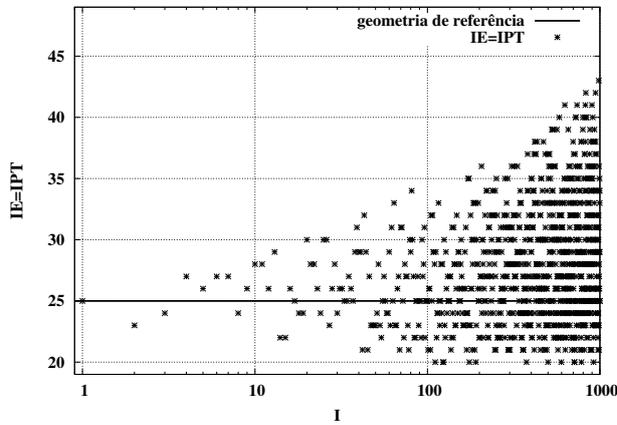
Figura 3.3: Valores de referência e valores usados como alvos da função objetivo: (a) Número total de 4800 canais ativos. (b) Cobertura total (C_{3D}) igual a 100. (c) Afastamento máximo ($X_{\max_{3D}}$) de ≈ 4200 m. (d) Máximo mínimo afastamento ($X_{\max_{\min}}$) de ≈ 400 m. (e) Cobertura média no alvo raso a 1100 m (C_{raso}) igual a 14. (f) Cobertura média no alvo profundo a 3250 m (C_{prof}) igual a 100. Fator de silenciamento de 15%.



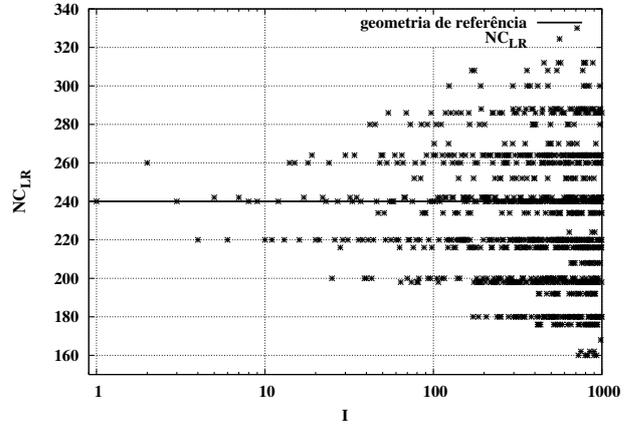
(a)



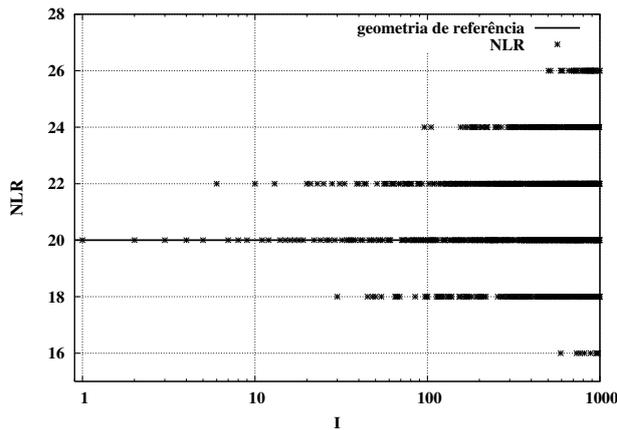
(b)



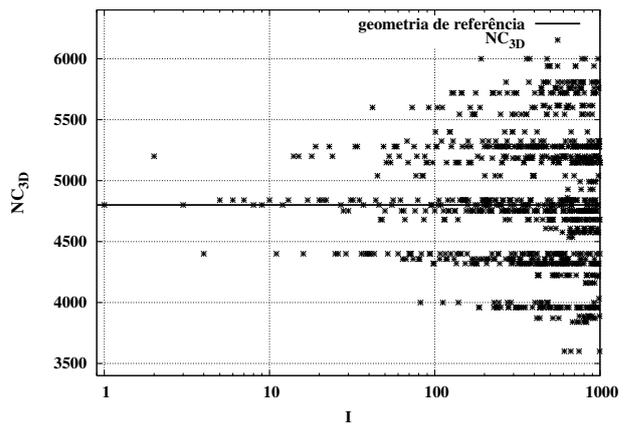
(c)



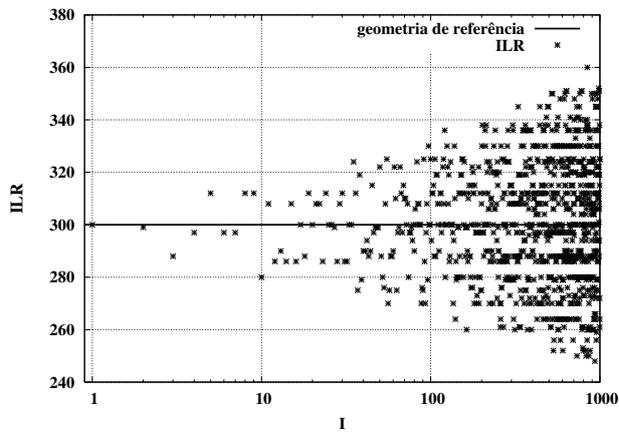
(d)



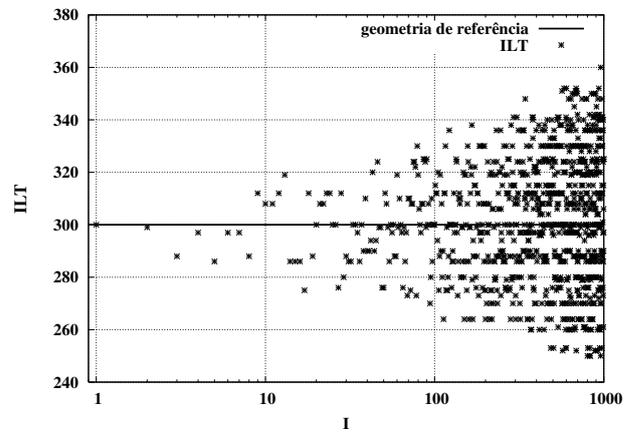
(e)



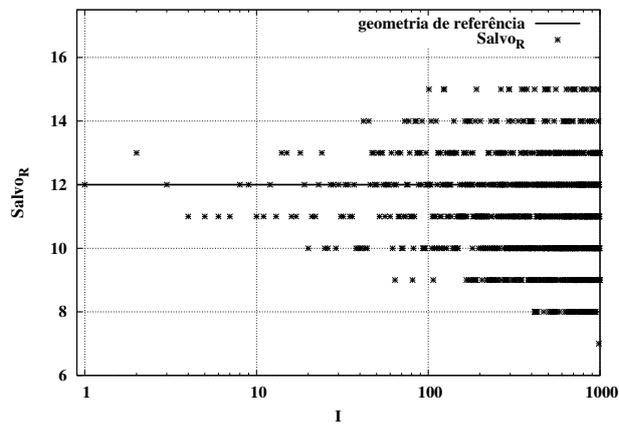
(f)



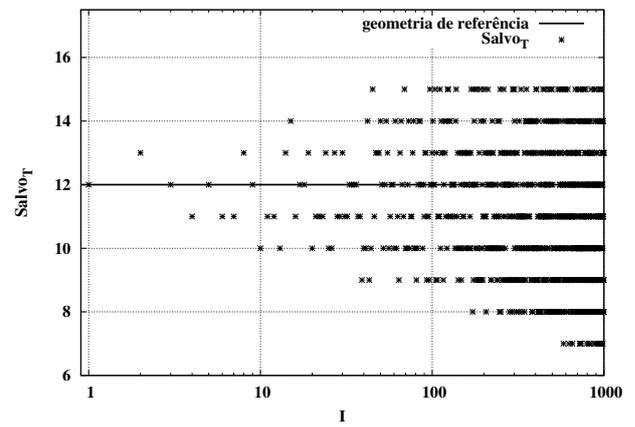
(g)



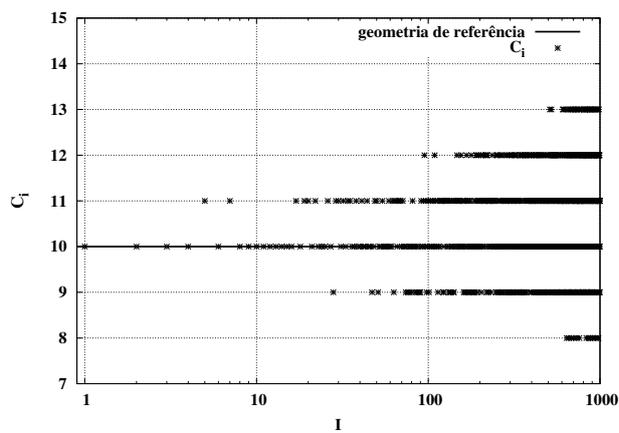
(h)



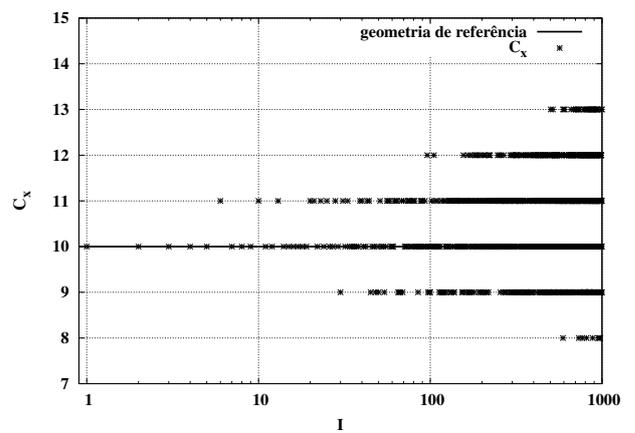
(i)



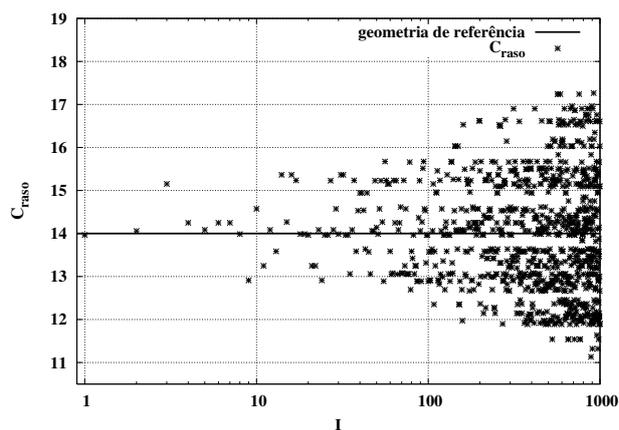
(j)



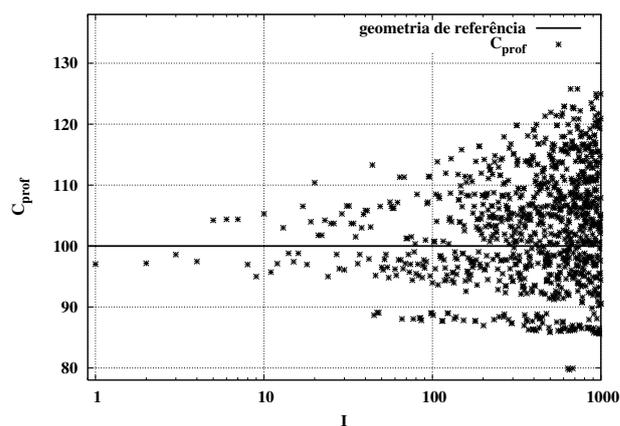
(k)



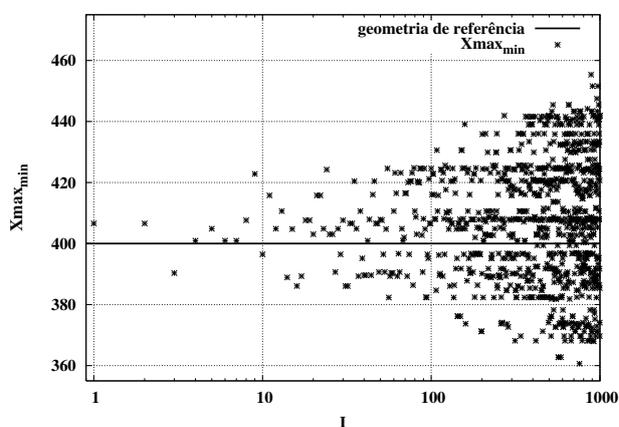
(l)



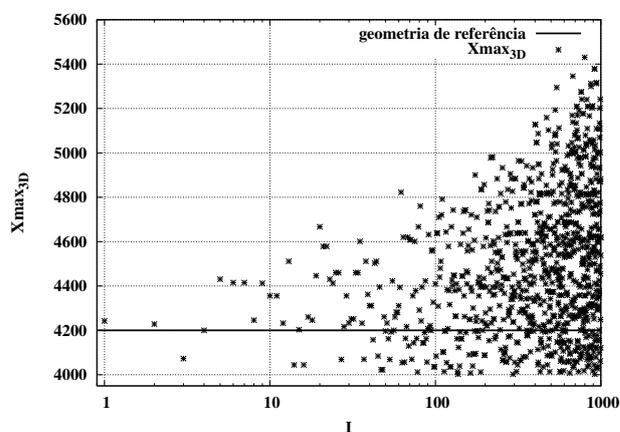
(m)



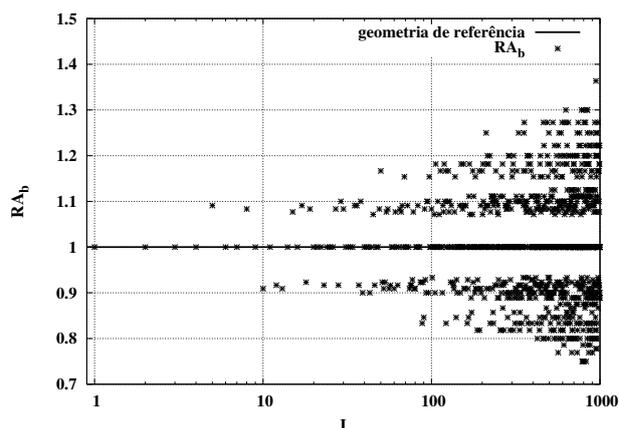
(n)



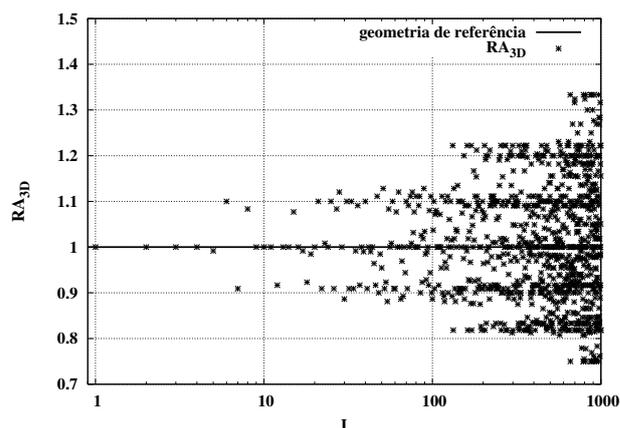
(o)



(p)



(q)



(r)

Figura 3.4: Resultados da inversão base mista das melhores geometrias. (a) Desempenho de todas as geometrias selecionadas em ordem decrescente. (b) Desempenho das 1000 melhores geometrias, em ordem decrescente. (c-n) Evolução dos parâmetros da geometria e dos valores alvos para as 1000 melhores geometrias. Para cada uma delas, o valor de referência está representado na figura.

| 10 melhores geometrias ortogonais invertidas | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Parâmetros | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| IE (m) | 25 | 23 | 24 | 27 | 26 | 27 | 27 | 24 | 26 | 28 |
| IPT (m) | 25 | 23 | 24 | 27 | 26 | 27 | 27 | 24 | 26 | 28 |
| ILR (m) | 300 | 299 | 288 | 297 | 312 | 297 | 297 | 312 | 312 | 280 |
| ILT (m) | 300 | 299 | 288 | 297 | 286 | 297 | 297 | 288 | 312 | 308 |
| NC _{LR} (m) | 240 | 260 | 240 | 220 | 242 | 220 | 242 | 240 | 240 | 220 |
| NLR (m) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 22 | 20 | 20 | 20 | 22 |
| NC _{3D} (m) | 4800 | 5200 | 4800 | 4400 | 4840 | 4840 | 4840 | 4800 | 4800 | 4840 |
| C _{raso} | 13.96 | 14.06 | 15.15 | 14.25 | 14.08 | 14.25 | 14.25 | 13.99 | 12.91 | 14.57 |
| C _{prof} | 97.02 | 97.17 | 98.60 | 97.46 | 104.22 | 104.38 | 104.38 | 96.96 | 94.99 | 105.28 |
| X _{max} _{min} | 406.59 | 406.59 | 390.32 | 400.93 | 404.88 | 400.93 | 400.93 | 407.65 | 422.85 | 396.47 |
| X _{max} _{3D} | 4242.64 | 4228.50 | 4072.94 | 4200.21 | 4430.77 | 4415.22 | 4415.22 | 4246.03 | 4412.35 | 4355.78 |
| RA _b | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.09 | 1.00 | 1.00 | 1.08 | 1.00 | 0.91 |
| RA _{3D} | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.10 | 0.91 | 1.08 | 1.00 | 1.00 |
| Salvo _R (m) | 12 | 13 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 11 |
| Salvo _T (m) | 12 | 13 | 12 | 11 | 12 | 11 | 11 | 13 | 12 | 10 |
| C _i (m) | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 |
| C _x (m) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| C _{3D} (m) | 100 | 100 | 100 | 100 | 110 | 110 | 110 | 100 | 100 | 110 |
| X _{max} _i (m) | 3000 | 2990 | 2880 | 2970 | 3146 | 2970 | 3267 | 2880 | 3120 | 3080 |
| X _{max} _c (m) | 3000 | 2990 | 2880 | 2970 | 3120 | 3267 | 2970 | 3120 | 3120 | 3080 |
| X _{min} _{max} (/km ²) | 3818.38 | 3805.65 | 3665.64 | 3780.19 | 4008.05 | 3995.73 | 3995.73 | 3821.43 | 3971.11 | 3940.05 |
| D _{tiro} (/km ²) | 133.33 | 145.41 | 144.68 | 124.70 | 134.48 | 124.70 | 124.70 | 144.68 | 123.27 | 115.96 |
| D _{rec} (/km ²) | 133.33 | 145.41 | 144.68 | 124.70 | 123.27 | 124.70 | 124.70 | 133.55 | 123.27 | 127.55 |
| D _{traço} (/km ²) | 640 000 | 756 144 | 694 444 | 548 697 | 650 888 | 603 567 | 603 567 | 694 444 | 591 716 | 561 225 |
| N _S (m) | 569 723 | 570 155 | 569 722 | 569 291 | 574 932 | 658 354 | 574 530 | 570 125 | 569 724 | 657 952 |
| Desempenho | 0.999 908 | 0.999 461 | 0.999 430 | 0.999 391 | 0.999 112 | 0.999 017 | 0.999 017 | 0.998 985 | 0.998 951 | 0.998 944 |

Tabela 3.6: 10 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S) e desempenho.

3.3 Aplicação no 3D FAV/RI/RBU

No Capítulo 2, a Figura 2.9 mostra o polígono delimitador do programa sísmico 3D. Para melhor compreensão das escolhas que serão tomadas sobre os objetivos geológico geofísicos e critérios de restrição nesta etapa da aplicação do algoritmo de inversão base mista, algumas características devem ser apontadas:

- Os campos abrangidos pelo levantamento possuem características geológicas distintas, de sorte que demandam cada um seu próprio conjunto de requisitos geofísicos e operacionais;
- Podemos dividir por profundidade de interesse, dois zoneamentos: o mais raso, associado ao campo de Fazenda Alvorada e o mais profundo que engloba os campos de Rio Itariri e Rio do Bu. Isso implica que individualmente essas zonas necessitam foco

em afastamentos distintos. Se na primeira, a parte mais rasa da seção é um fator crítico de interesse, na última deve-se priorizar também a parte mais profunda da seção, para contemplar o objetivo principal mais profundo de interesse e, se possível, o embasamento;

- Para que tenhamos área de cobertura completa nos campos, faz-se necessário o alongamento do levantamento na direção da linha de receptor. A implicação direta é que o 3D tem uma dimensão in-line significativa criando uma restrição séria ao espalhamento de material sísmográfico, por necessitar de bastantes canais.

Nas próximas seções, tornar-se-á claro como cada item apresentado impactará o desenho de aquisição.

3.3.1 Seções Sísmicas e Pontos de Iluminação

As Figuras 3.6(a) a 3.8(b) mostram seções sísmicas em profundidade passando pelos pontos de iluminação nos campos de FAV, RI e RBU, respectivamente, e ilustram o contexto geológico na região escolhida para realizar o experimento sísmico de desenho de aquisição via iluminação orientada ao alvo. Como já foi visto, a profundidade de interesse das zonas produtoras nos campos é bastante variável, de sorte que foi necessário definir dois horizontes que representassem, ao mesmo tempo, o topo e a base médios dos alvos principais.

O segundo e terceiro horizontes mostrados nas figuras (em amarelo e vermelho) representam essa faixa média de interesse, constituindo dois pontos de iluminação em profundidade para cada campo. O horizonte mais raso não é alvo de interesse, mas foi usado para mostrar o comportamento da matriz de energia com a profundidade e o mais profundo é o embasamento, que não constituiu alvo principal. Além de já estar impactado pela restrição de canais disponíveis, seu mapeamento foi considerado aceitável pelos intérpretes da área.

Os pontos de iluminação, portanto, foram definidos nas correspondências de topo e base dos horizontes principais nas regiões em superfície com grande concentração de poços produtores e nas porções mais profundas de cada campo. Garantindo a maior energia de iluminação no topo e base, deseja-se por consequência contemplar as zonas intermediárias. No FAV, esse ponto representativo corresponde a in-line 270 e cross-line 427. No RI, selecionou-se a in-line 260 e cross-line 258, e no RBU, selecionou-se a in-line 208 e cross-line 258. A Figura 3.5 mostra na área do levantamento as áreas de abrangência dos campos de FAV, RI e RBU, com a locação dos pontos em superfície e suas correspondentes in-line(IL) e cross-line (XL).

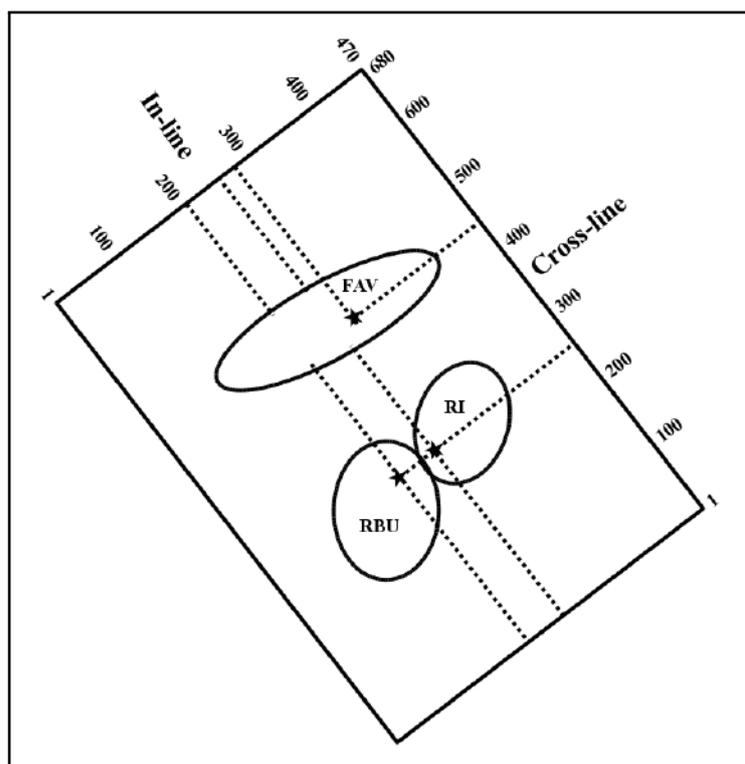


Figura 3.5: Definição dos pontos de iluminação (in-line,cross-line) em superfície para os campos de FAV (270,427), RI (260,258) e RBU (208,258).

3.3.2 Modelos de Velocidade

A informação de velocidade sísmica também é primordial na determinação dos parâmetros de aquisição, pois dela dependem as determinações dos intervalos entre elementos de recepção e das distribuições de afastamento.

Embora nessa trabalho tenha sido possível obter um campo de velocidades intervalares em profundidade, a depender do grau de estudo de uma área, isso não é possível. Ademais, as Equações (1.1) e (1.2) descritas no Capítulo 1 consideram a geologia com configuração plano paralela e velocidade constante acima do horizonte de interesse. É recomendável, portanto:

- Analisar o efeito do modelo de velocidade na determinação dos intervalos de recepção;
- Analisar como a distribuição da energia de iluminação na superfície é afetada pela grau de detalhe que se tem no modelo de velocidade, e
- Analisar como o modelo de velocidade e seu correspondente impacto na energia de iluminação afetam a escolha da melhor geometria no desenho via algoritmo de inversão base mista.

