



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DE UM ESQUEMA LINEAR PARA ESTIMATIVA DE
ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE DADOS DE ONDA P EM
EXPERIMENTOS DE VSP MULTIAZIMUTAL**

Raiza de Nazaré Assunção Macambira

Belém - Pará

2013

Raiza de Nazaré Assunção Macambira

**ANÁLISE DE UM ESQUEMA LINEAR PARA ESTIMATIVA DE
ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE DADOS DE ONDA P EM
EXPERIMENTOS DE VSP MULTIAZIMUTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre em Ciências na área de Geofísica.

Belém - Pará

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

M114a Macambira, Raiza de Nazaré Assunção

Análise de um esquema linear para estimativa de anisotropia local a partir de dados de onda P em experimentos de VSP multiazimutal / Raiza de Nazaré Assunção Macambira – 2013
37 f.: il.

Orientadora: Ellen Nazaré Souza Gomes

Dissertação (Mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2013.

1. Geofísica. 2. Estimativa de anisotropia. 3. VSP walkaway multiazimutal. 4. Inversão linear I. Gomes, Ellen Nazaré Souza, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22^a ed.: 550

Raiza de Nazaré Assunção Macambira

**ANÁLISE DE UM ESQUEMA LINEAR PARA ESTIMATIVA DE
ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE DADOS DE ONDA P EM
EXPERIMENTOS DE VSP MULTIAZIMUTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de mestre em Ciências na área de Geofísica.

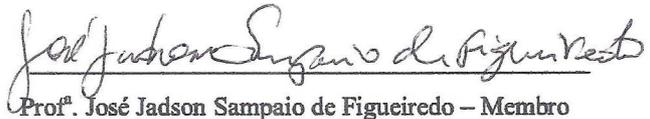
Data de Aprovação: 08 / 08 / 2013

Conceito:

Banca Examinadora



Prof.^a Ellen Nazaré Souza Gomes – Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof.^a José Jadson Sampaio de Figueiredo – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof. João dos Santos Protázio – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me abençoado com a aprovação na seleção do mestrado, durante o andamento e na finalização do mesmo.

Agradeço muito à minha família, em especial à minha mãe Cristiane Helena e meus avós Benedita e José, pois sempre me deram muita força e apoio nos momentos que mais precisei, e também ao meu namorado Gerson Carlos, que sempre me deu força para terminar o mestrado.

Sou muito grata à minha orientadora Ellen Gomes que me ajudou e trabalhou muito comigo durante o andamento desta dissertação e do curso. E se empenhou bastante para finalizarmos o trabalho com bons resultados.

Assim também agradeço aos meus amigos que me acompanharam durante este curso e me ajudaram muito: Renata, Adriano, Diogo, Raphael, Jorlivan, Andrei, Lélis, Isis, Karina e etc.

Agradeço aos professores do Curso de Pós-graduação em Geofísica que se esforçaram para passar seus conhecimentos a todos nós da turma, e também as queridas secretárias Beni e Bela que sempre me deram apoio e incentivo durante o curso.

Agradeço também ao Programa de Pós-graduação em Geofísica da UFPA e ao CNPQ pelo auxílio financeiro com a bolsa de mestrado.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolos	Descrição
VSP	Sigla em inglês para Perfil Sísmico Vertical (Vertical Seismic Profile)
α	Velocidade da onda P no meio isotrópico de referência
β	Velocidade da onda S no meio isotrópico de referência
\mathbf{n}	Vetor normal à frente de onda P
P	Ondas longitudinais
S	Ondas cisalhantes
c	Velocidade de fase (em que a onda propaga-se ao longo da superfície)
WA	Sigla em inglês para fraca anisotropia (Weak Anisotropy)
B	Matriz de fraca anisotropia
M	Matriz de sensibilidade
\mathbf{p}	Vetor de vagarosidade
\mathbf{g}	Vetor de polarização
\mathbf{y}	Vetor das observações
\mathbf{x}	Vetor dos parâmetros WA
N_{par}	Número de parâmetros WA
N_{obs}	Número de observações
N_s	Número de simulações
η	Projeção do vetor vagarosidade no meio isotrópico de referência na direção do eixo z
$\Delta\eta$	Diferença entre as componentes verticais do vetor de vagarosidade observado e o vetor de vagarosidade no meio isotrópico
j	Índice referente aos parâmetros anisotrópicos
$\mathbf{e}^{(k)}$	Sistema vetorial do meio isotrópico de referência
θ	Rotação do eixo de simetria em relação ao eixo y
φ	Rotação do eixo de simetria em relação ao eixo z
F	Fontes
R	Receptores
TI	Sigla em inglês para meio transversalmente isotrópico (Transverse Isotropic)