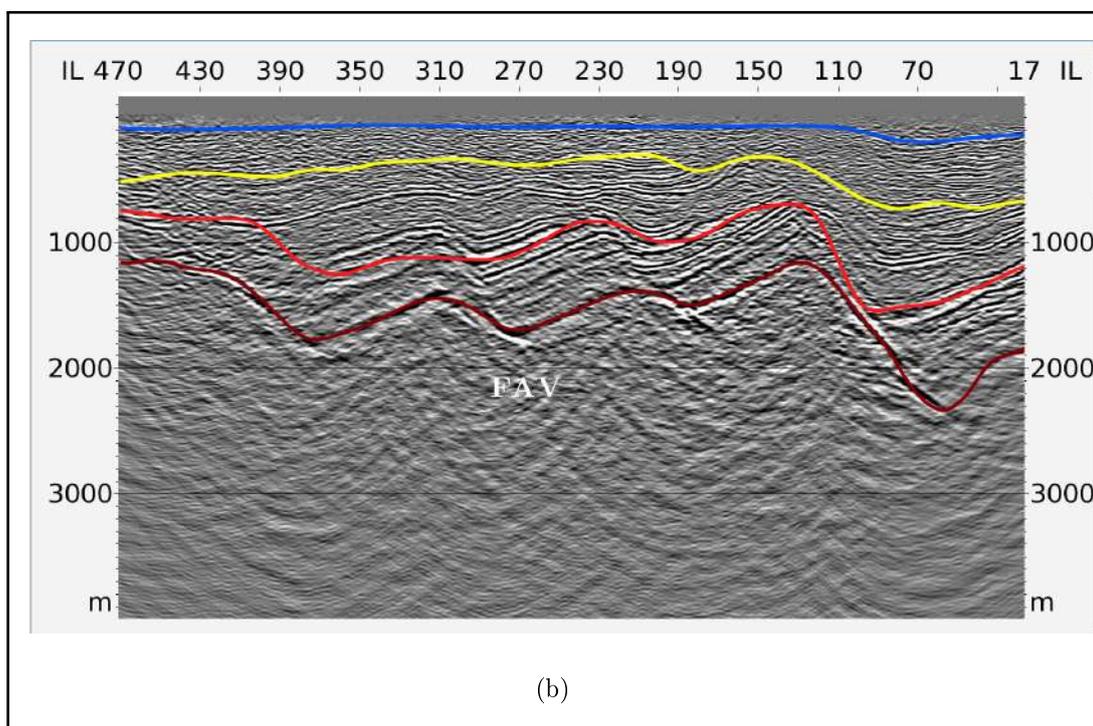
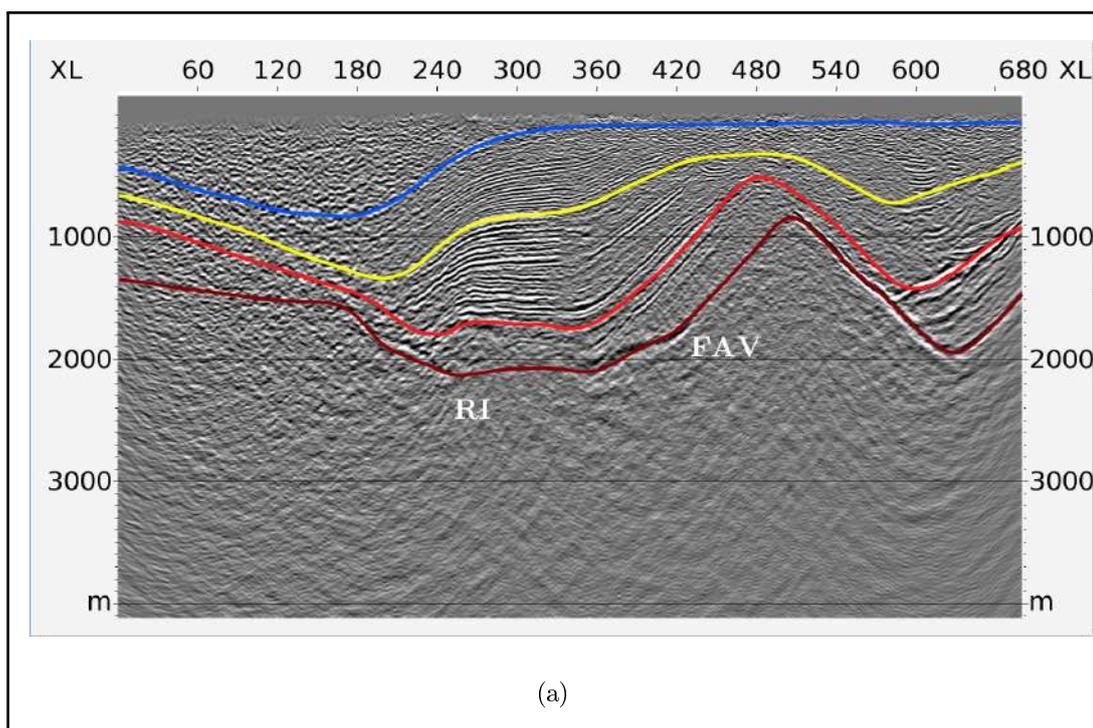


Figura 3.6: Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 270 (b) Cross-Line 427.

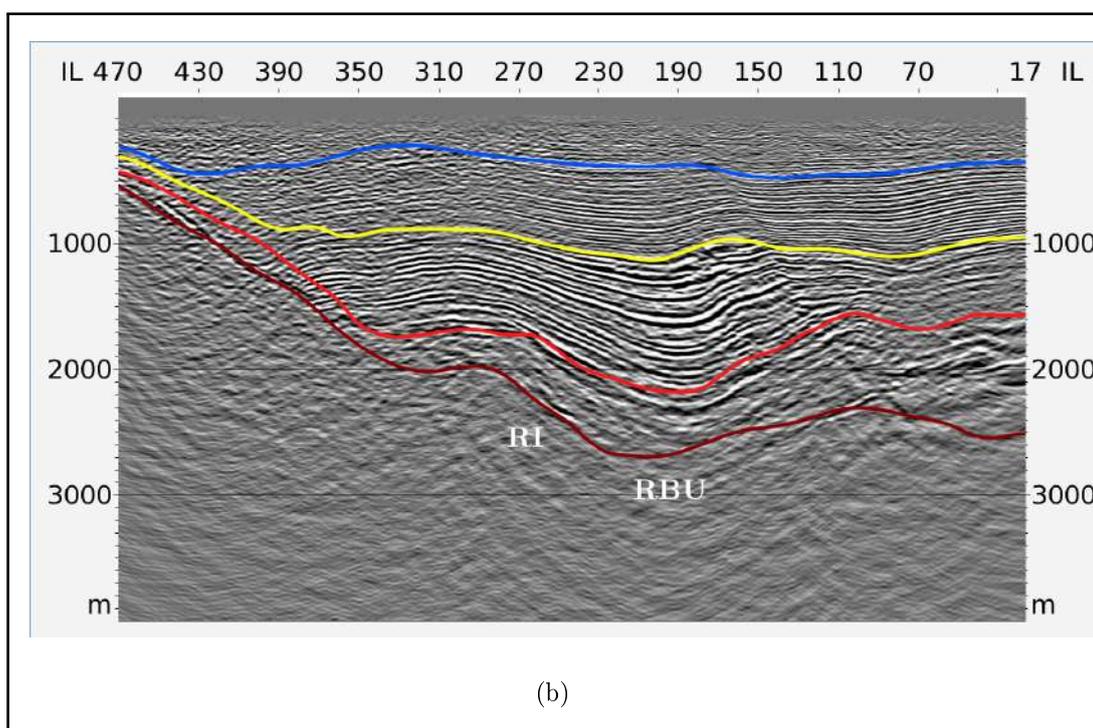
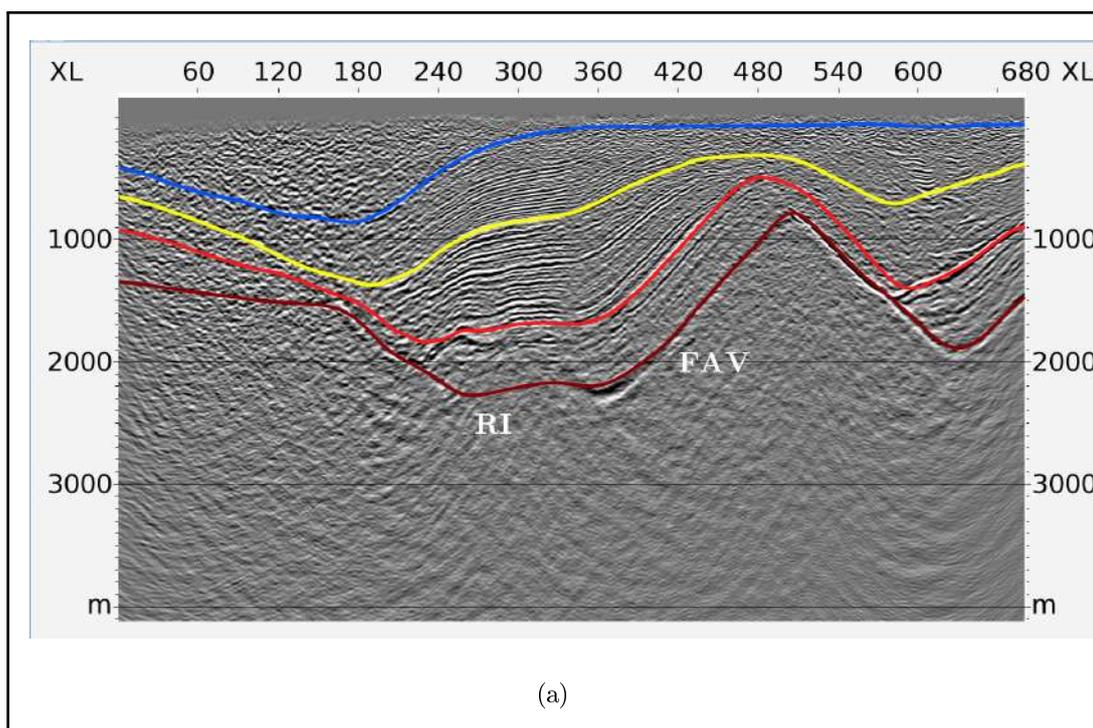


Figura 3.7: Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 260 (b) Cross-Line 258.

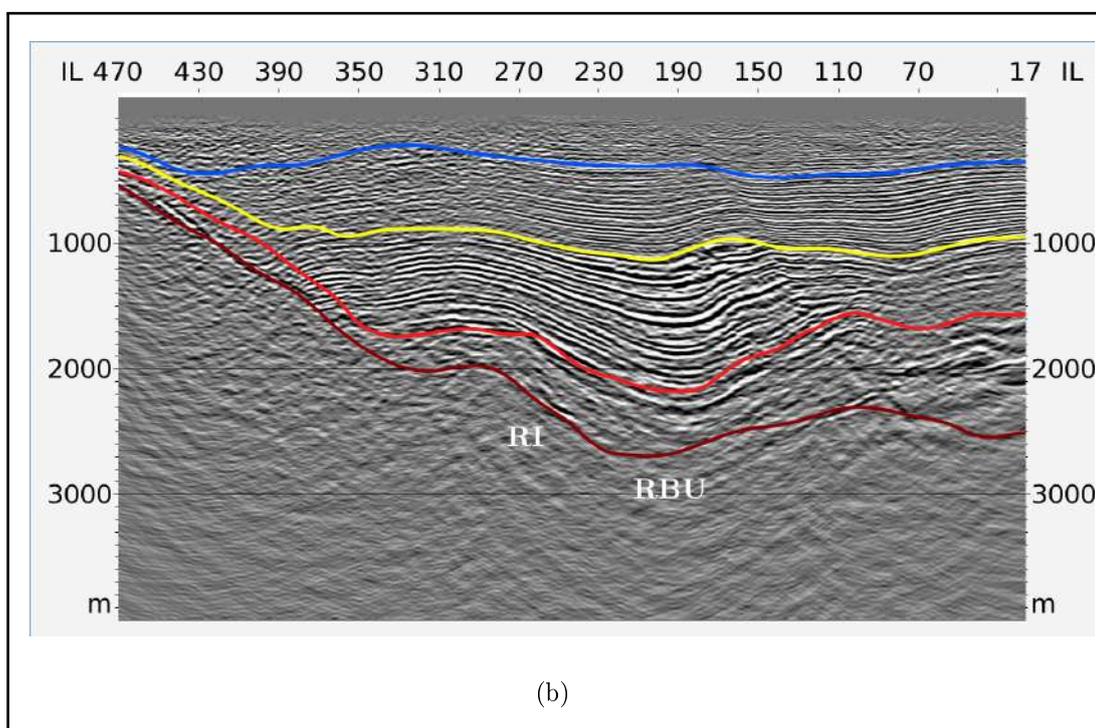
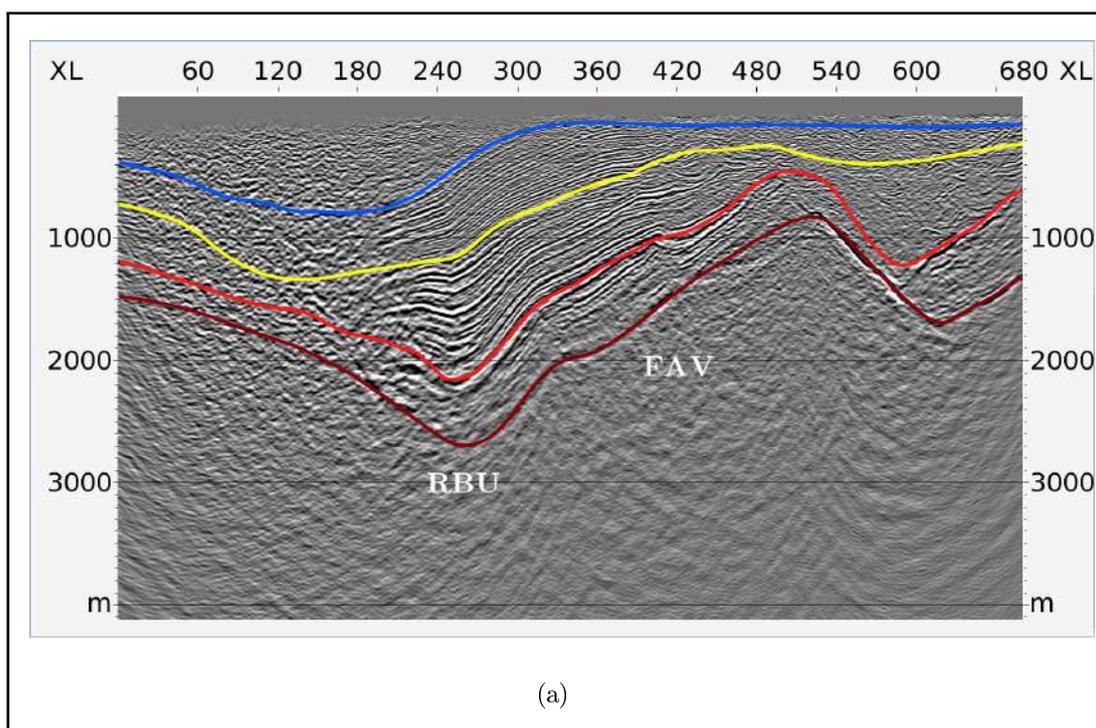


Figura 3.8: Seções sísmicas em profundidade representativas do 3D FAV/RI/RBI, mostrando os dois objetivos geológicos principais (em amarelo e vermelho), o horizonte raso de referência (azul) e o embasamento (mais profundo). (a) In-Line 208 (b) Cross-Line 258.

Para isso, três modelos de velocidades foram construídos respeitando os quatros horizontes mapeados e descritos nas Figuras 3.6(a) a 3.8(a). São eles:

- Modelo 1: Modelo de velocidade intervalar em profundidade. Contempla a heterogeneidade geológica e mostra as variações horizontais e verticais presentes nos campos;
- Modelo 2: Modelo de velocidade intervalar com variação linear em profundidade. Contempla o gradiente de velocidades entre o topo e base de cada horizonte interpretado no Modelo 1;
- Modelo 3: Modelo de velocidade intervalar constante entre horizontes. Contempla apenas as velocidades intervalares observadas acima de cada horizonte interpretado no Modelo 1.

A Figuras 3.9(a) a 3.11(c) mostram esse modelos de velocidade para os três pontos de iluminação, a saber:

- As Figuras 3.9(a), 3.10(a) e 3.11(a) mostram o modelo de velocidades constantes, Modelo 3, para os três pontos de iluminação;
- As Figuras 3.9(b), 3.10(b) e 3.11(b) mostram o modelo de velocidades linear, Modelo 2, para os três pontos de iluminação;
- As Figuras 3.9(c), 3.10(c) e 3.11(c) mostram o modelo de velocidades variando com profundidade, Modelo 1, para os três pontos de iluminação.

A Tabela 3.7 mostra as dimensões do modelo de velocidade, assim como para cada ponto de iluminação escolhido suas coordenadas e as dimensões associadas dos modelos locais de velocidade, usados no estudo de iluminação.

3.3.3 Mapas nos Horizontes

Como quatro horizontes foram mapeados, pode-se proceder o cálculo do intervalo entre estações, IE, diretamente em cada superfície do modelo com o uso da Equação (1.2). Para tanto, projetou-se nessas superfícies os valores dos campos de velocidade, e calculou-se os respectivos mapas de mergulho. O conteúdo de frequências máximas determinado no dado sísmico foi de 80 Hz.

| Dimensões do Modelo Global de Velocidade | | | |
|---|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| Dimensão | Número de pontos | Espaçamento | Dimensão total |
| In-line | 680 | $d_x = 20$ m | 13 600 m |
| Cross-line | 470 | $d_y = 20$ m | 9400 m |
| Z | 801 | $d_z = 5$ m | 4000 m |
| Dimensões dos Modelos Locais de Velocidade | | | |
| FAV: ponto central na In-line 270, Cross-line 427 | | | |
| Dimensão | Número de pontos | Espaçamento | Dimensão total |
| In-line | 384 | $d_x = 20$ m | 7680 m |
| Cross-line | 384 | $d_y = 20$ m | 7680 m |
| Z | 801 | $d_z = 5$ m | 4000 m |
| Topo: $(IL, XL, Z) = (270, 427, 76)$ Base: $(IL, XL, Z) = (270, 427, 217)$ | | | |
| RI: ponto central na In-line 260, Cross-line 258 | | | |
| Dimensão | Número de pontos | Espaçamento | Dimensão total |
| In-line | 416 | $d_x = 20$ m | 8320 m |
| Cross-line | 416 | $d_y = 20$ m | 8320 m |
| Z | 801 | $d_z = 5$ m | 4000 m |
| Topo: $(IL, XL, Z) = (260, 258, 199)$ Base: $(IL, XL, Z) = (260, 258, 350)$ | | | |
| RBU: ponto central na In-line 208, Cross-line 258 | | | |
| Dimensão | Número de pontos | Espaçamento | Dimensão total |
| In-line | 416 | $d_x = 20$ m | 8320 m |
| Cross-line | 416 | $d_x = 20$ m | 8320 m |
| Z | 801 | $d_x = 5$ m | 4000 m |
| Topo: $(IL, XL, Z) = (208, 258, 234)$ Base: $(IL, XL, Z) = (208, 258, 429)$ | | | |

Tabela 3.7: Dimensões do Modelo de Velocidade. O modelo global está inserido na grade do levantamento sísmico. Os modelos locais são fatias do global para uso no estudo de iluminação. Os valores centrais correspondem à projeção em superfície dos pontos sujeitos à iluminação em cada campo. Para cada campo, são dadas as coordenadas de topo e base da camada alvo, que definem os pontos de iluminação.

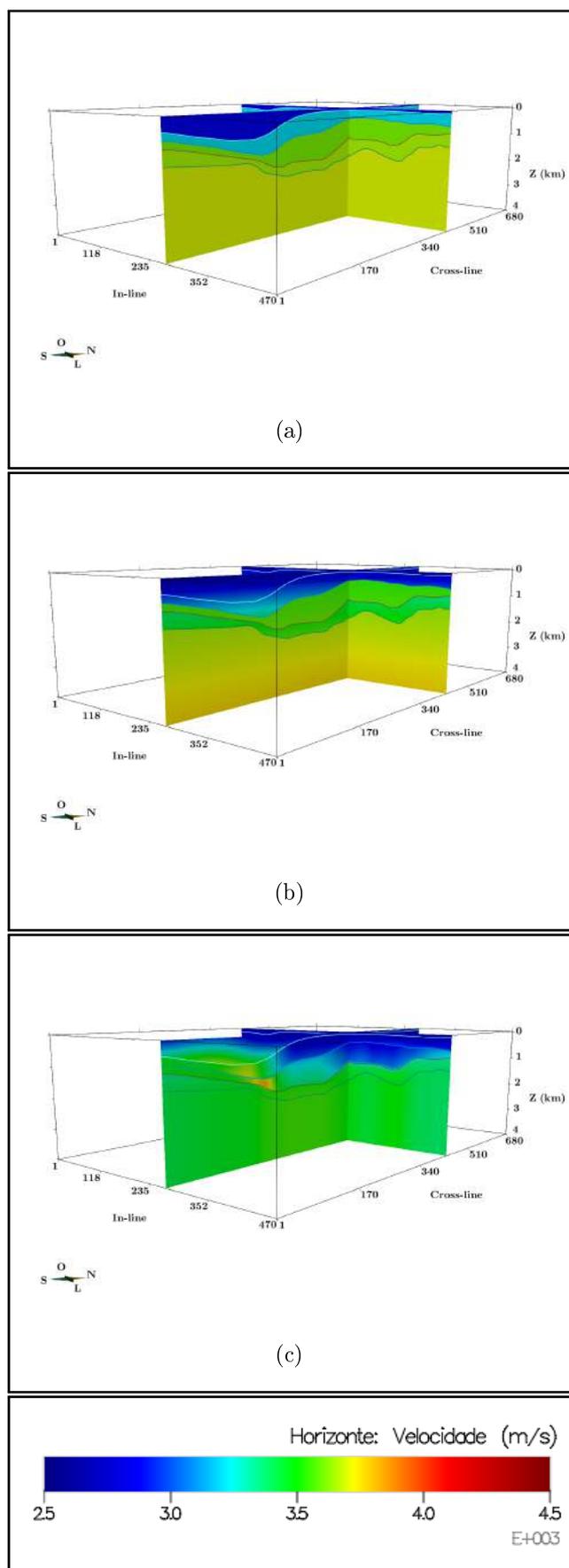


Figura 3.9: Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de FAV na IL 270 e XL 427. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade.

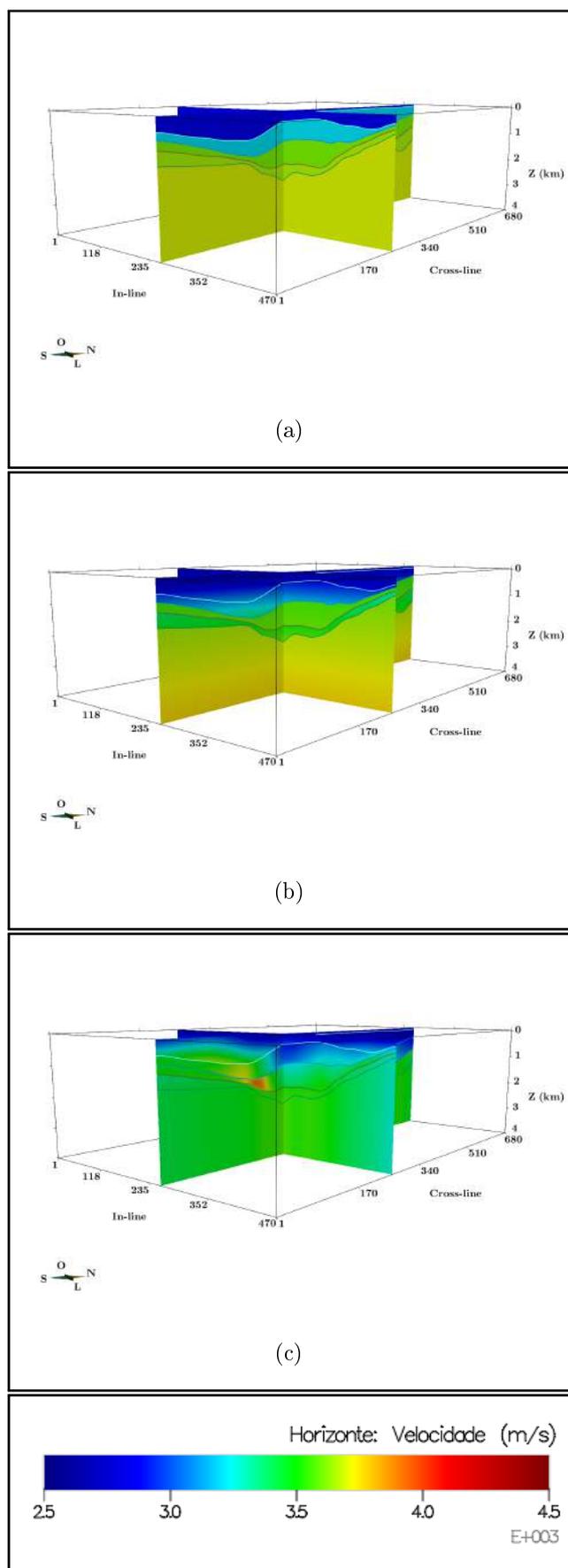


Figura 3.10: Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de RI na IL 260 e XL 258. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade.