TIV Meio isotrópico com eixo de sistema vertical (Transverse Isotropic Vertical)

TIH Meio isotrópico com eixo de sistema horizontal (Transverse Isotropic Horizontal)

x, y, z Coordenadas do sistema cartesiano

$\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z$

$\delta_x \quad \delta_y \quad \delta_x$

$\chi_x \quad \chi_y \quad \chi_z$ Parâmetros de fraca anisotropia (WA)

$\varepsilon_{15} \quad \varepsilon_{15} \quad \varepsilon_{24}$

$\varepsilon_{26} \quad \varepsilon_{34} \quad \varepsilon_{35}$

APRESENTAÇÃO

A maior parte dos reservatórios de hidrocarbonetos são fraturados. Estes em regime quase estático comportam-se efetivamente como meios anisotrópicos. Os estudos de metodologias que incorporem anisotropia são assim importantes para o entendimento desses meios. Nas últimas décadas, vários trabalhos foram desenvolvidos que consideram o meio como anisotrópico (Horne and Leaney, 2000; Zheng and Pšenčík, 2002; Gomes et al., 2004; Rusmanugroho and Mcmechan, 2012; Barreto et al. 2013).

Este trabalho é uma continuação do trabalho apresentado em Barreto et al. 2013, onde são estimados os parâmetros fracamente anisotrópicos na vizinhança de um receptor no interior de um poço. Os dados utilizados na inversão são os dados da componente de vagarosidade na direção de orientação do poço e dados de polarização de onda P medidos em experimentos de VSP multiazimutal. A relação entre os parâmetros anisotrópicos do meio e os dados medidos é uma aproximação linear em torno de um meio isotrópico de referência apresentada em Zheng and Pšenčík, 2002. Vários fatores influenciam na estimativa dos parâmetros anisotrópicos através desse esquema de inversão apresentado em Zheng and Pšenčík, 2002 que vão desde o desenho do experimento, o nível de ruído nos dados, o grau de anisotropia do modelo, o tipo de onda usada, a orientação do poço e os parâmetros do meio isotrópico de referência. Em Barreto et al. 2013 é apresentada uma análise do desenho de experimento que tem por objetivo melhorar a resolução dos parâmetros WA. E neste trabalho analisamos as estimativas considerando a influência dos demais fatores no esquema de inversão.

Este trabalho é apresentado na forma de artigo, de acordo com as novas regras do Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará. Assim, a forma escrita da dissertação possui um texto de apresentação e um capítulo, que consiste do trabalho a ser submetido à Revista Brasileira de Geofísica (RBGf).

ANÁLISE DE UM ESQUEMA LINEAR PARA ESTIMATIVA DE ANISOTROPIA LOCAL A PARTIR DE DADOS DE ONDA P EM EXPERIMENTOS DE VSP MULTIAZIMUTAL

Neste trabalho é apresentada uma análise do esquema de inversão linear para a estimativa de anisotropia na vizinhança de um receptor situado em um poço a partir de da componente vertical do vetor de vagarosidade e do vetor de polarização de ondas P medidos em experimentos de VSP walkaway multiazimutal. Independente do meio acima do geofone (homogêneo ou heterogêneo) e da forma do poço (pode ser direcional ou curvado, vertical e inclinado), a inversão é feita a partir de uma aproximação de primeira ordem em torno de um meio isotrópico de referência. O esquema da inversão é analisado considerando fatores como: o nível de ruído nos dados, o tipo de onda P, o grau de anisotropia do meio, a escolha dos parâmetros no meio isotrópico de referência e grau de heterogeneidade do meio. Os resultados são apresentados

Palavras-Chave: Estimativa de anisotropia, Dados de VSP walkaway multiazimutal, Fraca anisotropia

ANALYSIS OF A LINEAR SCHEME FOR ESTIMATION OF LOCAL ANISOTROPY FROM P-WAVE DATA IN MULTI-AZIMUTH VSP SURVEYS

This study presents an analysis of the linear inversion scheme for estimating anisotropy in the neighborhood of a receiver placed in a well using the vertical components of the slowness and polarization vectors of P-waves measured in multi-azimuth walkaway vertical seismic profile (VSP) surveys. Independently of the medium above the geophone (homogeneous or heterogeneous) and the shape of the well (directional or curved, vertical or sloped), an inversion is performed from a first-order approximation around a reference isotropic medium. The analysis of the inversion scheme considers factors such as the noise level of the data, the type of P-wave, the degree of the anisotropy of the medium, the choice of parameters in the reference isotropic medium and the degree of heterogeneity of the medium.