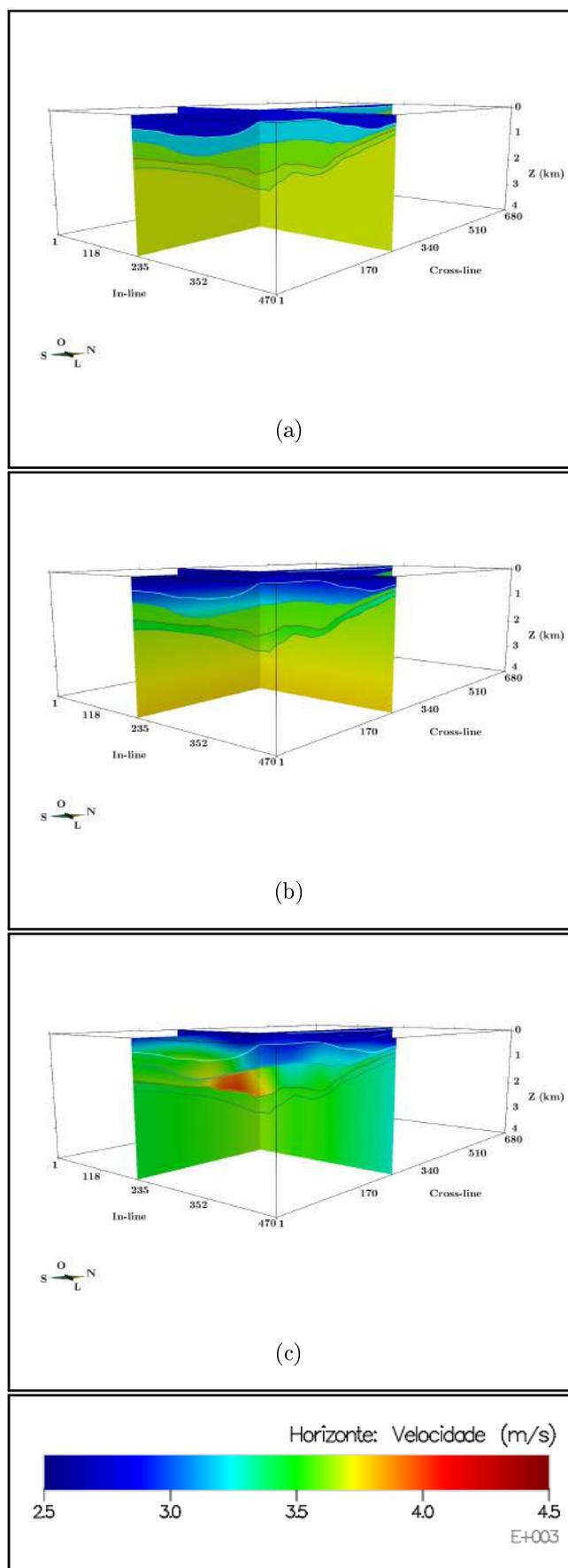


Figura 3.11: Modelos de velocidade do 3D FAV/RI/RBI mostrando os dois objetivos geológicos principais no campo de RBU na IL 208 e XL 258. (a) Velocidade é constante entre horizontes (b) Velocidade varia linearmente entre horizontes (c) Modelo de velocidades intervalar em profundidade.

Pode-se ver que:

- As Figuras 3.12(a) a 3.12(d) mostram o mapa de profundidade dos horizontes. Como havia sido apontado, as profundidades mínimas na região produtora do campo de FAV, que se vê a NW na Figura 3.12(b), está em torno de 300 m. Esse valor foi usado como valor alvo e como limite do máximo mínimo afastamento para inversão. Por outro lado, a Figura 3.12(c) mostra a porção mais profunda, correspondente a base do horizonte alvo no campo de RBU, em torno de 2200 m. Esse valor foi usado para definir os valores alvo e limite do mínimo máximo afastamento do levantamento;
- As Figuras 3.14(a) a 3.14(d) mostram o mapa de velocidade intervalar em profundidade dos horizontes. Mais uma vez, os menores valores na região do FAV condicionam os limites inferiores de IE;
- As Figuras 3.13(a) a 3.13(d) mostram o mapa de mergulho dos horizontes. Esses valores completam as variáveis necessárias para o cálculo de IE. Tomou-se o cuidado de, em cada ponto do modelo, definir o valor mínimo de 30° para garantir o colapso das difrações já que uma boa porção dos horizontes tem mergulhos abaixo desse valor. Esse valor foi usado para definir os valores alvo e limite do mínimo máximo afastamento do levantamento;
- As Figuras 3.15(a) a 3.15(d) mostram o mapa de dimensão linear da cela dos horizontes. Tomando as porções mais restritivas no FAV, os valores mínimos e máximos do intervalo de estações foi definido como 30 m e 40 m, respectivamente. Os campos de RI e RBU pelo critério estabelecido demandariam intervalos de estação de 40 m. Pontuando que a aquisição tem por finalidade o desenvolvimento de campos, deve-se ser mais criterioso quanto a esses valores;
- Caso usássemos a Equação (1.1) para a determinação do intervalo de estações, teríamos valores significativamente mais restritivos para os campos de RI e RBU, de sorte que 40 m é limite máximo, só sendo admitido por conta das possíveis restrição operacionais associadas a quantidade de material disponível.

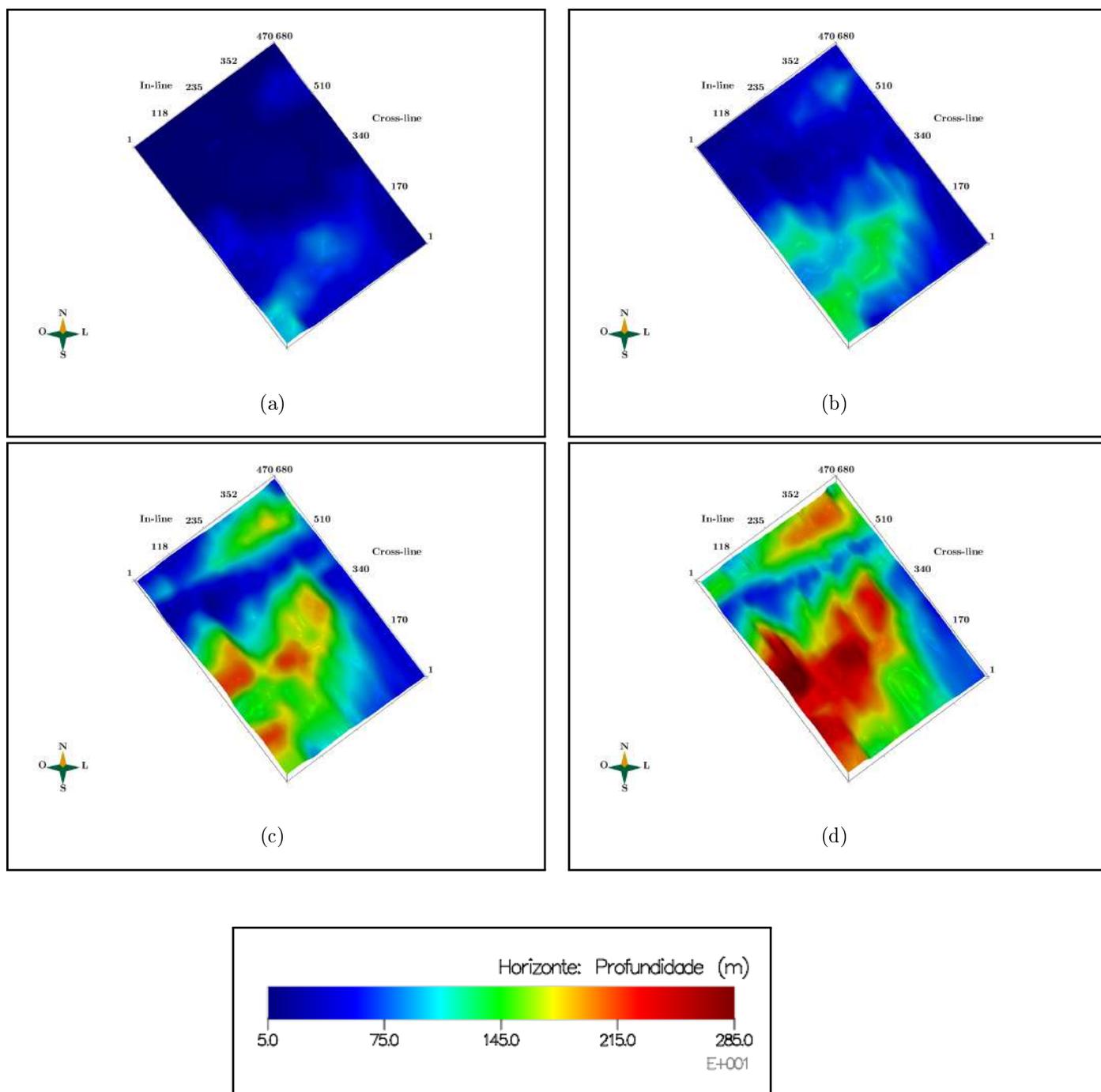


Figura 3.12: Mapa de profundidade dos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU.
 (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento.

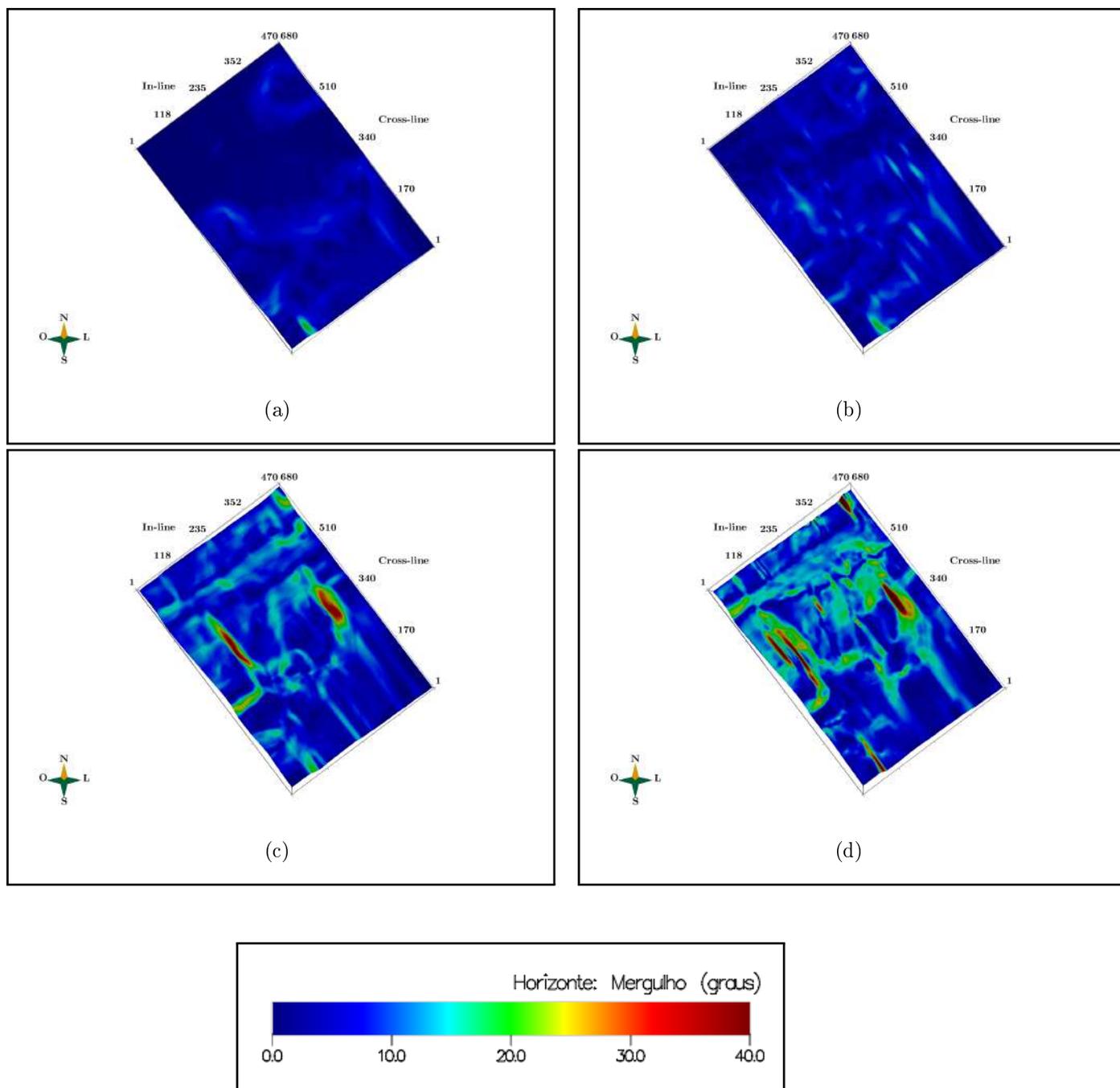


Figura 3.13: Mapa de mergulho dos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU.
 (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento.

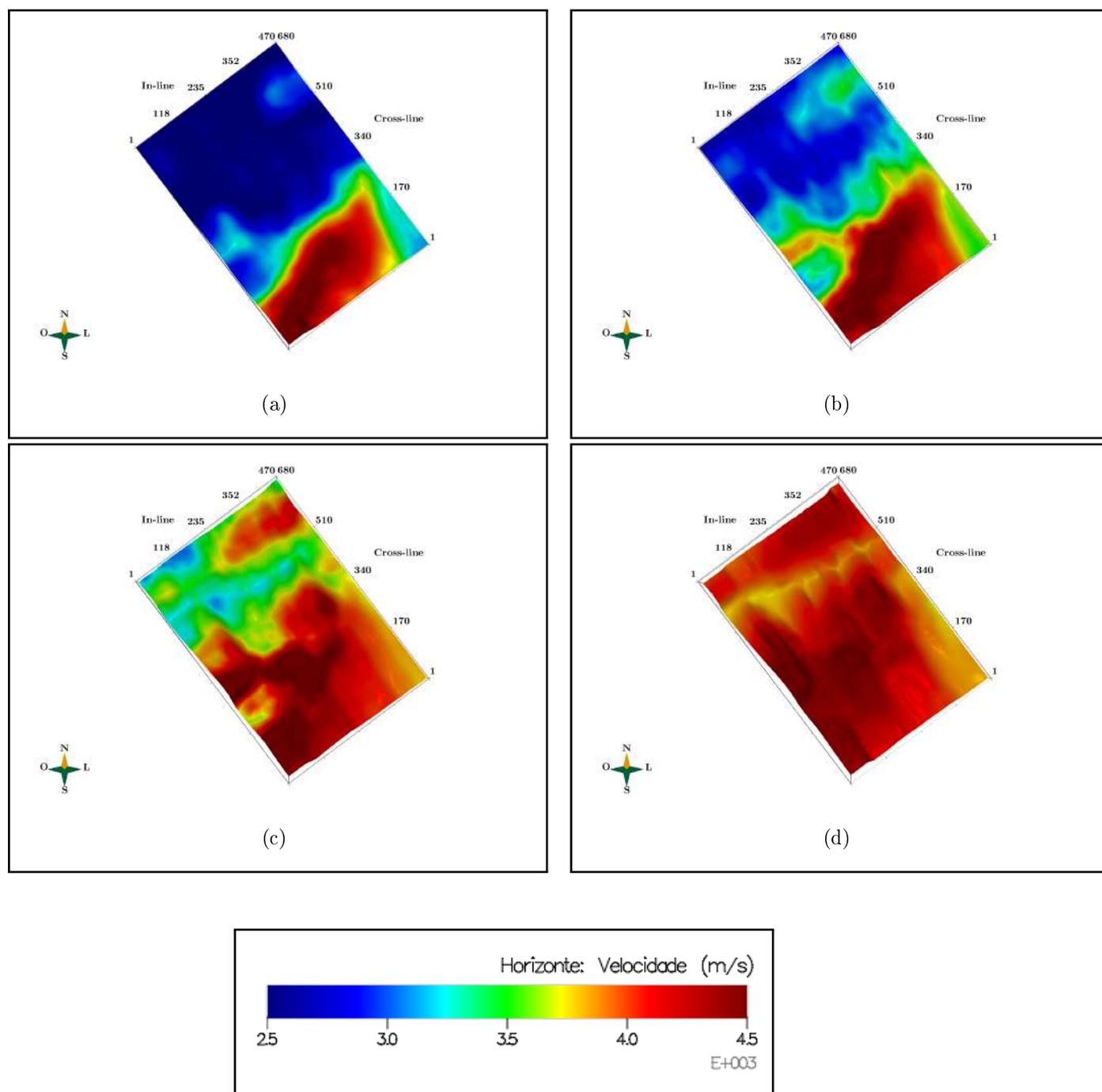


Figura 3.14: Mapa de velocidades nos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento.

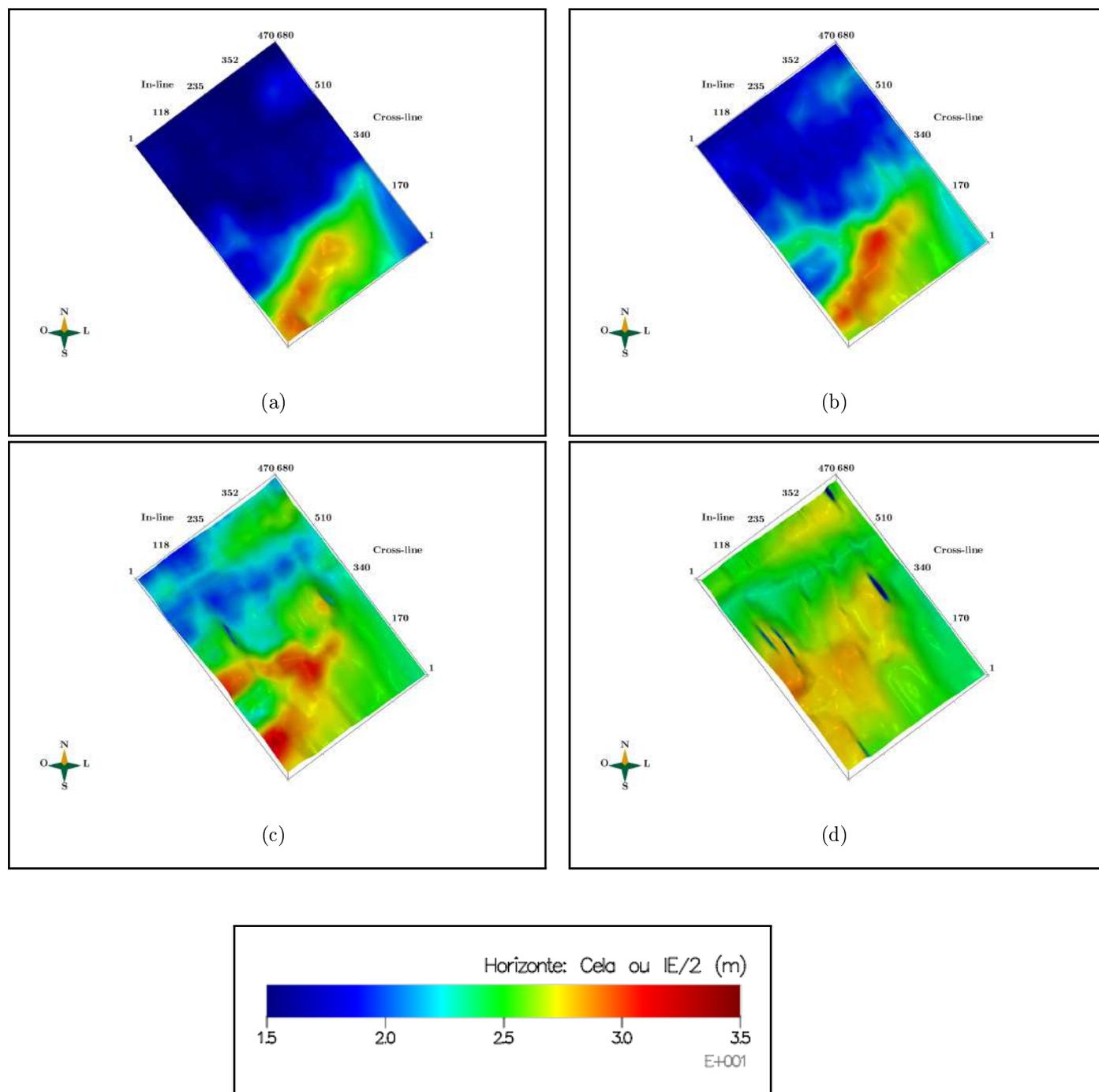


Figura 3.15: Mapa de dimensão linear associada à cela nos horizontes mapeados no 3D FAV/RI/RBU. (a) Horizonte raso para referência (b) Alvo principal raso (c) Alvo principal profundo (d) Embasamento.

3.3.4 Função de silenciamento

A análise dos afastamentos máximos necessários para amostrar corretamente os horizontes mais profundos está implicitamente associado a determinação do fator de silenciamento para a etapa de análise de velocidade.

Utilizamos para esse fim uma função média de silenciamento obtido na região mais profunda do campo de Rio do Bu. A Figura 3.16 mostra o melhor ajuste linear obtido, determinado um fator de aproximadamente 35 %, valor que doravante será utilizado para o cálculos não só dos afastamentos máximos, como da cobertura média que é por si só dependente da função de afastamento.

A regra geral de utilizar valores entre 50 % e 100 % (1.5 a 2.0 vezes a profundidade do objetivo) se levada em consideração, aumentaria a quantidade de material necessária, bem como levaria uma sobre-estimativa dos valores médios de cobertura.

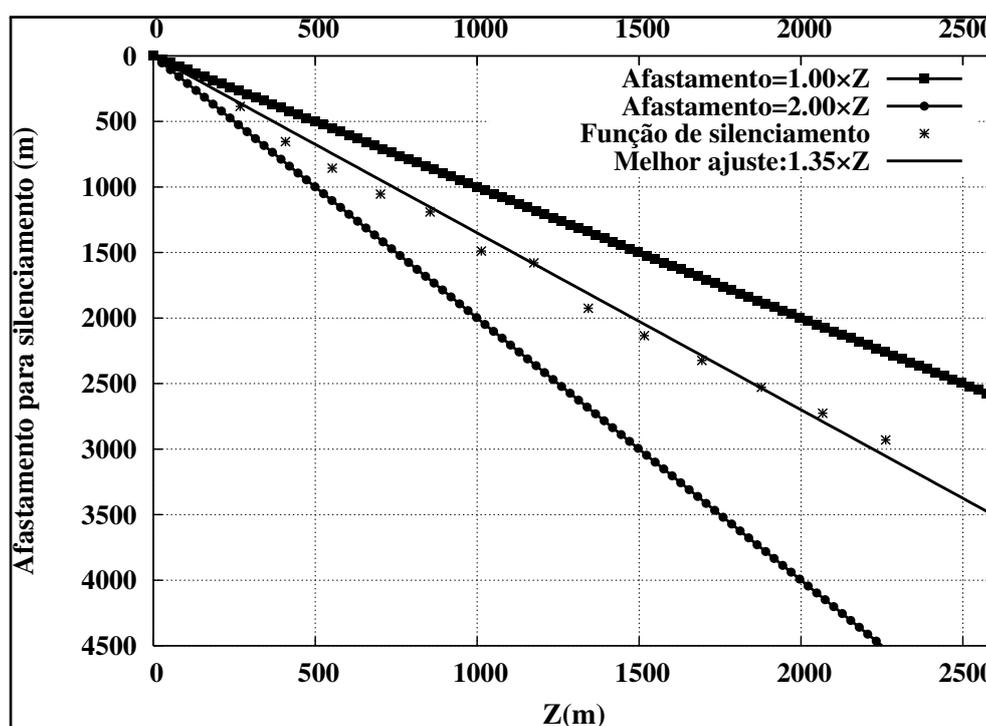


Figura 3.16: Função média de silenciamento para o 3D FAV/RI/RBU definida na região do campo de Rio do BU, onde os horizontes estão mais profundos. O ajuste linear na função de silenciamento obtida no 3D fornece um valor de 35 %, que será então usado para o cálculos dos afastamentos máximos e coberturas médias. O envelope de 0 % a 100 % foi utilizado para referência.

3.3.5 Atenuação de Ruído

No Capítulo 2, Tabela 2.2, mostrou-se que a descrição completa dos parâmetros do levantamento 3D FAV/RI/RBU contemplava, além dos seis parâmetros naturais da geometria ortogonal com lanço bipartido simétrico e uma linha de rolagem, mais oito elementos associados aos arranjos de fonte e receptor.

Neste trabalho, embora esses elementos não estejam sendo invertidos dada sua forte condicionante operacional e financeira, eles foram contemplados como itens de restrição. Calculamos a atenuação dos arranjos para os intervalos definidos na seção anterior, válido tanto para fonte quanto para receptor, com as velocidades médias obtidas no horizonte principal mais raso. A atenuação de um arranjo linear é dada por

$$A = 20 \log \frac{\text{sen}(\pi ndK)}{n \text{sen}(\pi dK)}, \quad (3.3)$$

onde n é o número de elementos do arranjo, d a distância entre eles e K o número de onda aparente. Do ponto de vista da preservação do sinal, -3 dB é considerado uma atenuação desprezível, ao passo que -20 dB é considerada alta.

A Figura 3.17 mostra a resposta do arranjo considerando a velocidade do horizonte principal mais raso na região do FAV ($V_{rms} = 2500$ m/s). A atenuação fica abaixo de -10 dB para a frequência máxima de 80 Hz, para o pior caso onde o intervalo de estação é o máximo (40 m) admitido e já se está considerando a aplicação do fator de silenciamento. O benefício do uso de arranjos de menor tamanho (30 m) está explicitado na mesma figura, onde mesmo com a aplicação do fator de silenciamento a atenuação para a mesma frequência máxima fica abaixo dos -5 dB.

Na Figura 3.18 a mesma análise é feita para o horizonte principal raso na região do RI/RBU, onde $V_{rms} = 3500$ m/s. A atenuação fica abaixo de -3 dB para uma frequência máxima de 70 Hz, em todos os cenários testados, e apenas quando o intervalo está na faixa superior, com fator de silenciamento utilizado a atenuação na frequência máxima esperada chega a -8 dB.

Vê-se que tanto para intervalos de 30 m quanto para intervalos de 40 m a atenuação dos arranjos está dentro do limite aceitável.

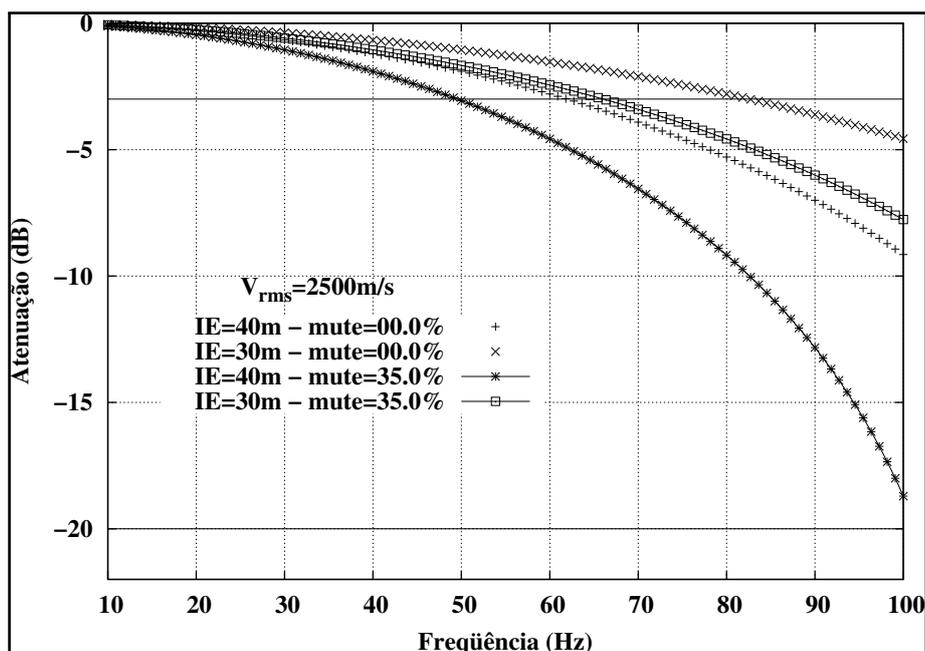


Figura 3.17: Atenuação de arranjos com tamanho equivalente a 30 m e 40 m para o horizonte principal raso no FAV, onde $V_{rms} = 2500 \text{ m/s}$. O efeito do fator de estiramento na atenuação foi calculado para o valor de 35%. Estão destacados os valores de -3 dB , em que a atenuação é desprezível e -20 dB , considerado limite de ruído.

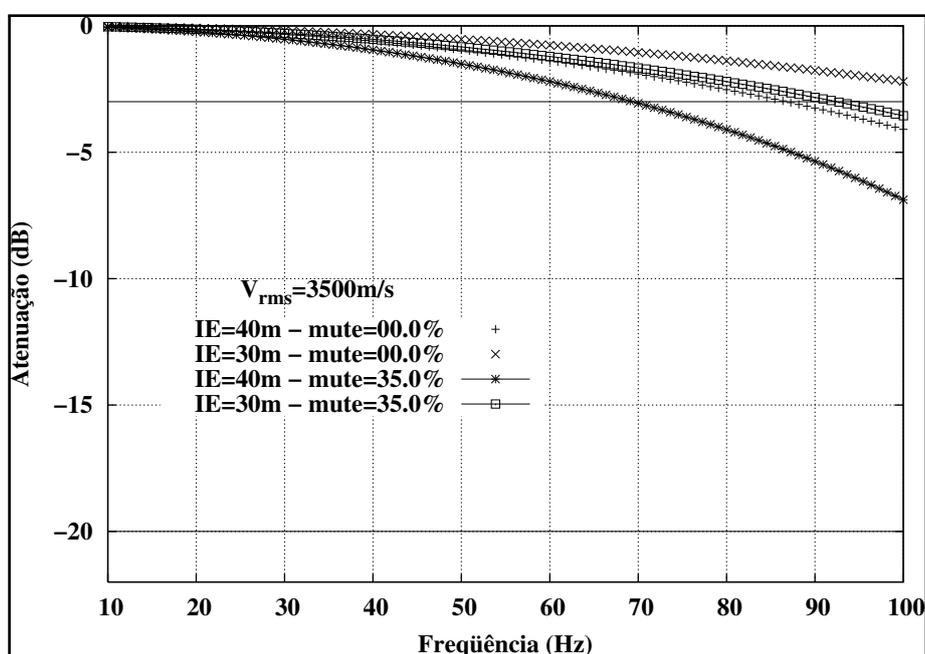


Figura 3.18: Atenuação de arranjos com com tamanho equivalente a 30 m e 40 m para o horizonte principal raso no RI/RBU, onde $V_{rms} = 3500 \text{ m/s}$. O efeito do fator de estiramento na atenuação foi calculado para o valor de 35%. Estão destacados os valores de -3 dB , em que a atenuação é desprezível e -20 dB , considerado limite de ruído.

3.3.6 Controle de Zíper

No início da Seção 3.3 foi chamada a atenção para o fato de que o levantamento 3D FAV/RI/RBU tem uma dimensão in-line significativa, totalizando 13 600 m. E sobre o desafio imposto quando essa situação ocorre, e ao mesmo tempo não se dispõe de uma quantidade de canais suficientes para o espalhamento de um subprograma completo. A operacionalização de transferir canais de uma área para outra do subprograma reduz a produção das frentes de trabalho e aumenta os prazos e custos do programa.

Esse entrave operacional é tão significativo que não é possível prescindir de sua análise. A solução encontrada para esse problema é a divisão da área do 3D em partes menores, onde o número de canais é suficiente para atender um subprograma. Há, porém, um efeito colateral. Nas emendas do programa, agora dividido, faz-se necessário uma repetição de parte do elementos de recepção para homogeneizar a cobertura e a distribuição de afastamentos e azimutes, Figura 3.19, item que será apreciado neste trabalho. A essa divisão com recobrimento de receptores se dá o nome de zíper.

Na Figura 3.20, pode-se ver o número de zíperes necessários para realizar um levantamento 3D em função do número de canais disponíveis e do intervalo entre estações. Para todos, o número de linhas de registro foi mantido fixo e igual a 8. Considerando que só se dispõe de 2400 canais, a realidade quando da execução do levantamento, pode-se ver que apenas na opção de $IE = 50$ m o programa sísmico pode ser adquirido sem a feitura de zíper.

Para $IE = 40$ m, limite máximo da faixa de intervalo definida, há necessidade de realização de uma divisão e, caso se dispusesse a realizar o levantamento com $IE = 25$ m, seriam necessárias quatro divisões para fazê-lo. A implicação operacional, financeira e técnica não pode ser desprezada já que a limitação de canais afeta também o número de linhas de registro a serem espalhadas.

Sendo assim, o número de zíperes será incluído no processo de inversão como critério de restrição. Desenhos de aquisição que demandarem mais de um zíper serão descartados, e nos resultados serão inserido dois indicadores de controle: o número de zíperes global, NZ_G , e o número de zíperes local, NZ_L . O primeiro, contempla a dimensão in-line original do programa e terá valor máximo admissível igual a 1. O número de zíper local, por sua vez, é calculado na dimensão in-line já dividida e terá valor admissível igual a 0, ou seja só será contemplado um número máximo de uma divisão no programa.

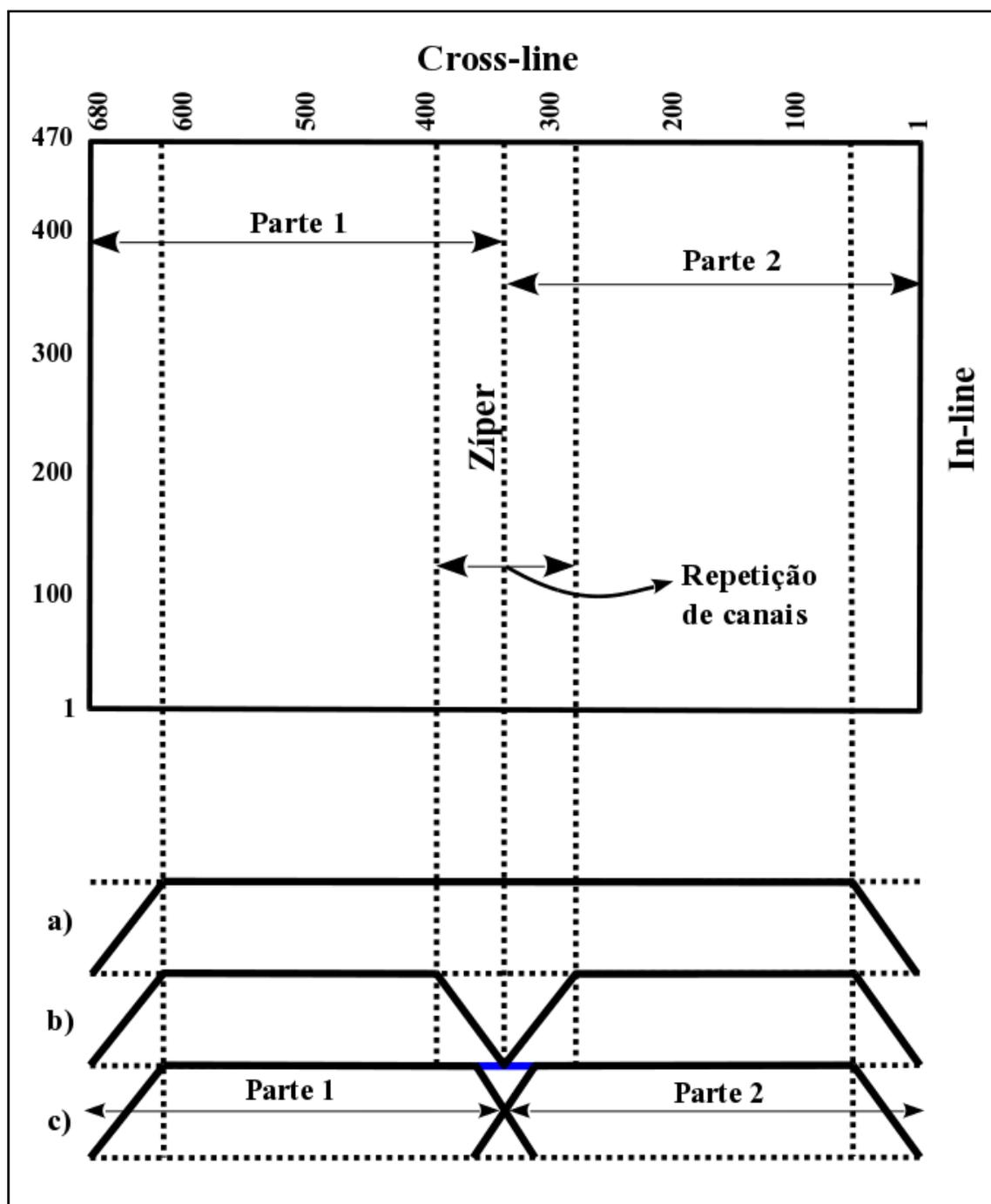


Figura 3.19: Ilustração esquemática do conceito de zíper. a) mapa de cobertura do 3D sem divisão. b) mapa de cobertura com 1 zíper, admitindo divisão do programa ao meio, mas sem repetição de canais. Os limites internos criam uma área de cobertura incompleta na região central. c) Recuperação da cobertura utilizando a repetição de canais (em azul). A cada metade do programa (Parte 1 e Parte 2) se deve adicionar o equivalente a um lançamento.

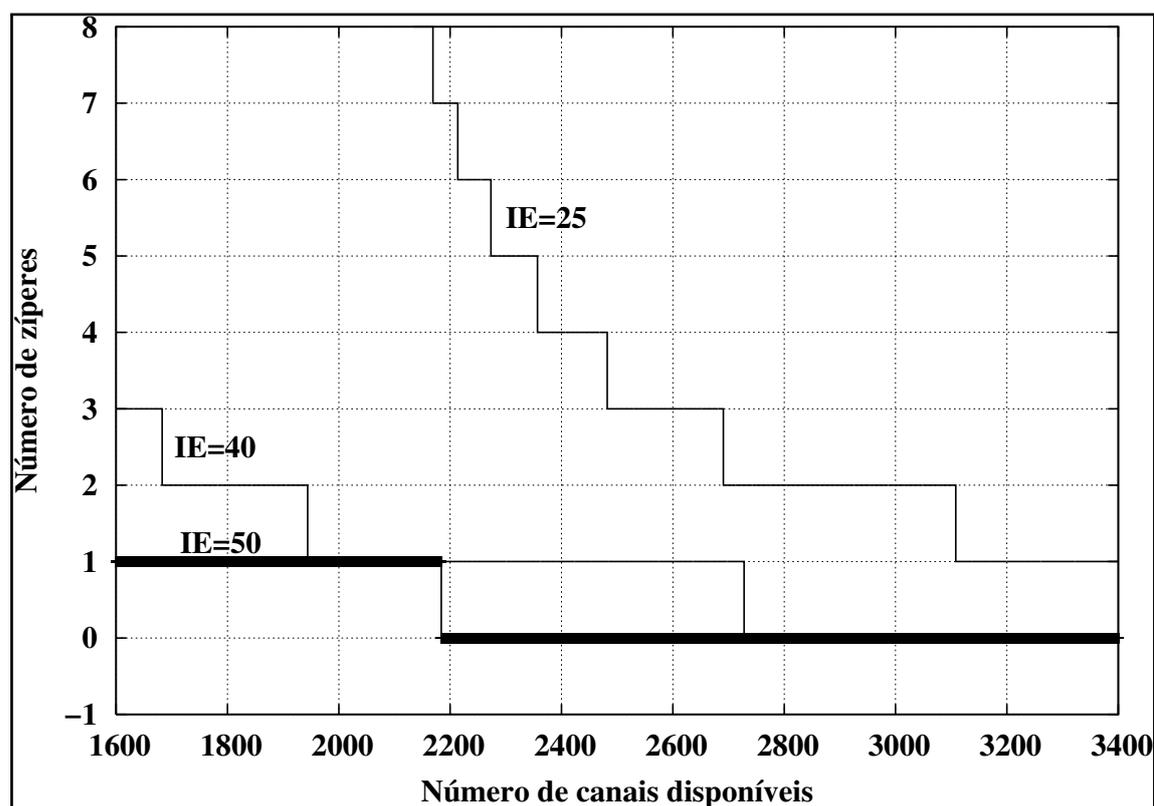


Figura 3.20: Cálculo do número de zíperes necessários para o 3D FAV/RI/RBU considerando intervalos de estações de 25 m, 40 m e 50 m. A dimensão in-line é de 13 600 m e o número de linhas de registro igual a 8. Para a quantidade de canais disponíveis (2400), apenas no caso onde $IE = 50$ m o número de zíper é nulo. A aquisição foi feita com o intervalo de 40 m, necessitando de uma divisão. A redução para 25 m exigiria 4 divisões de programa, mostrando a significância desse parâmetros na determinação do desenho de aquisição.

3.3.7 Resultados da Inversão

No desenho de aquisição do 3D FAV/RI/RBU o próprio levantamento realizado em 2008 foi usado como a geometria de referência. Assim como no caso sintético, se deseja mapear dois objetivos principais, um mais raso e um mais profundo associados ao topo e base da camada que delimita as zonas de interesse nos três campos. O embasamento é objetivo secundário. Na Tabela 3.8, estão descritos os valores dos parâmetros geradores para a inversão e a Tabela 3.9 mostra a geometria do 3D FAV/RI/RBU, que foi utilizada como referência, com os principais parâmetros derivados.

Os parâmetros alvos utilizados como entradas da função objetivo, foram extraídos da aquisição sísmica executada e das necessidades explicitadas pela interpretação, quais sejam:

- Requisitos de cobertura: coberturas médias nos alvos raso (C_1) e profundo (C_2). Aqui a notação foi alterada porque os alvos raso e profundo correspondem ao mesmo horizonte alvo, na parte mais rasa correspondente ao FAV e na parte mais profunda dos campos RI e RBU, respectivamente. Ou seja, deseja-se melhoria de qualidade nas partes rasa e média da seção em relação a campanha anterior. Como essas características demandam parâmetros apertados, a parte profunda da seção também é beneficiada, desde que se garanta sua correta amostragem de afastamentos;
- Requisitos de geometria: máximo mínimo afastamento ($X_{\max_{\min}}$), mínimo máximo afastamento ($X_{\min_{\max}}$) e máximo afastamento ($X_{\max_{3D}}$);
- Requisitos de simetria: razões de aspecto da macrocela (RA_b) e do 3D (RA_{3D}).

Foi calculado um fator de silenciamento de 35% para cálculos de coberturas médias e afastamentos. A distribuição dos fatores de ponderação foi feita de sorte que esses três requisitos tenham mesmo peso no cálculo do desempenho dos parâmetros da geometria.

Os valores alvos das coberturas médias nos alvos raso C_1 e profundo C_2 foram determinadas nas profundidades de 400 m e 1000 m, respectivamente, com base nos dados sísmicos 2D e 3D existentes. A Tabela 3.10 mostra os valores alvos e os pesos utilizados no processo de inversão. Mais uma vez, fez-se $IPT = IE$ e $NLRR = 1$. A ponderação foi tal que os fatores de cobertura e geometria somaram 37.5% cada, com 25% para a simetria. Com a base mista (7, 17, 13, 1, 13, 11) temos um total de 221 221 geometrias possíveis. O tempo de execução foi de apenas 6 s, considerando a mesma configuração de máquina do sintético. Como no caso da aplicação em dados sintéticos, as geometrias foram testadas utilizando o esquema de base mista em que cada uma delas é descrita por um número natural N ($0 \leq N < N_p$), agora convertido a base mista (7, 17, 13, 1, 13, 11).

| Parâmetros 3D Ortogonal - Representação Base Mista | | |
|---|---|--|
| Parâmetros Geradores | Definição | Faixa usada |
| IE (m) | Intervalo entre estações | [30, 31, 32, ..., 39, 40] |
| Salvo _R | Salvo de Receptores | [3, 4, 5, ..., 13, 14, 15] |
| IPT (m) | Intervalo entre pontos de tiro | [30, 31, 32, ..., 39, 40] |
| Salvo _T | Salvo de Tiros | [3, 4, 5, ..., 13, 14, 15] |
| C _i | Cobertura in-line | [4, 5, 6, ..., 18, 19, 20] |
| C _x | Cobertura cross-line | [4, 5, 6, ..., 9, 10] |
| NLRR | Número de linhas roladas | 1 |
| Parâmetros Derivados | Definição | Formulação |
| ILR (m) | Intervalo entre linhas de registro | Salvo _T × IPT |
| ILT (m) | Intervalo entre linhas de tiros | Salvo _R × IE |
| NC _{LR} | Número de canais ativos/LR | 2 × Salvo _R × C _i |
| NLR | Número de linhas de registro | 2 × C _x |
| Cela _i | Dimensão inline da cela | IE/2 |
| Cela _x | Dimensão crossline da cela | IPT/2 |
| C _{3D} | Cobertura total | C _i · C _x |
| Xmax _i (m) | Máximo afastamento in-line | ILT · C _i |
| Xmax _c (m) | Máximo afastamento cross-line | ILR · C _x |
| Xmax _{3D} (m) | Máximo afastamento | $\sqrt{Xmax_i^2 + Xmax_c^2}$ |
| Xmax _{min} (m) | Máximo mínimo afastamento | $\sqrt{(ILT - IE/2)^2 + (ILR - IPT/2)^2}$ |
| Xmin _{max} (m) | Mínimo máximo afastamento | $\sqrt{(Xmax_i - ILT)^2 + (Xmax_c - ILR)^2}$ |
| RA _c | Razão de aspecto da cela | IPT/IE |
| RA _b | Razão de aspecto do Box | ILR/ILT |
| RA _{3D} | Razão de aspecto do 3D | Xmax _c /Xmax _i |
| D _{tiro} | Densidade de tiros (/km ²) | 10 ⁶ /(IPT · ILT) |
| D _{rec} | Densidade de receptores (/km ²) | 10 ⁶ /(IE · ILR) |
| D _{traço} | Densidade de traços (/km ²) | (10 ⁶ · Cela _i · Cela _x)/C _{3D} |

Tabela 3.8: Parâmetros da geometria 3D ortogonal reparametrizada para uso na inversão Base Mista do 3D FAV/RI/RBU e parâmetros derivados importantes. Todos os geradores são independentes, inteiros e têm resolução unitária de pesquisa. O número de linhas roladas é fixo e não foi usado na inversão.

| Geometria de referência - 3D Executado | | | |
|---|--------------|------------------|--------------|
| Parâmetro | Valor | Parâmetro | Valor |
| IE | 40 m | IPT | 40 m |
| ILR | 200 m | ILL | 200 m |
| NC_{LR} | 150 | NLR | 8 |
| Parâmetros Derivados | | | |
| C_1 | 5.73 | C_2 | 25.32 |
| $Xmax_{min}$ | 254.56 m | $Xmax_{3D}$ | 3104.84 m |
| RA_b | 1 | RA_{3D} | 0.267 |
| $Salvo_R$ | 5 | $Salvo_T$ | 5 |
| C_i | 15 | C_x | 4 |
| $Xmax_i$ | 3000 m | $Xmax_c$ | 800 m |
| $Xmin_{max}$ | 2863.56 m | $D_{traço}$ | 150 000 |
| N_S | 20 767 m | Desempenho | 0.906 558 |
| NZ_G | 1 | NZ_L | 0 |

Tabela 3.9: Parâmetros do 3D FAV/RI/RBU e valores derivados, para referência. Lanço bipartido simétrico e número unitário de linhas roladas.

| Definição dos valores alvo da da função objetivo | | |
|---|--------------|--------------------------------|
| Parâmetro (P_i) | Valor | Peso (w_i) |
| $C_{raso} = C_1$ | 9 | 18.75% |
| $C_{prof} = C_2$ | 36 | 18.75% |
| $Xmax_{min}$ (m) | 300 | 12.5% |
| $Xmin_{max}$ (m) | 2970 | 12.5% |
| $Xmax_{3D}$ (m) | 3300 | 12.5% |
| RA_b | 1.0 | 12.5% |
| RA_{3D} | 1.0 | 12.5% |

Tabela 3.10: Parâmetros P_i e pesos w_i usados como valores alvo para a função objetivo, definidos através dos dados existentes para o 3D FAV/RI/RBU.