Key words: anisotropy estimation, multi-azimuth walkaway vsp data, weak anisotropy

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
METODOLOGIA.....	12
O modelo direto	12
O problema inverso	15
Modelos e configuração do experimento	16
TESTES NUMÉRICOS	19
Quanto ao nível de ruído.....	19
Quanto ao grau de anisotropia	26
Quanto ao tipo de onda	28
CONCLUSÃO.....	30
APENDICE A - MATRIZ DE SENSIBILIDADE.....	32
AGRADECIMENTOS	32
REFERÊNCIAS	33
LISTA DE FIGURAS.....	35

INTRODUÇÃO

Considerando que grande parte dos reservatórios de hidrocarbonetos são fraturados e em regime quase estático, estes comportam-se como meios anisotrópicos (Schoenberg and Douma, 1988), o estudo da anisotropia tem despertado o interesse de empresas e da comunidade acadêmica em geral. Através de informações dos parâmetros anisotrópicos do meio pode-se por exemplo determinar a direção preferencial de fluxo dentro do reservatório.

Em Horne and Leaney, 2000; Zheng and Pšenčík, 2002; Gomes et al., 2004; Rusmanugroho and Mcmechan, 2012; Barreto et al. 2013, os parâmetros anisotrópicos do meio são estimados através da inversão de dados de vagarosidade e polarização de onda P ou de ondas P e S, medidos em experimentos VSP.

A relação entre os parâmetros anisotrópicos do meio e os dados de vagarosidade e polarização é complexa. Considerando apenas ondas P, é apresentado em Zheng and Pšenčík (2002) uma aproximação linear em torno de um meio isotrópico de referência, que relaciona os dados de vagarosidade e polarização e os parâmetros fracamente anisotrópicos¹ do meio (Farra and Pšenčík, 2003). Usando essa metodologia, mas considerando apenas a componente vertical do vetor de vagarosidade e o vetor de polarização de dados de onda P medidos em dados de VSP em apenas um perfil, Gomes et al. 2004, apresentam uma estimativa de anisotropia para dados em uma região do mar de Java. Barreto et al. 2013, apresenta uma análise da estimativa de anisotropia através do estudo do desenho de experimento dos dados de VSP walkaway multiazimutal. Esse esquema de inversão não depende da estrutura do meio acima do geofone (pode ser homogêneo ou heterogêneo) como também não depende da forma do poço (pode ser direcional ou curvado, vertical e inclinado). Neste trabalho é analisada a dependência desse esquema de inversão de fatores como: o grau de anisotropia, nível de ruído nos dados de vagarosidade e polarização, o tipo de onda utilizada, onda P direta e/ou refletida, a escolha dos parâmetros anisotrópicos do meio e o grau de heterogeneidade e é uma continuação da análise apresentada em Barreto et al. 2013. Uma análise similar, pode ser vista em Rusmanugroho e Mcmechan (2012), entretanto, este trabalho difere quanto a metodologia e o tipo de onda utilizado na inversão.

¹ Parâmetros WA

Nos testes apresentados foram utilizados dados sintéticos de vagarosidade e polarização que foram calculados através do pacote do ANRAY (Gajewski and Pšenčík, 1990). Em todo o trabalho as matrizes são representadas por letras maiúsculas e os vetores por letras minúsculas, ambos em negrito. Utiliza-se a notação indicial e a conversão da soma (Aki and Richards, 1980) em todo o texto. As exceções a estas regras serão indicadas explicitamente .