Além dos valores alvos P_i e w_i , definidos para a função objetivo e que determinam o desempenho de cada elemento testado, as soluções foram submetidas a um teste de validade, só sendo aceitas aquelas que atendessem as seguintes restrições geofísicas e operacionais:

- Número máximo de 2400 canais disponíveis: $NC_{3D} \leq 2400$,
- O máximo mínimo afastamento não deve ser maior que 300 m, para contemplar o objetivo mais raso em FAL: $X_{max_{min}} \leq 300$ m;
- O mínimo máximo afastamento não deve ser menor que 2970 m, para que o alvo profundo seja contemplado no processamento sísmico, com 35% de fator de silenciamento ($2200 \text{ m} \times 1.35 = 2970 \text{ m}$);
- As relações de simetria utilizadas foram: $1/2 \leq RA_{3D} \leq 2$ e $1/4 \leq RA_b \leq 4$ para acomodar a pequena quantidade de canais;
- O número de zíperes global é limitado a 1 e o número de zíperes local deve ser nulo: $NZ_G \leq 1$ e $NZ_L = 0$, e
- Para imagear abaixo do objetivo principal mais profundo, e atender no mínimo o que foi executado, o máximo afastamento não deve ser menor que 3100 m: $X_{max_{3D}} \geq 3100$ m.

A Figura 3.21(a) mostra o desempenho de todas as geometrias selecionadas, com o valor da geometria do 3D FAV/RI/RBU em destaque para comparação. As Figuras 3.21(b) a 3.21(r) mostram como cada parâmetro da geometria e cada valor alvo da função objetivo varia em torno do valor da melhor geometria e em função de sua posição I de melhor desempenho. Do total aproximado de 221 221 geometrias testadas, apenas 50 satisfizeram os critérios de restrição aplicados, já que mais dados prévios disponíveis implicam fatores de corte mais severos. Vale ressaltar que o número de zíperes foi um fator de limitação expressiva.

Os 50 melhores desenhos estão sumarizados nas Tabelas 3.11 a 3.15. Importante notar que a geometria executada para o 3D FAV/RI/RBU está sendo mostrada para fins de comparação, mas não foi selecionada no processo de inversão pois não contemplou o critério de mínimo máximo afastamento, Figura 3.21(p). Além disso, apresenta entre todas o menor valor de densidade de traço por km^2 , um indicador importante para as etapas de processamento pré-empilhamento. Apesar disso, se selecionada entre as outras 50, ficaria na posição 16 no que diz respeito ao melhor desempenho, mostrando que sua execução demandou o máximo de esforço e planejamento possível da equipe de parametrização.

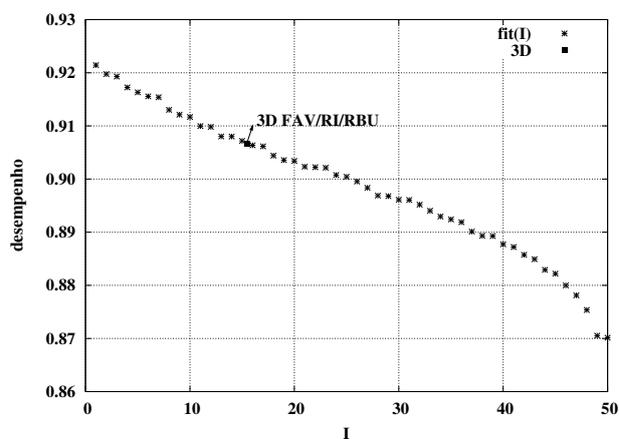
Desenvolvemos um novo método para desenho de aquisição sísmica 3D terrestre. Através da reparametrização dos elementos que definem uma geometria ortogonal apresentamos um

algoritmo eficiente de pesquisa direta utilizando representação em base mista. Essa nova parametrização permite percorrer todas as soluções do espaço de parâmetros que normalmente se usa na indústria do petróleo, com alta resolução de pesquisa. As funções matemáticas que descrevem os parâmetros naturais e derivados de cada geometria, assim como a função objetivo definida, são expressões que não demandam custo computacional significativo, permitindo a busca e organização dos melhores desempenhos de forma bastante eficiente, prescindindo dos esquemas de inversão determinísticos de escopo local baseados no cálculo do Jacobiano ou de esquemas probabilísticos de escopo global.

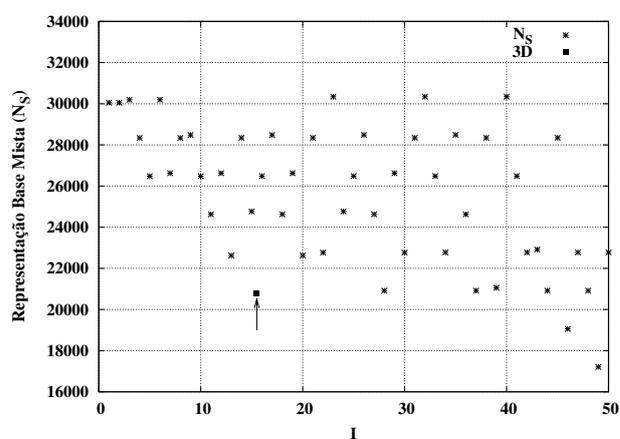
Além de determinarmos a melhor geometria, podemos definir de acordo com os valores alvos e critérios de restrição um conjunto de geometrias ótimas, que poderão ser alvos de um novo escrutínio operacional e financeiro avaliando-a sobre todos os aspectos. O esquema pode ser adaptado e aplicado diretamente em outros tipos de geometria e ambientes de aquisição; seja em terra, transição ou mar.

É importante notar que o desenvolvimento de métodos rápidos e eficientes para a otimização de desenhos de aquisição sísmica 3D não implicam pura e simplesmente a automatização do processo. Ao contrário, demanda aos profissionais envolvidos uma necessidade maior de integração e refinamento na escolha dos valores alvos e das restrições a serem aplicadas, ou seja, concentra os esforços da escolha das melhores geometrias no entendimento geológico/geofísico da área, bem como nas melhores práticas operacionais e na busca do menor custo possível.

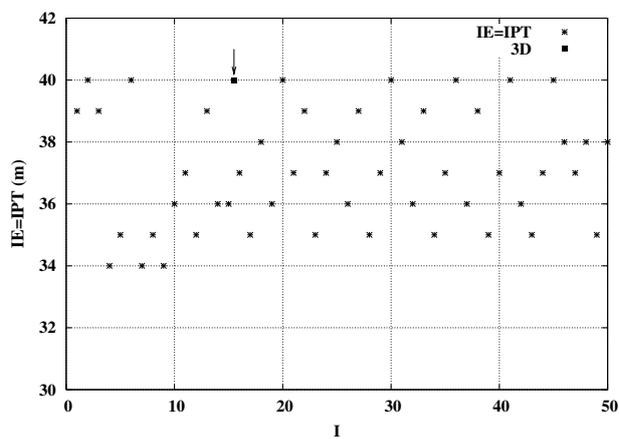
No próximo capítulo esse conjunto de geometrias selecionadas será submetido a uma novo ordenamento, avaliando cada uma de acordo com um critério quantitativo associado a iluminação orientada ao alvo nos três campos de estudo.



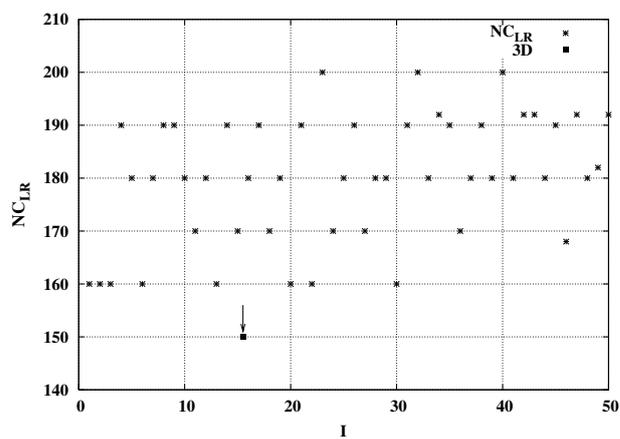
(a)



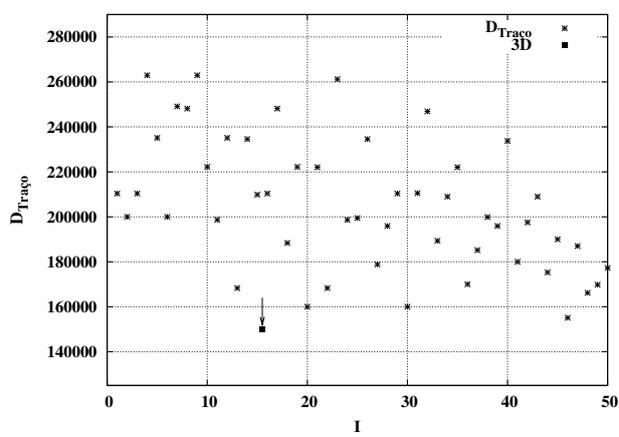
(b)



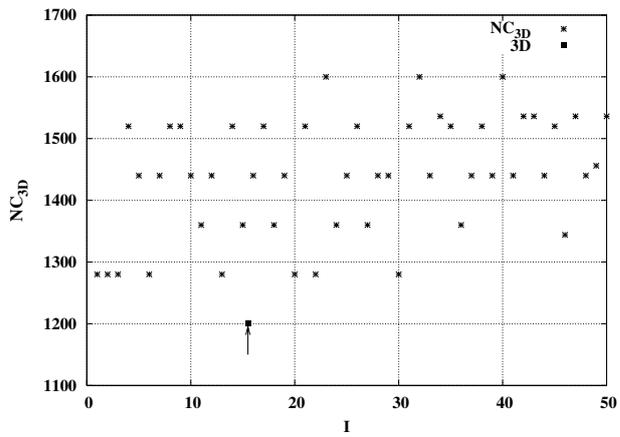
(c)



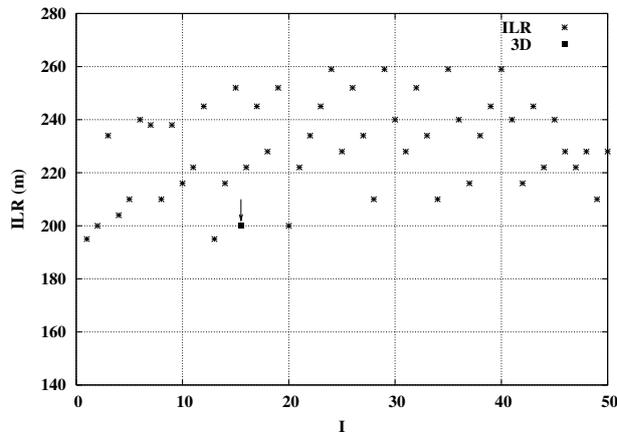
(d)



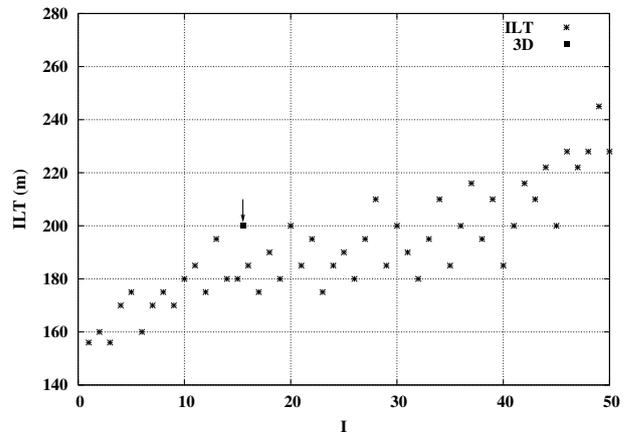
(e)



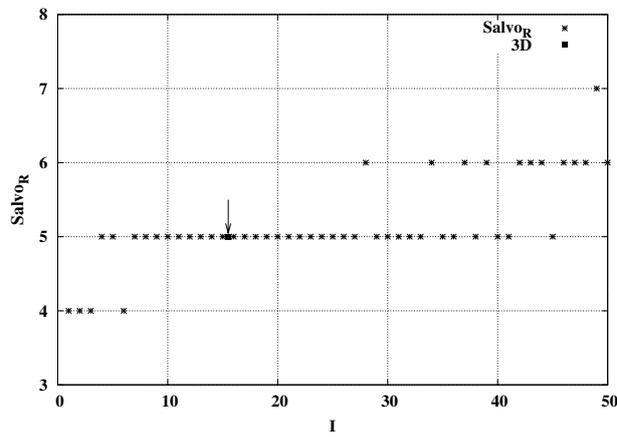
(f)



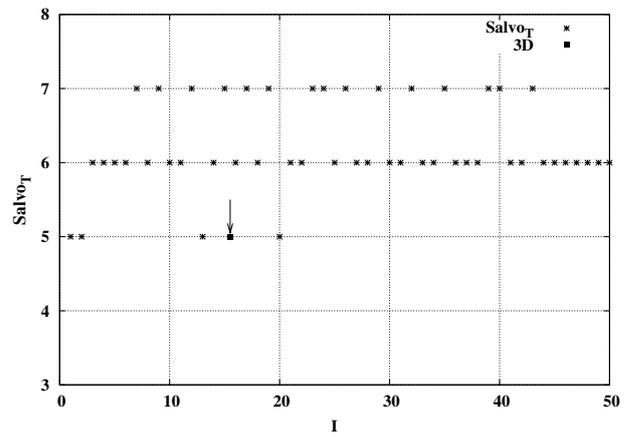
(g)



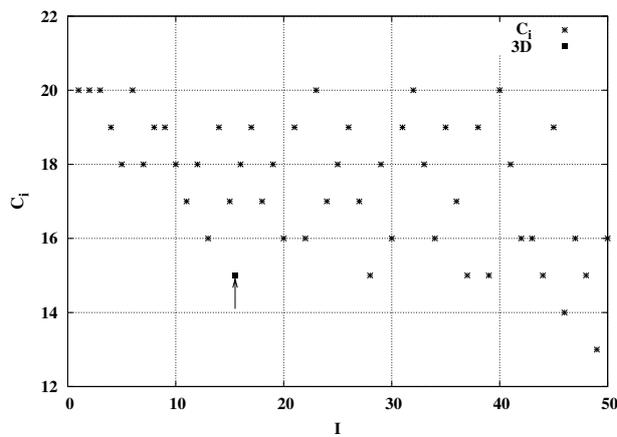
(h)



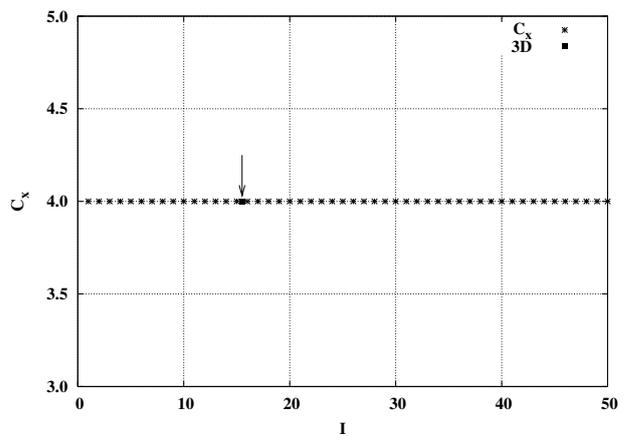
(i)



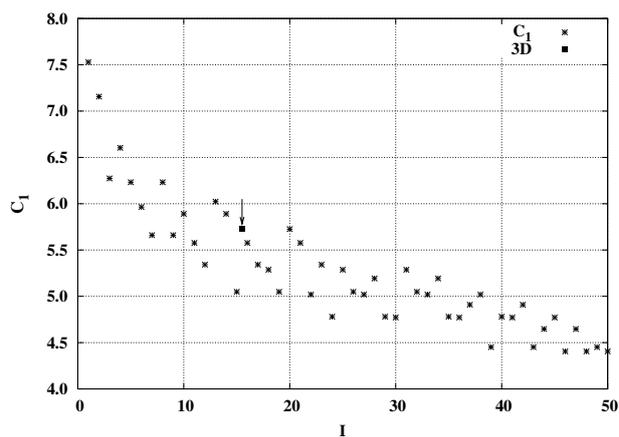
(j)



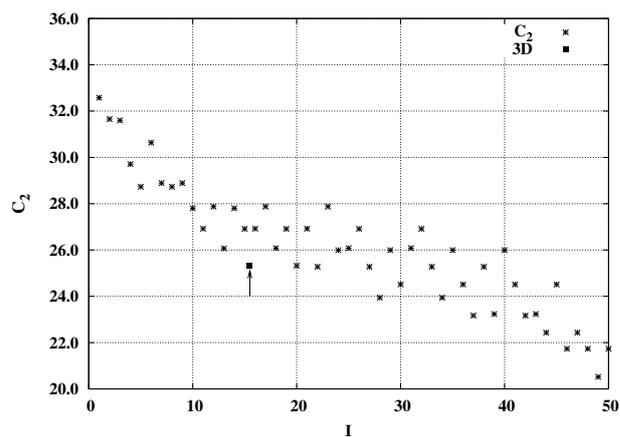
(k)



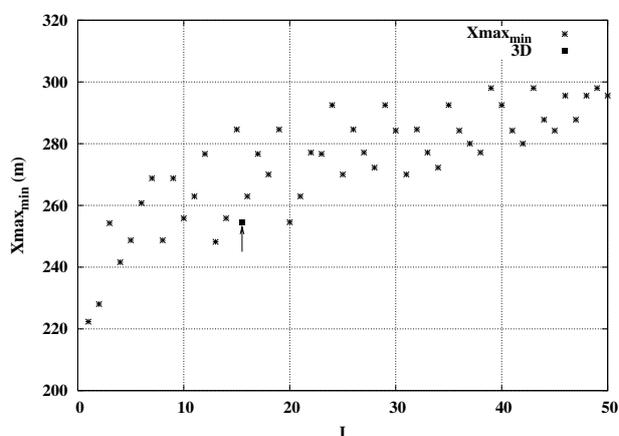
(l)



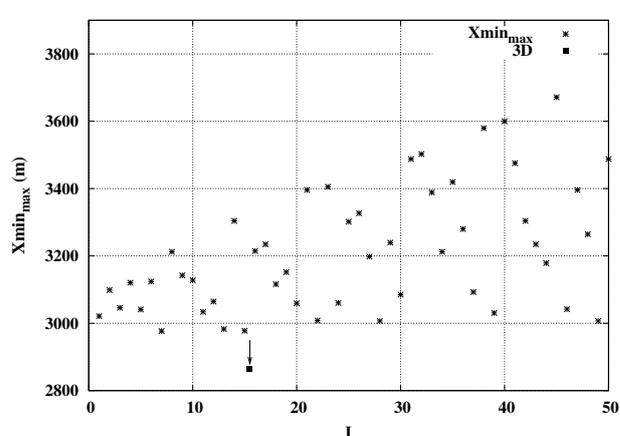
(m)



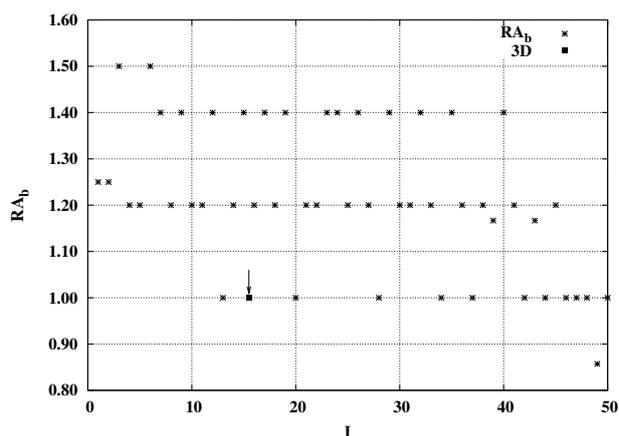
(n)



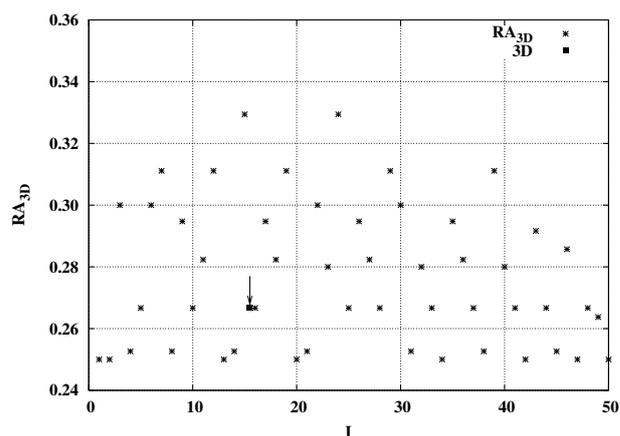
(o)



(p)



(q)



(r)

Figura 3.21: Resultados da inversão base mista das melhores geometrias. (a) Desempenho de todas as geometrias selecionadas (total de 50) em ordem decrescente. (b-r) Evolução dos parâmetros da geometria e dos valores alvos para as 50 geometrias selecionadas. Em cada figura, o valor de referência do 3D FAV/RI/RBU está representado por uma seta.

50 melhores geometrias ortogonais invertidas: 1 a 10

| Parâmetros | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| IE (m) | 39 | 40 | 39 | 34 | 35 | 40 | 34 | 35 | 34 | 36 |
| IPT (m) | 39 | 40 | 39 | 34 | 35 | 40 | 34 | 35 | 34 | 36 |
| ILR (m) | 195 | 200 | 234 | 204 | 210 | 240 | 238 | 210 | 238 | 216 |
| ILT (m) | 156 | 160 | 156 | 170 | 175 | 160 | 170 | 175 | 170 | 180 |
| NC _{LR} | 160 | 160 | 160 | 190 | 180 | 160 | 180 | 190 | 190 | 180 |
| NLR | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| NC _{3D} | 1280 | 1280 | 1280 | 1520 | 1440 | 1280 | 1440 | 1520 | 1520 | 1440 |
| C ₁ | 7.529 | 7.157 | 6.274 | 6.604 | 6.232 | 5.964 | 5.660 | 6.231 | 5.660 | 5.890 |
| C ₂ | 32.579 | 31.655 | 31.597 | 29.708 | 28.731 | 30.637 | 28.889 | 28.731 | 28.889 | 27.803 |
| X _{max_min} (m) | 222.334 | 228.035 | 254.249 | 241.615 | 248.722 | 260.768 | 268.794 | 248.722 | 268.794 | 255.828 |
| X _{max_3D} (m) | 3216.022 | 3298.485 | 3257.376 | 3331.479 | 3260.077 | 3340.898 | 3204.669 | 3429.464 | 3367.374 | 3353.222 |
| RA _b | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 |
| RA _{3D} | 0.25 | 0.25 | 0.30 | 0.253 | 0.267 | 0.30 | 0.311 | 0.252 | 0.295 | 0.267 |
| Salvor | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 5.0 | 5.0 | 4.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Salvor _T | 5.0 | 5.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 |
| C _i | 20.0 | 20.0 | 20.0 | 19.0 | 18.0 | 20.0 | 18.0 | 19.0 | 19.0 | 18.0 |
| C _x | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| C _{3D} | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 76.0 | 72.0 | 80.0 | 72.0 | 76.0 | 76.0 | 72.0 |
| X _{max_i} (m) | 3120 | 3200 | 3120 | 3230 | 3150 | 3200 | 3060 | 3325 | 3230 | 3240 |
| X _{max_c} (m) | 780 | 800 | 936 | 816 | 840 | 960 | 952 | 840 | 952 | 864 |
| X _{min_{max}} (m) | 3021.179 | 3098.645 | 3045.997 | 3120.600 | 3040.974 | 3124.100 | 2976.894 | 3212.382 | 3142.196 | 3127.859 |
| D _{tiro} (/km ²) | 164.366 | 156.250 | 164.366 | 173.010 | 163.265 | 156.250 | 173.010 | 163.265 | 173.010 | 154.321 |
| D _{rec} (/km ²) | 131.492 | 125 | 109.577 | 144.175 | 136.054 | 104.167 | 123.579 | 136.054 | 123.579 | 128.601 |
| D _{traço} (/km ²) | 210.387.9 | 200.000.0 | 210.387.9 | 262.975.8 | 235.102.0 | 200.000.0 | 249.135.0 | 248.163.3 | 262.975.8 | 222.222.2 |
| N _S | 30.050 | 30.051 | 30.193 | 28.340 | 26.482 | 30.194 | 26.624 | 28.341 | 28.483 | 26.483 |
| Desempenho | 0.921429 | 0.919746 | 0.919288 | 0.917243 | 0.916324 | 0.915567 | 0.915404 | 0.913012 | 0.912115 | 0.911680 |
| NZ _G | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| NZ _L | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 3.11: 1-10 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L).

50 melhores geometrias ortogonais invertidas: 11 a 20

| Parâmetros | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| IE (m) | 37 | 35 | 39 | 36 | 36 | 37 | 35 | 38 | 36 | 40 |
| IPT (m) | 37 | 35 | 39 | 36 | 36 | 37 | 35 | 38 | 36 | 40 |
| ILR (m) | 222 | 245 | 195 | 216 | 252 | 222 | 245 | 228 | 252 | 200 |
| ILT (m) | 185 | 175 | 195 | 180 | 180 | 185 | 175 | 190 | 180 | 200 |
| NC _{LR} | 170 | 180 | 160 | 190 | 170 | 180 | 190 | 170 | 180 | 160 |
| NLR | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| NC _{3D} | 1360 | 1440 | 1280 | 1520 | 1360 | 1440 | 1520 | 1360 | 1440 | 1280 |
| C ₁ | 5.576 | 5.342 | 6.023 | 5.890 | 5.049 | 5.576 | 5.342 | 5.287 | 5.049 | 5.723 |
| C ₂ | 26.921 | 27.877 | 26.063 | 27.803 | 26.914 | 26.923 | 27.877 | 26.080 | 26.912 | 25.324 |
| X _{max_{min}} (m) | 262.934 | 276.670 | 248.194 | 255.823 | 284.605 | 262.934 | 276.670 | 270.041 | 284.605 | 254.558 |
| X _{max_{3D}} (m) | 3267.961 | 3298.924 | 3216.022 | 3527.449 | 3221.749 | 3446.367 | 3466.414 | 3356.284 | 3393.179 | 3298.485 |
| RA _b | 1.2 | 1.4 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.0 |
| RA _{3D} | 0.282 | 0.311 | 0.250 | 0.253 | 0.329 | 0.267 | 0.295 | 0.282 | 0.311 | 0.250 |
| Salvor | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Salvor _T | 6.0 | 7.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 7.0 | 5.0 |
| C _i | 17 | 18 | 16 | 19 | 17 | 18 | 19 | 17 | 18 | 16 |
| C _x | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| C _{3D} | 68 | 72 | 64 | 76 | 68 | 72 | 76 | 68 | 72 | 64 |
| X _{max_i} (m) | 3145 | 3150 | 3120 | 3420 | 3060 | 3330 | 3325 | 3230 | 3240 | 3200 |
| X _{max_c} (m) | 888 | 980 | 780 | 864 | 1008 | 888 | 980 | 912 | 1008 | 800 |
| X _{min_{max}} (m) | 3034 | 3064.449 | 2982.927 | 3304.165 | 2977.572 | 3214.744 | 3234.614 | 3116 | 3152.005 | 3059.412 |
| D _{tiro} (/km ²) | 146.092 | 163.265 | 131.492 | 154.321 | 154.321 | 146.092 | 163.265 | 138.504 | 154.321 | 125 |
| D _{rec} (/km ²) | 121.743 | 116.618 | 131.492 | 128.601 | 110.229 | 121.743 | 116.618 | 115.420 | 110.229 | 125 |
| D _{traço} (/km ²) | 198685.2 | 235102.0 | 168310.3 | 234567.9 | 209876.5 | 210372.5 | 248163.3 | 188365.7 | 222222.2 | 160000.0 |
| N _S | 24625 | 26625 | 22625 | 28342 | 24767 | 26484 | 28484 | 24626 | 26626 | 22626 |
| Desempenho | 0.909959 | 0.909811 | 0.908026 | 0.908008 | 0.907178 | 0.906349 | 0.906148 | 0.904410 | 0.903568 | 0.903401 |
| NZ _G | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| NZ _L | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 3.12: 11-20 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L).

50 melhores geometrias ortogonais invertidas: 21 a 30

| Parâmetros | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| IE (m) | 37 | 39 | 35 | 37 | 38 | 36 | 39 | 35 | 37 | 40 |
| IPT (m) | 37 | 39 | 35 | 37 | 38 | 36 | 39 | 35 | 37 | 40 |
| ILR (m) | 222 | 234 | 245 | 259 | 228 | 252 | 234 | 210 | 259 | 240 |
| ILT (m) | 185 | 195 | 175 | 185 | 190 | 180 | 195 | 210 | 185 | 200 |
| NC _{LR} | 190 | 160 | 200 | 170 | 180 | 190 | 170 | 180 | 180 | 160 |
| NLR | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| NC _{3D} | 1520 | 1280 | 1600 | 1360 | 1440 | 1520 | 1360 | 1440 | 1440 | 1280 |
| C ₁ | 5.576385 | 5.019113 | 5.341 | 4.780 | 5.287 | 5.049 | 5.019 | 5.193 | 4.780 | 4.771 |
| C ₂ | 26.921 | 25.277 | 27.877 | 25.994 | 26.080 | 26.914 | 25.277 | 23.942 | 25.994 | 24.510 |
| X _{max_{min}} (m) | 262.934 | 277.147 | 276.670 | 292.511 | 270.0407 | 284.605 | 277.147 | 272.236 | 292.511 | 284.253 |
| X _{max_{3D}} (m) | 3625.434 | 3257.376 | 3634.611 | 3311.242 | 3539.512 | 3565.454 | 3444.607 | 3260.077 | 3487.434 | 3340.898 |
| RA _b | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.4 | 1.2 |
| RA _{3D} | 0.253 | 0.300 | 0.280 | 0.329 | 0.267 | 0.295 | 0.282 | 0.267 | 0.311 | 0.300 |
| Salvor | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 6.0 | 5.0 | 5.0 |
| Salvor _T | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 7.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 |
| C _i | 19 | 16 | 20 | 17 | 18 | 19 | 17 | 15 | 18 | 16 |
| C _x | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| C _{3D} | 76 | 64 | 80 | 68 | 72 | 76 | 68 | 60 | 72 | 64 |
| X _{max_i} (m) | 3515 | 3120 | 3500 | 3145 | 3420 | 3420 | 3315 | 3150 | 3330 | 3200 |
| X _{max_c} (m) | 888 | 936 | 980 | 1036 | 912 | 1008 | 936 | 840 | 1036 | 960 |
| X _{min_{max}} (m) | 3395.947 | 3008.061 | 3405.268 | 3060.282 | 3301.629 | 3327.031 | 3198 | 3006.742 | 3239.561 | 3085.190 |
| D _{tiro} (/km ²) | 146.092 | 131.492 | 163.265 | 146.092 | 138.504 | 154.321 | 131.492 | 136.054 | 146.092 | 125.000 |
| D _{rec} (/km ²) | 121.743 | 109.577 | 116.618 | 104.352 | 115.420 | 110.229 | 109.577 | 136.054 | 104.352 | 104.167 |
| D _{traço} (/km ²) | 222059.9 | 168310.3 | 261224.5 | 198685.2 | 199446.0 | 234567.9 | 178829.7 | 195918.4 | 210372.5 | 160000.0 |
| N _S | 28343 | 22768 | 30343 | 24768 | 26485 | 28485 | 24627 | 20916 | 26627 | 22769 |
| Desempenho | 0.902321 | 0.902223 | 0.902129 | 0.900760 | 0.900433 | 0.899544 | 0.898356 | 0.896885 | 0.896778 | 0.896113 |
| NZ _G | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| NZ _L | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 3.13: 21-30 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L).

50 melhores geometrias ortogonais invertidas: 31 a 40

| Parâmetros | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| IE (m) | 38 | 36 | 39 | 35 | 37 | 40 | 36 | 39 | 35 | 37 |
| IPT (m) | 38 | 36 | 39 | 35 | 37 | 40 | 36 | 39 | 35 | 37 |
| ILR (m) | 228 | 252 | 234 | 210 | 259 | 240 | 216 | 234 | 245 | 259 |
| ILT (m) | 190 | 180 | 195 | 210 | 185 | 200 | 216 | 195 | 210 | 185 |
| NC _{LR} | 190 | 200 | 180 | 192 | 190 | 170 | 180 | 190 | 180 | 200 |
| NLR | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| NC _{3D} | 1520 | 1600 | 1440 | 1536 | 1520 | 1360 | 1440 | 1520 | 1440 | 1600 |
| C ₁ | 5.287 | 5.0490 | 5.019 | 5.193 | 4.780 | 4.771 | 4.909 | 5.019 | 4.451 | 4.790 |
| C ₂ | 26.080 | 26.914 | 25.277 | 23.942 | 25.994 | 24.510 | 23.169 | 25.277 | 23.231 | 25.994 |
| X _{max_{min}} (m) | 270.041 | 284.605 | 277.147 | 272.234 | 292.511 | 284.253 | 280.014 | 277.147 | 298.014 | 292.511 |
| X _{max_{3D}} (m) | 3723.418 | 3738.458 | 3632.657 | 3463.409 | 3664.495 | 3532.931 | 3353.222 | 3821.403 | 3298.924 | 3842.303 |
| RA _b | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.2 | 1.17 | 1.4 |
| RA _{3D} | 0.253 | 0.280 | 0.267 | 0.250 | 0.295 | 0.282 | 0.267 | 0.253 | 0.311 | 0.280 |
| Salvor | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 6.0 | 5.0 | 5.0 | 6.0 | 5.0 | 6.0 | 5.0 |
| Salvor _T | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 7.0 |
| C _i | 19 | 20 | 18 | 16 | 19 | 17 | 15 | 19 | 15 | 20 |
| C _x | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| C _{3D} | 76 | 80 | 72 | 64 | 76 | 68 | 60 | 76 | 60 | 80 |
| X _{max_i} (m) | 3610 | 3600 | 3510 | 3360 | 3515 | 3400 | 3240 | 3705 | 3150 | 3700 |
| X _{max_c} (m) | 912 | 1008 | 936 | 840 | 1036 | 960 | 864 | 936 | 980 | 1036 |
| X _{min_{max}} (m) | 3487.729 | 3502.561 | 3388.514 | 3212.382 | 3419.449 | 3280 | 3092.649 | 3579.512 | 3030.483 | 3599.855 |
| D _{tiro} (/km ²) | 138.504 | 154.321 | 131.492 | 136.054 | 146.092 | 125.000 | 128.601 | 131.492 | 136.054 | 146.092 |
| D _{rec} (/km ²) | 115.420 | 110.229 | 109.577 | 136.054 | 104.352 | 104.167 | 128.601 | 109.577 | 116.618 | 104.352 |
| D _{traço} (/km ²) | 210.526.3 | 246.913.6 | 189.349.1 | 208.979.6 | 222.059.9 | 170.000.0 | 185.185.2 | 199.868.5 | 195.918.4 | 233.747.3 |
| N _S | 28.344 | 30.344 | 26.486 | 22.775 | 28.486 | 24.628 | 20.917 | 28.345 | 21.059 | 30.345 |
| Desempenho | 0.896.063 | 0.895.187 | 0.894.024 | 0.892.957 | 0.892.406 | 0.891.878 | 0.890.121 | 0.889.326 | 0.889.281 | 0.887.726 |
| NZ _G | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| NZ _L | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 3.14: 31-40 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L).

50 melhores geometrias ortogonais invertidas: 41 a 50

| Parâmetros | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| IE (m) | 40 | 36 | 35 | 37 | 40 | 38 | 37 | 38 | 35 | 38 |
| IPT (m) | 40 | 36 | 35 | 37 | 40 | 38 | 37 | 38 | 35 | 38 |
| ILR (m) | 240 | 216 | 245 | 222 | 240 | 228 | 222 | 228 | 210 | 228 |
| ILT (m) | 200 | 216 | 210 | 222 | 200 | 228 | 222 | 228 | 245 | 228 |
| NC _{LR} | 180 | 192 | 192 | 180 | 190 | 168 | 192 | 180 | 182 | 192 |
| NLR | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| NC _{3D} | 1440 | 1536 | 1536 | 1440 | 1520 | 1344 | 1536 | 1440 | 1456 | 1536 |
| C ₁ | 4.771 | 4.908 | 4.451 | 4.647 | 4.771 | 4.406 | 4.647 | 4.406 | 4.451 | 4.406 |
| C ₂ | 24.510 | 23.169 | 23.231 | 22.434 | 24.507 | 21.733 | 22.434 | 21.733 | 20.522 | 21.733 |
| X _{max} _{min} (m) | 284.253 | 280.014 | 298.014 | 287.792 | 284.253 | 295.571 | 287.792 | 295.571 | 298.014 | 295.571 |
| X _{max} _{3D} (m) | 3725.802 | 3562.363 | 3500.000 | 3446.367 | 3919.388 | 3319.730 | 3661.318 | 3539.512 | 3293.907 | 3760.272 |
| RA _b | 1.2 | 1.0 | 1.17 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.86 | 1.0 |
| RA _{3D} | 0.27 | 0.25 | 0.29 | 0.27 | 0.25 | 0.29 | 0.25 | 0.27 | 0.26 | 0.25 |
| Salvor | 5.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 5.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 |
| Salvor _T | 6.0 | 6.0 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| C _i | 18 | 16 | 16 | 15 | 19 | 14 | 16 | 15 | 13 | 16 |
| C _x | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| C _{3D} | 72 | 64 | 64 | 60 | 76 | 56 | 64 | 60 | 52 | 64 |
| X _{max} _i (m) | 3600 | 3456 | 3360 | 3330 | 3800 | 3192 | 3552 | 3420 | 3185 | 3648 |
| X _{max} _c (m) | 960 | 864 | 980 | 888 | 960 | 912 | 888 | 912 | 840 | 912 |
| X _{min} _{max} (m) | 3475.399 | 3304.165 | 3234.614 | 3178.556 | 3671.294 | 3041.899 | 3395.947 | 3264.463 | 3006.742 | 3487.729 |
| D _{tiro} (/km ²) | 125 | 128.601 | 136.054 | 121.743 | 125.000 | 115.420 | 121.743 | 115.420 | 116.618 | 115.420 |
| D _{rec} (/km ²) | 104.167 | 128.601 | 116.618 | 121.743 | 104.167 | 115.420 | 121.743 | 115.420 | 136.054 | 115.420 |
| D _{traço} (/km ²) | 180000.0 | 197530.9 | 208979.6 | 175310.5 | 190000.0 | 155124.7 | 186997.8 | 166205.0 | 169795.9 | 177285.3 |
| N _S | 26487 | 22776 | 22918 | 20918 | 28346 | 19060 | 22777 | 20919 | 17209 | 22778 |
| Desempenho | 0.887204 | 0.885750 | 0.884923 | 0.882919 | 0.882191 | 0.879987 | 0.878121 | 0.875366 | 0.870523 | 0.870157 |
| NZ _G | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| NZ _L | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 3.15: 41-50 melhores geometrias ortogonais invertidas, com descrição completa de seus parâmetros, sua representação base mista (N_S), desempenho e números de zíperes na área completa do 3D (NZ_G) e na área com zíper (NZ_L).

4

Estudo de Iluminação

No capítulo anterior o desenho de aquisição sísmica foi tratado através de um processo integrado de inversão utilizando um algoritmo de base mista. Tendo por base os objetivos geológicos, geofísicos e operacionais significativos, foi possível selecionar um bom conjunto de geometrias válidas, organizadas por grau decrescente de desempenho. O segundo passo consiste em integrar ao funcional de desempenho um indicador quantitativo, associado à energia de iluminação liberada por um ponto alvo e coletada na superfície de aquisição pelas geometrias selecionadas.

Para tanto, propõe-se a execução de um experimento sísmico que contemple a simulação de todo processo de aquisição sísmica, em duas fases.

Primeiro, os alvos geológicos que se deseja iluminar são definidos no cubo de velocidades e, seguindo a metodologia desenvolvida por Alves et al. (2008), gera-se na superfície de aquisição uma matriz de energia correspondente a amplitude de iluminação para cada alvo. Essa matriz depende apenas do ponto de excitação e dos contrastes de impedância acústica acima de sua posição em profundidade, de sorte que necessita ser calculada apenas uma vez. Outro aspecto importante é que a superfície de aquisição relativa a cada ponto de iluminação é uma fração da área total do levantamento sísmico, como vimos na Tabela 3.7 do Capítulo 3, o que por si só implica redução de custo computacional.

Por fim, realiza-se a aquisição sísmica para cada geometria validada pela inversão utilizando o algoritmo de base mista. Cada uma delas coletará um valor de iluminação na superfície de matriz de energia pré-calculada, permitindo assim a avaliação quantitativa e a

reordenação dos melhores desenhos, combinando os dois critérios: atendimento aos objetivos geológicos, geofísicos e operacionais da fase de inversão e a maximização da energia de iluminação. A ideia central deste trabalho, inverter os parâmetros de aquisição que contemplem as informações críticas oriundas do processamento, interpretação e reservatório e ao mesmo tempo predizer o sucesso dessa geometria nas etapas seguintes da cadeia exploratória tem o ciclo fechado nesta etapa.

A metodologia utilizada para realizar o estudo de iluminação é composta de duas fases:

- Estimção da amplitude de iluminação nos pontos alvo utilizando a solução da equação acústica completa da onda pelo método de diferenças finitas, e
- Avaliação da energia de iluminação para cada geometria.

4.1 Iluminação Orientada ao Alvo

A metodologia proposta usa as etapas descritas em Alves et al. (2008), em que o Método das Diferenças Finitas é utilizado para resolver a equação acústica completa da onda e estimar a função de *Green* para os pontos imagem.

A iluminação desses pontos pode então ser calculada com base em uma condição de imagem empregada nos métodos de migração sísmica, fornecendo a estimativa que precisamos para definir a qualidade da imagem para cada geometria de aquisição validada na etapa de inversão base mista.

A condição de imagem que correlaciona os campos de onda ascendente e descendente na posição da imagem \mathbf{r} é dada por

$$R(\mathbf{r}) = \sum_{t=0}^{t_{max}} A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R, t) D(\mathbf{r}, \mathbf{r}_F, t), \quad (4.1)$$

onde R é a imagem gerada em profundidade avaliada no tempo total de propagação ($t = 0$ até o tempo máximo t_{max}), \mathbf{r} , \mathbf{r}_R e \mathbf{r}_F são as posições da imagem, receptor e fonte, e A e D são, respectivamente os campos de onda ascendente e descendente.

Como a solução deve ser implementada para qualquer modelo geológico, a solução analítica para a função de Green é inviável. Faz-se, então uma avaliação numérica desta função através do método de diferenças finitas.

Um outro ponto importante diz respeito ao cálculo do campo de onda ascendente durante a depropagação (Wapenaar e Berkhout, 1989). Como desejamos avaliar a energia no

ponto imagem até a superfície, deve-se retirar o efeito dos contrastes de impedância abaixo desse ponto. Utiliza-se uma condição de contorno não reflexiva também na superfície do modelo de velocidades para evitar as múltiplas dessa interface.

Para um par fonte-receptor, a avaliação da energia de iluminação do ponto imagem pode ser obtida substituindo os campos de onda A e D na Equação (4.1) por uma estimativa da energia que chega no ponto, através da equação:

$$I(\mathbf{r}) \cong E_A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_f) \cdot E_D(\mathbf{r}, \mathbf{r}_r), \quad (4.2)$$

onde I é a energia de iluminação no ponto \mathbf{r} , e E_A e E_D são, respectivamente, as energias dos campos de onda ascendente e descendente no ponto imagem.

Os cálculos dos campos de ondas ascendente (A), e descendente (D), na condição de imagem dada pela Equação (4.1) envolvem duas extrapolações, a direta e a reversa, onde só então calcularíamos as energia E_A e E_D . O custo computacional dessas extrapolações por diferenças finitas é alto, de sorte que valendo-se do fato de que na metodologia adotada o ponto imagem é o ponto de iluminação, pode-se utilizar o Princípio da Reciprocidade para calcular os campos ascendente e descendente através da extrapolação do campo de ondas a partir do próprio ponto de iluminação. A matriz de energia pode, então, ser obtida através da soma dos quadrados das amplitudes do campo de pressão, P , na posição \mathbf{r} :

$$E(\mathbf{r}) = \sum_{t=0}^{t_{max}} \{P(\mathbf{r}, t)\}^2. \quad (4.3)$$

Em suma, localiza-se a fonte no ponto do iluminação e o registro do sinal sísmico na posições de fontes e receptores. Calcula-se a extrapolação do campo de ondas a partir do ponto de iluminação no modelo de velocidade, obtendo-se a matriz de energia na superfície discretizada do modelo.

Considerando o mesmo ponto de iluminação, o somatório das contribuições de todas as energias de iluminação, Equação (4.2), de tiros e seus correspondentes dispositivos de registro para uma dada geometria pode então ser avaliado. Ou seja, pode-se comparar quantitativamente a qualidade da aquisição de várias geometrias para o mesmo ponto de interesse.

Na próxima seção aplicaremos essa metodologia ao desenho de aquisição do 3D FAV/RI/RBU.

4.2 Resultados da Iluminação Orientada ao Alvo

O estudo de iluminação orientada ao alvo foi aplicado aos objetivos do trabalho, em duas etapas:

- Geração das matrizes de energia correspondente aos pontos alvos descritos no Capítulo 3, Tabela 3.7, Figura 3.5. Usamos os três modelos de velocidade construídos a fim de analisar sua influência na configuração da matriz de energia e na determinação do melhor desenho de aquisição. A extrapolação do campo de ondas foi realizado por um esquema de diferenças finitas com aproximação de segunda ordem no tempo e décima segunda ordem no espaço, no tempo máximo da aquisição, 5 s. Essa etapa foi paralelizada em linguagem de programação C, sendo usados 15 nós com total de 29 processadores (x86_64 @ 2.86 GHz, 23.41 GHz de RAM). O tempo de geração da matriz de energia para cada ponto alvo foi da ordem de 12 min.
- Realizamos as simulações das 50 melhores geometrias, obtendo para cada uma a energia de iluminação para os pontos alvos. Ressubmetemos esse conjunto a um novo critério de desempenho, alinhando as fases de inversão base mista e iluminação orientada ao alvo a fim de obter o ordenamento final dos desenhos de aquisição. Esta etapa não foi paralelizada e, para cada geometria, o tempo de máquina para calcular a energia de iluminação foi de aproximadamente 10 s.

O critério de avaliação final levou em conta a soma ponderada normalizada dos desempenhos obtido na etapa anterior e das energias de iluminação obtidas para os objetivos principais raso e profundo nos três campos. Os resultados das melhores geometrias foram tabulados seguindo quatro critérios, para melhor comparação:

- Resultado ordenado com base apenas no desempenho da inversão base mista (Ordem Inversão Base Mista);
- Resultado ordenado com 50 % de peso no desempenho da inversão base mista e 50 % de peso distribuído igualmente nas energias de iluminação (50 % Inversão Base Mista);
- Resultado ordenado com peso distribuído igualmente entre o desempenho da inversão base mista e energias de iluminação (Todos com mesmo peso), e
- Resultado ordenado com base apenas nas energias de iluminação, ponderadas igualmente (0 % Inversão Base Mista).

A Figura 4.1 mostra os mapas de iluminação no modelo local para o campo de FAV. Na primeira coluna, Figuras 4.1(a), 4.1(d) e 4.1(g), tem-se o resultado para o modelo de velocidade constante (Modelo 3). Na segunda coluna, Figuras 4.1(b), 4.1(e) e 4.1(h), tem-se o resultado para o modelo com velocidade linear (Modelo 2) e a terceira coluna, Figuras 4.1(c), 4.1(f) e 4.1(i) mostra o resultados para o modelo de velocidade intervalar em profundidade (Modelo1). As Figuras 4.2 e 4.3 seguem o mesmo esquema, agora para o campo de RI e RBU.

Em todas elas, círculos concêntricos de 1 km de raio foram desenhados ao redor do ponto local de iluminação para servir de referência não só ao padrão de espalhamento de energia, mas também a sua área de abrangência. Para todos os casos, vemos como a complexidade do modelo de velocidades afeta o padrão das curvas.

Pode-se ver que:

- O campo de FAV foi aquele que apresentou a menor diferença na configuração da matriz de energia nos três modelos de velocidade. Considerando que nessa área os objetivos são mais rasos, houve menos influência das variações de velocidade e da topografia dos refletores;
- Nos horizontes mais rasos, de referência e alvo, não houve diferenças significativas no padrão de iluminação obtido. No horizonte mais profundo, os padrões já sofrem bastante diferenciação, especialmente no campo de RBU, mais profundo e onde as variações de velocidade são mais significativas;
- Os máximos de energia em superfície se deslocam do ponto de iluminação à medida que ele se aprofunda. Mais uma vez é digno de nota o padrão diferenciado do RBU, mostrando a importância deste tipo de estudo quando o ponto a ser iluminado está abaixo de uma área de geologia complexa, e
- Os modelos de velocidade constante e linear não exibem comportamento muito discrepantes, mas este último se aproxima mais do modelo de velocidade complexo, não só na distribuição geral de energia dentro dos círculos como na forma das anomalias, de sorte que apenas esses dois foram utilizados para o cálculo da energia de iluminação dos melhores desenhos.

As Tabelas 4.1 e 4.2 trazem a ordenação das melhores geometrias, associando seus desempenhos no processo de inversão base mista a seus indicadores de energia quando o experimento sísmico de aquisição com iluminação orientada ao alvo é realizado. Os insumos dessa ordenação estão delineados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Os resultados mostram que a ordenação dos melhores parâmetros de aquisição foi bastante influenciada pela energia coletada por cada uma delas na superfície de aquisição, um dos objetivos que norteou o estudo desse trabalho.