METODOLOGIA

O modelo direto

Consideremos um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) , com eixo z positivo na direção que aponta de cima para baixo. Usando a equação (22) de Zheng and Pšenčík, 2002, tem-se que a relação entre a componente vertical de vagarosidade, o vetor de polarização e os parâmetros de fraca anisotropia, para um receptor no interior de um poço, é dada por:

$$D(\alpha^2 - \beta^2)^{-1} B_{13} - \frac{1}{2} \alpha^{-1} \eta B_{33} = D g_i e_i^{(1)} + \alpha \Delta \eta, \quad (1)$$

em que

$$D = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}, \quad n = \alpha^{-1} n_3. \quad (2)$$

Os símbolos α e β são, respectivamente, as velocidades das ondas P e S no meio isotrópico de referência. O vetor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ em (2) é o vetor unitário perpendicular à frente de onda P no meio isotrópico de referência. O vetor $\mathbf{e}^{(1)}$ é um vetor unitário perpendicular a \mathbf{n} . Os vetores $\mathbf{e}^{(1)}$ e $\mathbf{n} = \mathbf{e}^{(3)}$ estão confinados ao plano vertical que contém o perfil estudado. Eles fazem parte do sistema vetorial formado por $\mathbf{e}^{(1)}$, $\mathbf{e}^{(2)}$ e $\mathbf{e}^{(3)}$ no meio de referência e são escolhidos da seguinte forma (Gajewski and Pšenčík, 1998):

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{(1)} &= D^{-1}(n_1 n_3, n_2 n_3, n_3^2 - 1); \\ \mathbf{e}^{(2)} &= D^{-1}(-n_2, n_1, 0); \\ \mathbf{e}^{(3)} &= (n_1, n_2, n_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Na equação (1), g_i e a quantidade $\Delta \eta = p_3^{\text{obs}} - \eta$ são os dados observados e consistem na i -ésima componente do vetor de polarização e a diferença entre as componentes verticais do vetor de vagarosidade no meio anisotrópico e no meio isotrópico de referência respectivamente. As matrizes \mathbf{B}_{13} e \mathbf{B}_{33} , são matrizes da forma \mathbf{B}_{mn} com $m, n = 1, 2, 3$ são as matrizes de fraca anisotropia projetadas na direção dos vetores $\mathbf{e}^{(k)}$:

$$\mathbf{B}_{mn} = a_{ijkl} e_i^{(m)} e_j^{(3)} e_k^{(3)} e_l^{(n)} - \alpha^2 \delta_{mn}, \quad (4)$$

em que: a_{ijkl} é o tensor dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade e $i, j, k, l = 1, 2, 3$. A matriz de fraca anisotropia \mathbf{B}_{mn} (com $m, n = 1, 2, 3$), corresponde à perturbação de primeira ordem da matriz de Christoffel em torno o meio isotrópico de referência (Gajewski and Pšenčík, 1998). A componente vertical da vagarosidade e o vetor de polarização da onda P utilizados na inversão dependem somente das matrizes \mathbf{B}_{13} e \mathbf{B}_{33} de \mathbf{B}_{mn} . Para um meio anisotrópico arbitrário, essas matrizes podem ser escritas por (Gajewski and Pšenčík, 1998):

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{13} = & \alpha D^{-1} \{ 2\varepsilon_z n_3^5 + n_3^4 (\varepsilon_{34} n_2 + \varepsilon_{35} n_1) + n_3^3 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 + 2\chi_z n_1 n_2 - 2\varepsilon_z) \\ & + n_3^2 [(4\chi_x - 3\varepsilon_{34}) n_1^2 n_2 + (4\chi_y - 3\varepsilon_{35}) n_1 n_2^2 + (4\varepsilon_{15} - 3\varepsilon_{35}) n_1^3 + (4\varepsilon_{24} - 3\varepsilon_{34}) n_2^3] \\ & + n_3 [(2\delta_z - \delta_x - \delta_y) n_1^2 n_2^2 + 2(2\varepsilon_{16} - \chi_z) n_1^3 n_2 + (2\varepsilon_{26} - \chi_z) n_1 n_2^3 + (2\varepsilon_x - \delta_x) n_1^4 \\ & + (2\varepsilon_y - \delta_y) n_2^4] - \chi_x n_1^2 n_2 - \chi_y n_1 n_2^2 - \varepsilon_{15} n_1^3 - \varepsilon_{24} n_2^3 \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{33} = & 2\alpha^2 \{ \varepsilon_z n_3^4 + 2n_3^3 (\varepsilon_{34} n_2 + \varepsilon_{35} n_1) + n_3^2 (\delta_x n_1^2 + \delta_y n_2^2 + 2\chi_z n_1 n_2) + \\ & 2n_3 (\chi_x n_1^2 n_2 + \chi_y n_1 n_2^2 + \varepsilon_{15} n_1^3 + \varepsilon_{24} n_2^3) + \varepsilon_x n_1^4 + \delta_z n_1^2 n_2^2 + \varepsilon_y n_2^4 + \\ & 2\varepsilon_{16} n_1^3 n_2 + 2\varepsilon_{26} n_1 n_2^3 \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Os parâmetros ε , δ e χ são chamados de parâmetros fracamente anisotrópicos (parâmetros WA) e são definidos em Gajewski and Pšenčík, 1998. Os parâmetros WA representam uma generalização natural dos parâmetros introduzidos por Thomsen, 1986. O parâmetro ε com um (na forma de letra) ou dois subscritos (na forma de números) segue a notação apresentada em Gajewski and Pšenčík, 1998. Uma única letra subscrita indica que os dois subscritos numéricos iguais (com x quando o índice é 11, y quando o índice é 22 e z quando o índice é 33). As matrizes \mathbf{B}_{13} e \mathbf{B}_{33} dependem de α , β , do vetor \mathbf{n} e dos parâmetros WA.