Estamos selecionando um conjunto de boas geometrias e, já no processo de determinar quais parâmetros são mais adequados ao estudo da área, estimando a qualidade da aquisição para fins de iluminação dos alvos.

Houve uma modificação significativa dos melhores desenhos, quando se compara inversão sem e com estudo de iluminação. A melhor geometria, no sentido de atendimento aos valores alvos definidos e critérios de restrição, ocupa a décima primeira posição quando se leva em consideração a energia de iluminação nos pontos de interesse com ponderação meio a meio (segunda coluna da Tabela 4.1).

As geometrias de número 4 e 9 permitem uma boa comparação pois, à exceção do intervalo de linha de registro, os parâmetros de aquisição são os mesmos. Apesar disso, a quarta geometria atendeu melhor não só no desempenho da inversão base mista como na energia de iluminação nos alvos.

Os critérios de ponderação utilizados, embora tenham modificado a ordem dos melhores parâmetros, não o fizeram em geral de forma significativa com reocupações na vizinhança das posições originais. A análise da segunda e trigésima quarta geometrias mostra que, à medida que se deixa de pesar o resultado da inversão base mista elas têm tendência inversa na posição de ordenação.

A influência da complexidade do modelo de velocidade no resultado pode ser feita analisando em conjunto as Tabelas 4.1 e 4.2. Para o caso do 3D FAV/RI/RBU, pode-se concluir que as ordenações finais considerando as iluminações realizadas nos pontos alvo não sofreu influência capital do modelo de velocidade, com flutuações de pouca monta entre os resultados dos dois modelos. Essa é outra conclusão importante, de que deve-se sempre realizar o estudo de iluminação, mesmo quando não se tem mapeado um modelo de velocidade tão complexo quanto no caso do 3D executado.

Os resultados mostram que a otimização dos parâmetros de aquisição utilizando a algoritmo base mista foi uma etapa importante no processo de desenho de aquisição, e que a escolha final das melhores geometrias foi bastante influenciada pelos estudos de iluminação, mesmo quando o modelo de velocidade ainda não é o mais completo. Embora esse resultado seja específico do estudo realizado, leva-se para a frente esse direcionamento quando da feitura de um projeto aquisição sísmica.

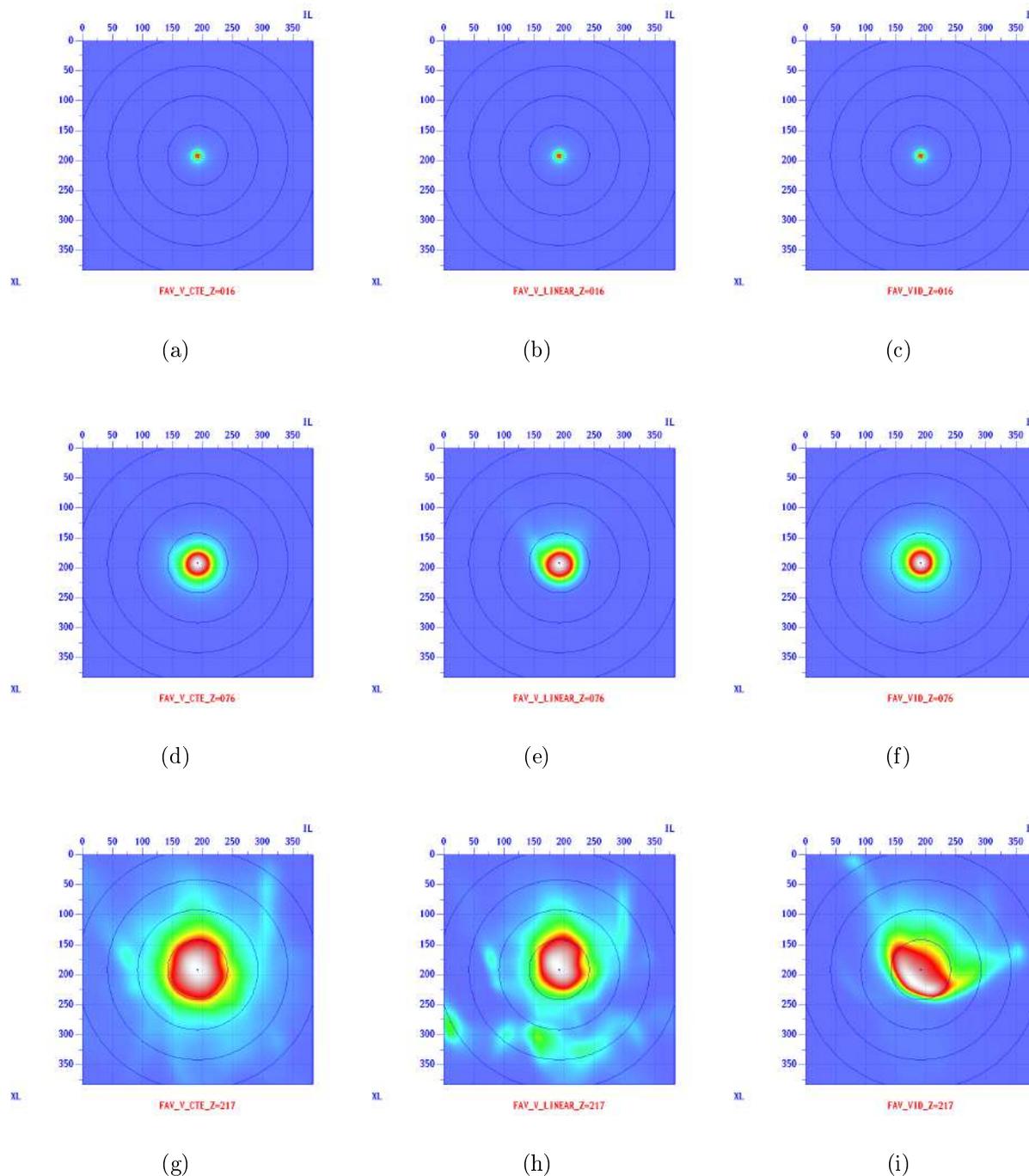


Figura 4.1: Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de FAV para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 192 e na cross-line 192 (modelo local), equivalente à posição (270,427) no modelo global.

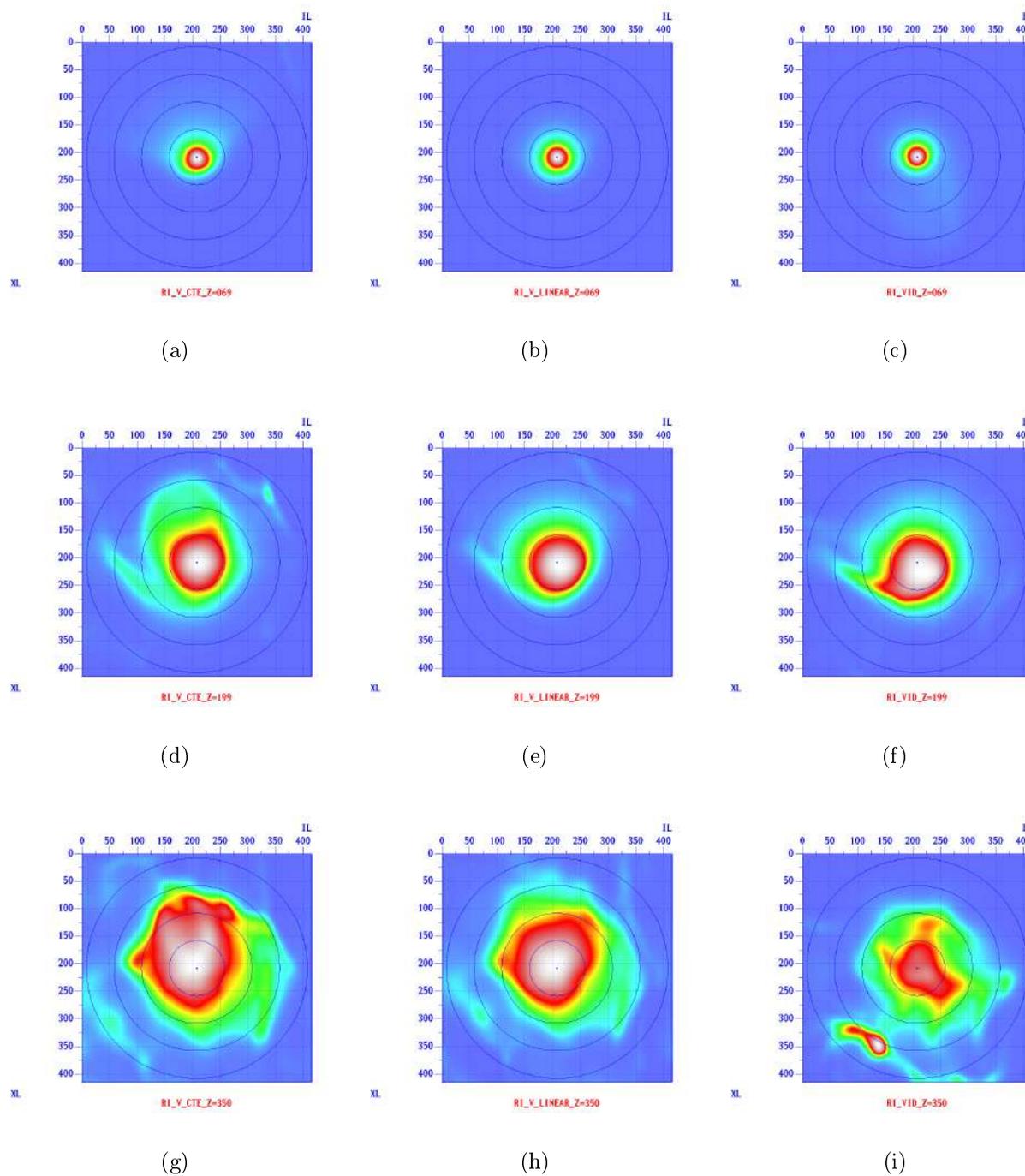


Figura 4.2: Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de RI para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 208 e na cross-line 208 (modelo local), equivalente à posição (260,258) no modelo global.

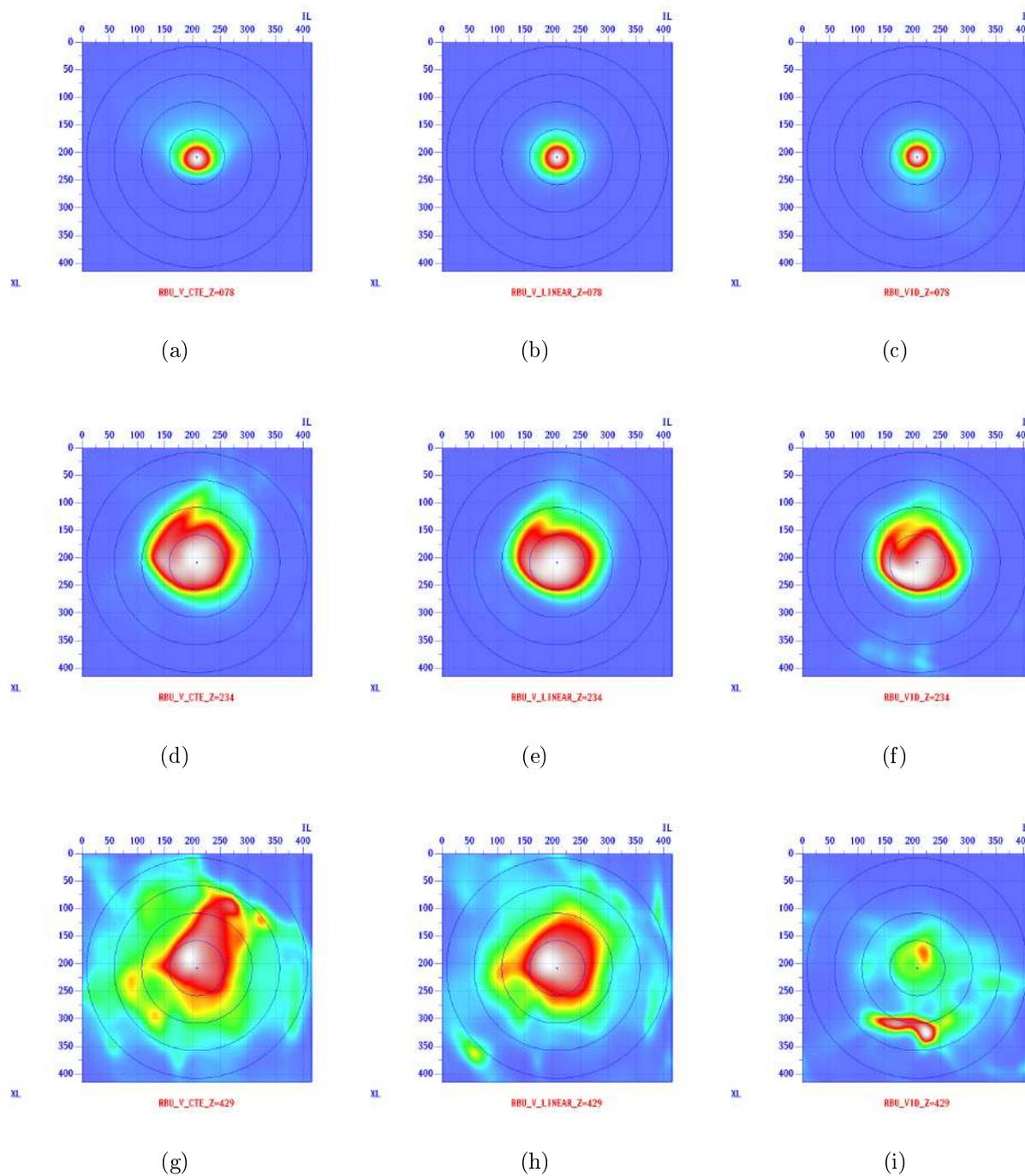


Figura 4.3: Mapas de iluminação no ponto alvo do campo de RBU para os três modelos de velocidade. Estão sendo considerados o horizonte mais raso para referência de energia de iluminação e os horizontes principais raso e profundo para o campo. O ponto de iluminação está localizado na in-line 208 e na cross-line 208 (modelo local) equivalente à posição (208,258) no modelo global.

| Ordenação das 50 melhores geometrias com o estudo de iluminação | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Ordem Inversão Base Mista | 50 % Inversão Base Mista | Todos com mesmo peso | 0 % Inversão Base Mista |
| 1 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 9 | 9 | 9 |
| 3 | 7 | 7 | 7 |
| 4 | 8 | 8 | 8 |
| 5 | 5 | 5 | 23 |
| 6 | 23 | 23 | 5 |
| 7 | 17 | 17 | 17 |
| 8 | 12 | 12 | 12 |
| 9 | 14 | 14 | 14 |
| 10 | 10 | 10 | 10 |
| 11 | 1 | 32 | 32 |
| 12 | 32 | 1 | 26 |
| 13 | 26 | 26 | 1 |
| 14 | 3 | 19 | 19 |
| 15 | 19 | 3 | 3 |
| 16 | 15 | 15 | 15 |
| 17 | 2 | 21 | 21 |
| 18 | 21 | 16 | 16 |
| 19 | 16 | 2 | 40 |
| 20 | 11 | 34 | 34 |
| 21 | 6 | 40 | 2 |
| 22 | 34 | 11 | 11 |
| 23 | 40 | 35 | 35 |
| 24 | 35 | 28 | 28 |
| 25 | 28 | 29 | 29 |
| 26 | 29 | 6 | 43 |
| 27 | 24 | 43 | 6 |
| 28 | 43 | 24 | 24 |
| 29 | 39 | 39 | 39 |
| 30 | 31 | 31 | 31 |
| 31 | 25 | 25 | 25 |
| 32 | 18 | 18 | 42 |
| 33 | 42 | 42 | 18 |
| 34 | 37 | 37 | 37 |
| 35 | 13 | 38 | 38 |
| 36 | 38 | 13 | 33 |
| 37 | 33 | 33 | 13 |
| 38 | 27 | 27 | 27 |
| 39 | 22 | 47 | 47 |
| 40 | 47 | 49 | 49 |
| 41 | 44 | 22 | 44 |
| 42 | 20 | 44 | 22 |
| 43 | 49 | 45 | 45 |
| 44 | 45 | 20 | 20 |
| 45 | 41 | 41 | 41 |
| 46 | 36 | 36 | 36 |
| 47 | 30 | 50 | 50 |
| 48 | 50 | 30 | 30 |
| 49 | 48 | 48 | 48 |
| 50 | 46 | 46 | 46 |

Tabela 4.1: 50 melhores geometrias reordenadas com base no estudo de iluminação orientado ao alvo, com base nos quatro critérios definidos. Modelo com velocidade em profundidade (Modelo 1).

| Ordenação das 50 melhores geometrias com o estudo de iluminação | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Ordem Inversão Base Mista | 50 % Inversão Base Mista | Todos com mesmo peso | 0 % Inversão Base Mista |
| 1 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 9 | 9 | 9 |
| 3 | 7 | 7 | 7 |
| 4 | 8 | 8 | 8 |
| 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 23 | 23 | 23 |
| 7 | 17 | 17 | 17 |
| 8 | 12 | 12 | 12 |
| 9 | 14 | 14 | 14 |
| 10 | 1 | 10 | 10 |
| 11 | 10 | 1 | 32 |
| 12 | 32 | 32 | 1 |
| 13 | 3 | 26 | 26 |
| 14 | 26 | 19 | 19 |
| 15 | 19 | 3 | 3 |
| 16 | 15 | 15 | 15 |
| 17 | 2 | 21 | 21 |
| 18 | 21 | 2 | 16 |
| 19 | 16 | 16 | 2 |
| 20 | 11 | 34 | 34 |
| 21 | 6 | 11 | 40 |
| 22 | 34 | 40 | 11 |
| 23 | 28 | 28 | 28 |
| 24 | 40 | 35 | 35 |
| 25 | 35 | 6 | 29 |
| 26 | 29 | 29 | 43 |
| 27 | 24 | 43 | 6 |
| 28 | 43 | 24 | 24 |
| 29 | 39 | 39 | 39 |
| 30 | 31 | 31 | 31 |
| 31 | 25 | 25 | 25 |
| 32 | 18 | 42 | 42 |
| 33 | 42 | 18 | 18 |
| 34 | 37 | 37 | 37 |
| 35 | 13 | 38 | 38 |
| 36 | 38 | 13 | 13 |
| 37 | 33 | 33 | 33 |
| 38 | 27 | 27 | 47 |
| 39 | 22 | 47 | 27 |
| 40 | 47 | 49 | 49 |
| 41 | 44 | 22 | 44 |
| 42 | 20 | 44 | 22 |
| 43 | 49 | 20 | 45 |
| 44 | 45 | 45 | 20 |
| 45 | 41 | 41 | 41 |
| 46 | 36 | 36 | 36 |
| 47 | 30 | 50 | 50 |
| 48 | 50 | 30 | 30 |
| 49 | 48 | 48 | 48 |
| 50 | 46 | 46 | 46 |

Tabela 4.2: 50 melhores geometrias reordenadas com base no estudo de iluminação orientado ao alvo, com base nos quatro critérios definidos. Modelo de velocidade com variação linear entre horizontes (Modelo 2).

| Ordenação das 50 melhores geometrias com o estudo de iluminação | | | | | | | |
|---|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Ordem | Inversão Base | b | 50 % Inversão | Todos | 0 % Inversão | | |
| | 0.921 428 | $2.155\,022 \times 10^{17}$ | $6.567\,106 \times 10^{16}$ | $1.760\,464 \times 10^{17}$ | $5.219\,167 \times 10^{16}$ | $2.330\,001 \times 10^{17}$ | $2.685\,505 \times 10^{16}$ |
| | 1.000 000 | 0.838 227 | 0.832 246 | 0.829 319 | 0.818 882 | 0.827 404 | 0.817 170 |
| | 0.998 173 | 0.772 351 | 0.772 080 | 0.769 723 | 0.767 762 | 0.768 630 | 0.767 686 |
| | 0.997 676 | 0.790 231 | 0.811 694 | 0.810 543 | 0.808 570 | 0.806 805 | 0.807 484 |
| | 0.995 457 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 |
| | 0.994 459 | 0.907 480 | 0.913 568 | 0.910 847 | 0.906 672 | 0.908 985 | 0.904 649 |
| | 0.993 638 | 0.726 882 | 0.752 103 | 0.751 641 | 0.757 596 | 0.748 677 | 0.757 917 |
| | 0.993 461 | 0.946 327 | 0.970 532 | 0.971 843 | 0.964 830 | 0.967 261 | 0.960 093 |
| | 0.990 874 | 0.910 122 | 0.920 147 | 0.917 077 | 0.928 095 | 0.918 283 | 0.930 479 |
| | 0.989 892 | 0.949 599 | 0.978 240 | 0.979 812 | 0.988 478 | 0.977 740 | 0.989 716 |
| | 0.989 420 | 0.827 995 | 0.839 981 | 0.837 954 | 0.841 216 | 0.836 843 | 0.843 273 |
| | 0.987 552 | 0.754 354 | 0.767 511 | 0.766 476 | 0.764 361 | 0.763 438 | 0.763 359 |
| | 0.987 391 | 0.859 845 | 0.892 336 | 0.891 436 | 0.895 789 | 0.887 800 | 0.894 318 |
| | 0.985 454 | 0.670 994 | 0.666 268 | 0.665 805 | 0.656 227 | 0.662 311 | 0.654 952 |
| | 0.985 434 | 0.829 957 | 0.845 743 | 0.843 280 | 0.859 929 | 0.844 722 | 0.866 133 |
| | 0.984 534 | 0.780 323 | 0.812 353 | 0.812 190 | 0.809 524 | 0.807 039 | 0.807 404 |
| | 0.983 634 | 0.756 712 | 0.773 621 | 0.772 384 | 0.783 304 | 0.771 711 | 0.786 800 |
| | 0.983 416 | 0.862 403 | 0.899 189 | 0.897 995 | 0.917 027 | 0.896 855 | 0.919 748 |
| | 0.981 530 | 0.691 519 | 0.708 756 | 0.708 270 | 0.711 445 | 0.705 687 | 0.713 803 |
| | 0.980 616 | 0.783 110 | 0.819 557 | 0.819 228 | 0.830 562 | 0.816 284 | 0.833 346 |
| | 0.980 435 | 0.618 433 | 0.617 950 | 0.618 103 | 0.615 495 | 0.615 297 | 0.615 152 |
| | 0.979 262 | 0.758 216 | 0.778 375 | 0.776 897 | 0.799 976 | 0.778 656 | 0.806 671 |
| | 0.979 156 | 0.632 820 | 0.649 652 | 0.650 794 | 0.648 141 | 0.645 889 | 0.646 966 |
| | 0.979 054 | 0.864 073 | 0.904 586 | 0.903 017 | 0.935 761 | 0.904 473 | 0.941 734 |
| | 0.977 568 | 0.712 490 | 0.748 067 | 0.748 429 | 0.754 536 | 0.743 867 | 0.754 061 |
| | 0.977 214 | 0.693 364 | 0.713 987 | 0.713 281 | 0.728 192 | 0.712 821 | 0.734 429 |
| | 0.976 249 | 0.785 010 | 0.825 300 | 0.824 667 | 0.849 148 | 0.824 039 | 0.855 846 |
| | 0.974 960 | 0.635 056 | 0.655 426 | 0.656 484 | 0.665 069 | 0.653 368 | 0.668 235 |
| | 0.973 363 | 0.756 562 | 0.761 747 | 0.760 210 | 0.756 334 | 0.757 798 | 0.755 290 |
| | 0.973 247 | 0.714 796 | 0.754 193 | 0.754 315 | 0.773 154 | 0.751 880 | 0.777 121 |
| | 0.972 525 | 0.582 588 | 0.602 294 | 0.603 551 | 0.607 645 | 0.599 349 | 0.607 614 |
| | 0.972 471 | 0.694 558 | 0.717 989 | 0.716 820 | 0.742 347 | 0.718 743 | 0.751 114 |
| | 0.971 520 | 0.786 297 | 0.829 759 | 0.828 792 | 0.865 236 | 0.830 571 | 0.874 678 |
| | 0.970 258 | 0.636 487 | 0.659 878 | 0.660 757 | 0.680 026 | 0.659 576 | 0.686 116 |
| | 0.969 100 | 0.759 118 | 0.768 488 | 0.766 806 | 0.777 049 | 0.766 960 | 0.781 347 |
| | 0.968 502 | 0.716 289 | 0.758 789 | 0.758 712 | 0.789 581 | 0.758 537 | 0.796 664 |
| | 0.967 929 | 0.584 405 | 0.607 106 | 0.608 372 | 0.622 967 | 0.605 932 | 0.626 189 |
| | 0.966 022 | 0.690 343 | 0.700 380 | 0.699 344 | 0.702 109 | 0.697 686 | 0.703 568 |
| | 0.965 159 | 0.637 458 | 0.663 228 | 0.663 942 | 0.692 545 | 0.664 741 | 0.700 491 |
| | 0.965 111 | 0.716 968 | 0.743 914 | 0.743 952 | 0.747 236 | 0.740 043 | 0.746 661 |
| | 0.963 423 | 0.717 314 | 0.762 358 | 0.761 978 | 0.803 914 | 0.764 196 | 0.812 713 |
| | 0.962 856 | 0.585 523 | 0.610 639 | 0.611 954 | 0.636 099 | 0.611 399 | 0.641 655 |
| | 0.961 279 | 0.692 294 | 0.706 071 | 0.704 766 | 0.720 844 | 0.705 591 | 0.726 041 |
| | 0.960 380 | 0.719 473 | 0.750 609 | 0.750 463 | 0.768 105 | 0.748 992 | 0.772 340 |
| | 0.958 206 | 0.631 093 | 0.644 987 | 0.645 922 | 0.652 460 | 0.643 555 | 0.656 375 |
| | 0.957 416 | 0.586 198 | 0.613 332 | 0.614 515 | 0.647 381 | 0.615 898 | 0.654 042 |
| | 0.955 025 | 0.576 925 | 0.589 913 | 0.590 800 | 0.592 231 | 0.587 096 | 0.592 023 |
| | 0.952 999 | 0.632 574 | 0.649 647 | 0.650 484 | 0.668 597 | 0.650 340 | 0.675 759 |
| | 0.950 009 | 0.578 837 | 0.595 348 | 0.596 136 | 0.608 986 | 0.594 372 | 0.612 996 |
| | 0.944 753 | 0.649 297 | 0.654 117 | 0.654 702 | 0.650 715 | 0.651 279 | 0.651 474 |
| | 0.944 355 | 0.580 059 | 0.599 300 | 0.599 926 | 0.623 108 | 0.600 227 | 0.629 589 |

Tabela 4.3: Valores usados para definir a ordenação final das melhores geometrias, com iluminação realizada no modelo de velocidade em profundidade. A primeira linha contém o valor máximo, com o qual foi feita a normalização em cada coluna.

| Valores de desempenho e de iluminação para as 50 melhores geometrias | | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Desempenho base mista | Ilum FAV raso | Ilum Fav prof | Ilum RI raso | Ilum RI prof | Ilum RBU raso | Ilum RBU prof |
| 0.921 428 | $6.891\,566 \times 10^{16}$ | $3.603\,068 \times 10^{15}$ | $3.286\,118 \times 10^{15}$ | $1.807\,779 \times 10^{16}$ | $2.829\,399 \times 10^{15}$ | $1.975\,593 \times 10^{15}$ |
| 1.000 000 | 0.843 759 | 0.822 953 | 0.822 205 | 0.831 159 | 0.824 870 | 0.817 406 |
| 0.998 173 | 0.774 382 | 0.768 794 | 0.768 663 | 0.770 600 | 0.775 653 | 0.768 194 |
| 0.997 676 | 0.774 783 | 0.798 726 | 0.812 492 | 0.808 362 | 0.814 474 | 0.810 033 |
| 0.995 457 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 000 |
| 0.994 459 | 0.904 371 | 0.903 586 | 0.907 806 | 0.911 496 | 0.908 516 | 0.905 325 |
| 0.993 638 | 0.709 008 | 0.745 277 | 0.759 192 | 0.748 516 | 0.764 820 | 0.760 242 |
| 0.993 461 | 0.926 031 | 0.950 812 | 0.969 180 | 0.969 857 | 0.969 972 | 0.963 914 |
| 0.990 874 | 0.905 775 | 0.924 053 | 0.926 404 | 0.917 306 | 0.924 944 | 0.929 726 |
| 0.989 892 | 0.927 693 | 0.973 821 | 0.989 641 | 0.976 774 | 0.988 411 | 0.991 258 |
| 0.989 420 | 0.821 107 | 0.836 901 | 0.842 727 | 0.837 110 | 0.843 336 | 0.843 265 |
| 0.987 552 | 0.745 584 | 0.758 377 | 0.766 508 | 0.765 129 | 0.773 398 | 0.765 885 |
| 0.987 391 | 0.836 474 | 0.878 846 | 0.897 878 | 0.888 092 | 0.897 668 | 0.896 304 |
| 0.985 454 | 0.675 165 | 0.662 605 | 0.663 923 | 0.665 526 | 0.664 822 | 0.658 745 |
| 0.985 434 | 0.822 275 | 0.855 230 | 0.858 921 | 0.841 954 | 0.856 906 | 0.865 408 |
| 0.984 534 | 0.755 778 | 0.792 808 | 0.814 658 | 0.808 485 | 0.816 990 | 0.811 196 |
| 0.983 634 | 0.746 832 | 0.776 504 | 0.782 805 | 0.770 314 | 0.788 794 | 0.787 937 |
| 0.983 416 | 0.837 873 | 0.899 281 | 0.916 194 | 0.893 824 | 0.913 558 | 0.920 515 |
| 0.981 530 | 0.679 839 | 0.706 623 | 0.715 264 | 0.705 776 | 0.719 239 | 0.716 516 |
| 0.980 616 | 0.757 260 | 0.813 243 | 0.832 915 | 0.814 481 | 0.832 973 | 0.834 572 |
| 0.980 435 | 0.619 648 | 0.620 316 | 0.619 964 | 0.616 985 | 0.621 030 | 0.619 524 |
| 0.979 262 | 0.747 787 | 0.792 596 | 0.796 964 | 0.774 336 | 0.798 351 | 0.806 758 |
| 0.979 156 | 0.619 943 | 0.643 519 | 0.656 360 | 0.647 324 | 0.655 874 | 0.652 519 |
| 0.979 054 | 0.838 953 | 0.916 794 | 0.931 874 | 0.898 339 | 0.927 145 | 0.942 510 |
| 0.977 568 | 0.686 005 | 0.735 895 | 0.757 532 | 0.743 366 | 0.762 513 | 0.757 864 |
| 0.977 214 | 0.680 879 | 0.722 079 | 0.729 460 | 0.710 145 | 0.732 541 | 0.735 987 |
| 0.976 249 | 0.758 422 | 0.830 887 | 0.848 908 | 0.819 141 | 0.846 415 | 0.856 397 |
| 0.974 960 | 0.621 101 | 0.659 900 | 0.671 860 | 0.652 169 | 0.669 879 | 0.671 848 |
| 0.973 363 | 0.753 733 | 0.754 185 | 0.757 573 | 0.760 116 | 0.765 107 | 0.757 711 |
| 0.973 247 | 0.687 232 | 0.753 851 | 0.773 269 | 0.748 458 | 0.777 689 | 0.779 599 |
| 0.972 525 | 0.567 383 | 0.601 304 | 0.612 495 | 0.599 343 | 0.612 331 | 0.613 232 |
| 0.972 471 | 0.681 665 | 0.735 991 | 0.741 785 | 0.713 477 | 0.743 771 | 0.753 462 |
| 0.971 520 | 0.759 315 | 0.846 536 | 0.862 652 | 0.822 830 | 0.857 522 | 0.875 863 |
| 0.970 258 | 0.621 995 | 0.674 340 | 0.685 146 | 0.655 836 | 0.681 685 | 0.689 824 |
| 0.969 100 | 0.755 070 | 0.774 314 | 0.775 851 | 0.765 781 | 0.782 136 | 0.781 878 |
| 0.968 502 | 0.688 182 | 0.769 685 | 0.787 218 | 0.752 414 | 0.790 422 | 0.798 314 |
| 0.967 929 | 0.568 370 | 0.616 553 | 0.626 342 | 0.603 431 | 0.624 778 | 0.630 999 |
| 0.966 022 | 0.684 480 | 0.700 483 | 0.704 856 | 0.698 190 | 0.708 836 | 0.706 530 |
| 0.965 159 | 0.622 650 | 0.686 715 | 0.692 303 | 0.658 486 | 0.691 481 | 0.704 571 |
| 0.965 111 | 0.697 277 | 0.733 529 | 0.749 362 | 0.740 483 | 0.755 430 | 0.750 568 |
| 0.963 423 | 0.688 873 | 0.782 901 | 0.798 946 | 0.755 420 | 0.797 549 | 0.815 301 |
| 0.962 856 | 0.569 099 | 0.628 859 | 0.638 021 | 0.606 547 | 0.635 134 | 0.646 887 |
| 0.961 279 | 0.685 618 | 0.717 871 | 0.720 369 | 0.702 806 | 0.723 606 | 0.728 017 |
| 0.960 380 | 0.698 630 | 0.753 458 | 0.767 312 | 0.746 120 | 0.772 255 | 0.774 156 |
| 0.958 206 | 0.622 474 | 0.651 373 | 0.658 013 | 0.642 514 | 0.657 668 | 0.660 196 |
| 0.957 416 | 0.569 592 | 0.639 477 | 0.647 769 | 0.608 875 | 0.643 563 | 0.660 248 |
| 0.955 025 | 0.566 504 | 0.589 941 | 0.597 714 | 0.587 724 | 0.597 239 | 0.597 830 |
| 0.952 999 | 0.623 398 | 0.666 720 | 0.672 426 | 0.646 363 | 0.670 448 | 0.678 440 |
| 0.950 009 | 0.567 593 | 0.606 921 | 0.613 004 | 0.592 224 | 0.610 943 | 0.617 334 |
| 0.944 753 | 0.646 403 | 0.653 165 | 0.657 539 | 0.652 805 | 0.658 776 | 0.656 082 |
| 0.944 355 | 0.568 361 | 0.621 246 | 0.625 698 | 0.595 481 | 0.622 034 | 0.633 730 |

Tabela 4.4: Valores usados para definir a ordenação final das melhores geometrias com iluminação realizada no modelo de velocidade linear. A primeira linha contém o valor máximo, com o qual foi feita a normalização em cada coluna.

5

Conclusões

Neste trabalho, propôs-se uma abordagem integrada para o desenho de aquisições sísmicas 3D terrestres utilizando conjuntamente um algoritmo de inversão base mista e uma metodologia de iluminação orientada ao alvo. Através da inversão dos parâmetros da geometria com o algoritmo de base mista foi possível contemplar os requisitos qualitativos e quantitativos associados ao processo de aquisição de dados e aos objetivos do processamento e interpretação sísmicas, bem como do reservatório. Com a metodologia de iluminação orientada ao alvo, introduziu-se na escolha das melhores geometrias um indicador quantitativo associado à qualidade de iluminação.

No Capítulo 1 foram estabelecidos os principais aspectos associados ao projeto de uma aquisição sísmica, e estabelecidas as principais definições da geometria 3D terrestre ortogonal, usada como base nos estudos realizados. Com isso, foi possível especificar com mais propriedade os insumos necessários e os procedimentos a serem adotados na etapa de inversão. Assim, foi possível reparametrizar os elementos que definem a geometria 3D ortogonal terrestre para uso na inversão via algoritmo base mista.

No Capítulo 2 a área de estudo foi apresentada e foram delineadas as informações geológicas e geofísicas dos campos de estudo e do dados sísmico disponível. Pôde-se assim determinar os horizontes alvos, suas informações geofísicas de interesse e iniciar a definição quantitativa dos valores alvo e dos critérios de restrição necessários para o desenho de aquisição via inversão.

A grande quantidade de informações disponíveis permitiu a construção de um modelo de velocidade intervalar em profundidade, crucial para o estudo de iluminação. Para verificar a sensibilidade desse modelo no resultado integrado da inversão com iluminação orientada

ao alvo, esta foi realizada em todos os pontos de interesse em três modelos distintos. No original, contemplando as variações horizontais e verticais do campo de velocidade, e em dois outros, derivados deste: no primeiro, há apenas variação vertical de velocidade e no segundo o campo é constante entre horizontes.

No Capítulo 3, o algoritmo de base mista que desenvolvemos foi apresentado e adequado ao problema do desenho de aquisição sísmica. A facilidade de geração dos modelos a serem testados, o baixo custo computacional associado a avaliação da função objetivo e a facilidade ao inserir critérios de restrição geológicos, geofísicos e operacionais caracterizam a flexibilidade e potencialidade do método. Ademais, a descrição do algoritmo base mista de inversão permite sua extensão e uso em outros problemas geofísicos de natureza similar a apresentada, ou que se valham de condições de facilidade de avaliação da função objetivo.

Na primeira fase, o algoritmo foi testado em um modelo sintético, onde todas as variáveis foram controladas. A pouca quantidade de dados de entrada e de critérios de restrição serviram para simular um caso inicial de uma campanha de aquisição sísmica. A possibilidade de obter e elencar as melhores geometrias por grau de desempenho e organizá-las de acordo com necessidade do usuário são pontos de destaque.

Por fim, aplicou-se o algoritmo no caso de estudo do 3D FAV/RI/RBU. A grande quantidade de informações disponíveis reduziu sobremaneira o número de geometrias válidas, dado que os critérios aplicados a um projeto de uma campanha exploratória são bastante restritivos. Os modelos encontrados foram comparados com a geometria realizada, mostrando os pontos de melhoria obtidas com essa nova avaliação.

No Capítulo 4, definimos a metodologia de iluminação orientada ao alvo baseada na equação completa da onda usando métodos de diferenças finitas. Além de possuir as vantagens intrínsecas de poder atuar em contextos geológicos complexos, quando comparado aqueles que usam traçamento de raios, tem-se agregada a eficiência computacional com o uso do princípio da reciprocidade para o cálculo da matriz de energia de iluminação.

Essa redução no tempo de processamento propiciou o cálculo da energia coletada por cada geometria validada pela etapa de inversão na superfície do 3D FAV/RI/RBU. Obtivemos um efeito em cascata de economia computacional já que apenas os 50 melhores desenhos de aquisição sísmica foram avaliados no quesito iluminação; de outra forma, essa viria a ser a etapa de maior peso de processamento.

A importância de inserir na função de desempenho um critério qualitativo associado a energia dos pontos alvos ficou evidenciada na reordenação dos melhores desenhos de aquisição. Ou seja, obtivemos aquelas que atendiam aos critérios geológicos e geofísicos e mostra-

mos que a energia de iluminação é um fator de ponderação primordial na determinação dos requisitos de qualidade dos melhores modelos. Essa robustez na apreciação técnica é essencial para apreciar as diferenças, ainda que sutis, entre os vários desenhos de aquisição, além de fornecer mais elementos de peso dos fatores técnicos sobre os financeiros e operacionais.

Os resultados mostraram que, mesmo modelos mais simplificados do campo de velocidade, produzem resultados concretos na escolha da melhor geometria. E isso mesmo considerando as diferenças na configuração da matriz de energia do horizonte mais profundo de interesse, sujeita as variações mais expressivas da geologia. Esse resultado tem importância imediata nos estudos exploratórios, onde as informações são menos detalhadas

O estudo da influência da complexidade do modelo de velocidade na matriz de energia e na seleção dos melhores modelos mostrou que o estudo de iluminação pode influenciar significativamente o processo de desenhar uma aquisição sísmica. Isto valida a abordagem conjunta inversão através do algoritmo de base mista e iluminação orientada ao alvo em todas as fases que se disponha de informações de velocidades sísmicas.

Os trabalhos futuros incluem:

- Aplicação do algoritmo de inversão base mista em outras geometrias;
- Comparar as imagens em profundidade obtidas com um subconjunto das melhores geometrias;
- Extensão do estudo de iluminação para utilizar um critério quantitativo associado à seção sísmica migrada, incorporando o estado da arte como FWI e Least Square RTM;
- Estudar a aplicação da metodologia proposta para o desenho de aquisição sísmica utilizando ondas convertidas, onde não só a definição da geometria merecerá enfoque diferenciado, como as particularidades da propagação do campo, e pois, da matriz de energia.

Referências Bibliográficas

- Alves, G. C.; Bulcao, A.; Filho, D. M. S.; Theodoro, C. E.; Santos, L. A. e Guimaraes, M. A. G. (2008) Target oriented illumination analysis using wave equation, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **27**(1):163–167.
- Alves, G. C.; Bulcao, A.; Filho, D. M. S.; Theodoro, C. E. e Santos, L. A. (2009) Target oriented approach for illumination analysis using wave equation via FDM, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **28**(1):181–185.
- Anstey, N. (1986) Part1: Whatever happened to ground roll?, The Leading Edge, **5**(3):40–45.
- Bansal, R. e Gaiser, J. (2013) An introduction to this special section: Applications and challenges in shear-wave exploration, The Leading Edge, **32**(1):12–12.
- Brandão, A. T. (2015) Sedimentologia e Estratigrafia dos Turbiditos Lacustres da Formação Candeias no Nordeste da Bacia do Recôncavo, Bahia, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Calvert, R. (2005) Insights and Methods for 4D Reservoir Monitoring and Characterization, nº 8 In Distinguished Instructor Series, Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers.
- Cao, J. e Brewer, J. (2013) Critical reflection illumination analysis, Interpretation, **1**(1):T57–T61.
- Chang, T.; Canales, L.; Kue, C. e Shih, C. (2001) Optimization of acquisition design based on common reflection stack, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001*, pp. 70–73, San Antonio.
- Chaouch, A. e Mari, J. L. (2006) 3-d land seismic surveys: Definition of geophysical parameter, Oil Gas Science and Technology - Rev. IFP, **61**(4):1613–1621.
- Cordsen, A.; Galbraith, M. e Peirce, J. (2000) Planning Land 3-D Seismic Survey, nº 9 In Geophysical Developments Series, Society of Exploration Geophysicists.
- Dartigalongue, R.; Tyagi, T.; Hubans, C.; Brechet, E. e Ceragioli, E. (2011) 4D baseline

- acquisition feasibility study including optimization of 3D issues, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, pp. 152–156, San Antonio.
- DeGolyer, E. L. (1935) Notes on the early history of applied geophysics in the petroleum industry, *Jour. Soc. Pet. Geophys*, **6**(1):1–10.
- Dobrin, M. B. (1976) *Introduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill, 3^o edic..
- Gaiser, J.; Moldoveanu, N.; Macbeth, C.; Michelena, R. e Spitz, S. (2001) Multicomponent technology: the players, problems, applications, and trends: Summary of the workshop sessions, *The Leading Edge*, **20**(9):974–977.
- Góis, M. S. e Porsani, M. J. (2013) Proposta metodológica de otimização de parâmetros de aquisição de sísmica terrestre 3D: Aplicação nas bacias sedimentares brasileiras, In: *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, pp. 1181–1185, Rio de Janeiro.
- Hastings-James; Green, R. P.; Al-Saad, R. e Al-Ali, M. (2000) Wide-azimuth 3-D swath acquisition, *Geo-Arabia*, **5**(1):103–104.
- Heidari, G.; Aliemrani, M. e Hoseini, S. (2013) Enhancing seismic data acquisition by optimization of source parameter detection in a field test: Introducing the amplitude spectrum of multishot stack method, *The Leading Edge*, **32**(11):1390–1393.
- Johnson, S. G. e Frigo, M. (2007) A modified split-radix fft with fewer arithmetics operations, *IEEE Transactions on Signal Operations*, **55**(1):111–119.
- Kekre, H. B. e Gorty, V. R. L. (2013) Multiplication of integers in mixed radix number system, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, **6**(4):1613–1621.
- Liner, C. L.; Underwood, W. D. e Gobeli, R. (1999) 3-D seismic survey design as an optimization problem, *The Leading Edge*, **18**(9):1054–1060.
- Maurer, H.; Curtis, A. e Boerner, D. E. (2010) Recent advances in optimized geophysical survey design, *Geophysics*, **75**(5):75A177–75A194.
- Mayne, W. H. (1962) Common reflection point horizontal data stacking techniques, *Geophysics*, **27**(6):927–938.
- Mayne, W. H. (1967) Practical considerations in the use of common reflection point techniques, *Geophysics*, **32**(2):225–229.
- McWhorter, R.; Schultz, G.; Clark, A.; Branch, T. e Lansley, M. (2012) 3D Seismic Operational Optimization in the Lusitanian Basin, Portugal, *First Break*, **30**(1):103–108.
- Milhomem, P. S.; De Mamam, E. J.; Oliveira, F. M.; Carvalho, M. S. S. e Souza-Lima, W. (2003) Bacia sedimentares brasileiras: Bacia do Recôncavo, Fundação Paleontológica Phoenix, http://www.phoenix.org.br/Phoenix51_Mar03.html.

- Morrice, D. J.; Kenyona, A. S. e Beckett, C. J. (2001) Optimizing operations in 3-D land seismic surveys, *Geophysics*, **66**(6):1818–1826.
- Proposta de Levantamento Sísmico 3D (2007) Campos de Fazenda Alvorada, Rio Itariri e Rio do Bu, , Comunicação Interna Petrobras, vários autores.
- Schönheim, J. (1967) Conversion of modular numbers to their mixed radix representation by matrix formula, *Mathematics of Computation*, **21**(98):253–257.
- da Silva, V. F.; Bulcão, A.; Mansur, W. J.; Alves, G. C.; Santos, L. A. e Filho, D. M. S. (2011) Qualitative and quantitative illumination analyses using wave equation, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, pp. 137–141, San Antonio.
- Singleton, R. (1969) An algorithm for computing the mixed radix fast fourier transform, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, **17**(2):93–103.
- Stone, D. G. (1994) Designing Seismic Surveys in Two and Three Dimensions, nº 5 In *Geophysical References Series*, Society of Exploration Geophysicists.
- Vermeer, G. J. O. (1990) Seismic Wavefield Sampling, nº 4 In *Geophysical References Series*, Society of Exploration Geophysicists.
- Vermeer, G. J. O. (2003) 3D seismic survey design optimization, *The Leading Edge*, **22**(10):934–941.
- Vermeer, G. J. O. (2012) 3-D Seismic Survey Design, nº 12 In *Geophysical References Series*, Society of Exploration Geophysicists, 2ª edic..
- Wapenaar, C. P. A. e Berkhout, A. J. (1989) Elastic Wave Field Extrapolation, *Advances in Exploration Geophysics*, Elsevier.
- Weatherby, B. B. (1940) The history and development of seismic prospecting, *Geophysics*, **5**(3):215–230.
- Westby, G. H. (1935) Discovery of a small producing structure in Okmulgee County, Oklahoma, by reflection seismograph, *Jour. Soc. Pet. Geophys*, **6**(1):44–59.
- Zwartjes, P.; Riyami, J. A.; van Dijk, T.; Smith, R.; Matheny, C.; Benjamin, N.; Hong, T. W.; McCarthy, A.; Bulteau, M.; Rynja, H.; Milcik, P. e Beishuizen, J. (2010) The first land wide azimuth seismic for sub-salt exploration in PDO, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010*, pp. 106–110, Denver.

Agradecimentos

Agradeço à PETROBRAS pela confiança, incentivo e oportunidade para a realização deste trabalho e meu contínuo aprimoramento profissional. Em especial, agradeço aos gerentes Paulo Siston, Vânia Machado, Neiva Zago, Fábio Bastos, Guilherme Canha e ao mestre e exemplo Eduardo Filpo.

Ao Orientador Prof. Dr. Milton Porsani e Coorientadora Dra. Manuelle Góis pela confiança, disponibilidade, dedicação, transmissão de conhecimento e colaboração crítica nas etapas do trabalho. A todos os membros da banca examinadora pelas valiosas considerações e imensa disponibilidade. Ao Prof. Marco Botelho, pelo generoso e pronto atendimento à composição da banca.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da UFBA, pela estrutura disponibilizada e em especial aos professores com quem muito pude aprender: Amin Bassrei, Wilson Figueiró, Olivar Lima, Reynam Pestana e Hédison Sato.

A estrutura multidisciplinar e a metodologia de integração proposta não poderia deixar de se refletir na diversidade de colaboradores, todos imprescindíveis a realização deste trabalho, quais sejam:

No CENPES, o gerente Rui Pinheiro e os geofísicos Djalma Soares, André Bulcão e Bruno Filho pela colaboração fundamental à feitura da Tese. Ao geofísico Djalma, cuja trajetória na companhia nos inspira e serve de exemplo, por ter acreditado no tema em um momento crucial para mim.

Na Bahia: ao gerente de Aquisição Manoel Pimentel, no Processamento Sísmico ao gerente Orlando Freitas pela acolhida e disponibilização de dados e aos Geofísicos Raimundo Mesquita (grande Professor e exemplo), Manoel Gontijo, Washington Martins e Jorge Santana pela ajuda imprescindível. Na Interpretação Sísmica aos Geofísicos Alberto Queiroz, Armando Santana, João Ramos e Flávio Civatti pela ajuda, valiosas discussões e esclarecimentos.

No Reservatório aos Geofísicos Nayguel Costa e Fernando César pela grande ajuda dis-

pensada e dúvidas sanadas.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Antônio Edson, Mayara Matias, Daniel Apraez, Leonardo Bernal e Laura Ortiz pela convivência e troca de experiências.

Aos amigos e incentivadores: Selma Sacramento, Jacira Lucas, Jefferson Pitombo, Frederico Oliveira, Gustavo Gomes, Mário Sérgio Costa, Susana Cavalcanti e Alcirlene Fonseca.

Por último, mas não menos importante, à minha família.