Matriz de Sensibilidadade

A equação (1) pode ser escrita na forma matricial:

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (7)$$

em que o vetor \mathbf{y} é adimensional e está relacionado aos dados observados (lado direito da equação (1), para cada par de fontes receptor) e possui dimensão igual ao número de observações, N_{obs} . O vetor \mathbf{x} está relacionado aos parâmetros WA e tem dimensão igual

ao número de parâmetros, N_{par} . Apenas 15 parâmetros WA controlam a propagação da onda P são eles:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \varepsilon_x & x_2 &= \varepsilon_y & x_3 &= \varepsilon_z \\
 x_4 &= \delta_x & x_5 &= \delta_y & x_6 &= \delta_z \\
 x_7 &= \chi_x & x_8 &= \chi_y & x_9 &= \chi_z \\
 x_{10} &= \varepsilon_{15} & x_{11} &= \varepsilon_{16} & x_{12} &= \varepsilon_{24} \\
 x_{13} &= \varepsilon_{26} & x_{14} &= \varepsilon_{34} & x_{15} &= \varepsilon_{35}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Os parâmetros WA estão relacionados aos parâmetros elásticos normalizados por:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{A_{11} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \varepsilon_y &= \frac{A_{22} - \alpha^2}{2\alpha^2}, & \varepsilon_z &= \frac{A_{33} - \alpha^2}{2\alpha^2}, \\
 \delta_x &= \frac{A_{13} + 2A_{55} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_y &= \frac{A_{23} + 2A_{44} - \alpha^2}{\alpha^2}, & \delta_z &= \frac{A_{12} + 2A_{66} - \alpha^2}{\alpha^2}, \\
 \chi_x &= \frac{A_{14} + 2A_{56}}{\alpha^2}, & \chi_y &= \frac{A_{25} + 2A_{46}}{\alpha^2}, & \chi_z &= \frac{A_{36} + 2A_{45}}{\alpha^2}, \\
 \varepsilon_{15} &= \frac{A_{15}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{16} &= \frac{A_{16}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{24} &= \frac{A_{24}}{\alpha^2}, \\
 \varepsilon_{26} &= \frac{A_{26}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{34} &= \frac{A_{34}}{\alpha^2}, & \varepsilon_{35} &= \frac{A_{35}}{\alpha^2}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Na equação (1) os parâmetros elásticos normalizados pela densidade, a_{ijkl} , estão em sua representação reduzida A_{ij} (Helbig 1994). Na equação (7), a matriz $\mathbf{M}(\alpha, \beta, \mathbf{n})$, formada pelo lado esquerdo da equação (1), é chamada de matriz de sensibilidade (para detalhes, ver apêndice) e tem ordem $N_{\text{obs}} \times N_{\text{par}}$ (número de observações x número de parâmetros). A matriz de sensibilidade depende da geometria de aquisição, número e orientação dos perfis na superfície onde estão distribuídas as fontes em um levantamento de VSP walkaway multiazimutal (Figura 1) e dos parâmetros do meio isotrópico de referência.

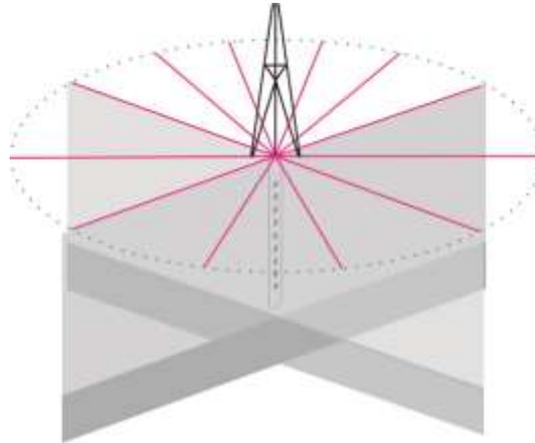


Figura 1: Configuração da aquisição de VSP walkaway multiazimutal. As fontes estão localizadas em perfis (com a cor magenta) na superfície em cada lado do poço, que está no centro. Os receptores estão localizados no interior do poço.

Uma análise detalhada dessa dependência é feita em Barreto et al. 2013, onde é mostrado que para que os 15 parâmetros WA sejam estimados de maneira única, é necessário que as fontes na superfície estejam distribuídas nos dois lados do poço em pelo menos cinco perfis regularmente espaçados. Neste trabalho os dados foram adquiridos em perfis regularmente espaçados variando de 0^0 a 360^0 tendo então seis perfis regularmente espaçados de 36^0 .

O problema inverso

Os parâmetros WA podem ser estimados a partir de (7), determinando-se que valores do vetor x_j minimizam a função:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{Nobs} (y_i - M_{ij} \tilde{x}_j). \quad (10)$$

Os M_{ij} são os elementos da matriz de sensibilidade \mathbf{M} , \tilde{x}_j são as estimativas dos parâmetros WA e y_i é a i -ésima componente do vetor de observação \mathbf{y} . Neste trabalho o vetor de observação é gerado sinteticamente através do pacote de traçamento de raios em meios anisotrópicos ANRAY (Gajewski and Pšenčík, 1998).

Para analisar a estabilidade das estimativas dos parâmetros WA, cada observação foi contaminada com ruído Gaussiano gerado por 500 diferentes sementes. Para cada uma das 500 observações contaminadas, foram estimadas as velocidades α , β e os parâmetros WA. A média e o desvio padrão dessas estimativas foram calculados através das equações:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} \tilde{x}_j^k}{N_s} \quad (11)$$

$$\bar{v}_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_s} (\tilde{x}_j^k)^2}{N_s} - [N_s \bar{x}_j]^2}, \quad (12)$$

em que N_s é o número de simulações ($N_s= 500$), o índice j refer-se ao número de parâmetros WA ($j=1, \dots, 15$), \bar{x}_j e \bar{v}_j são a média amostral e a desvio padrão das estimativas dos parâmetros \tilde{x}_j respectivamente.

Para realizar a inversão é necessário que a matriz $\mathbf{M}(\alpha, \beta, \mathbf{n})$ seja conhecida e, portanto, é necessário que os parâmetros do meio isotrópico de referência (velocidades das ondas P e S e \mathbf{n} , vetor normal à frente de onda P) sejam conhecidos. Existem várias maneiras de se determinar esses parâmetros apresentadas em Barreto et al. 2013. Neste trabalho os parâmetros do meio isotrópico de referência foram escolhidos baseados apenas nos dados observados. Assim, a velocidade da onda P no meio isotrópico de referência é dada a partir de:

$$\alpha p_3^{(i)} = g_3^{(i)}, \quad (13)$$

em que: $p_3^{(i)}$ e $g_3^{(i)}$ são, respectivamente, as componentes verticais dos vetores de vagarosidade e polarização gerados pela i -ésima observação. A velocidade α no meio de referência pode então ser estimada a partir da inversão da equação (13) por mínimos quadrados para o número total de observações, N_{obs} . A velocidade da onda S, β , no meio isotrópico de referência é obtida através da razão de Poisson:

$$\beta = \alpha / \sqrt{3} \quad (14)$$

O vetor normal à frente de onda P no meio isotrópico de referência foi considerado de acordo com a relação:

$$\mathbf{n} // \mathbf{g} \quad (15)$$

Considerando meios fracamente anisotrópicos a equação (15) é uma boa estimativa de \mathbf{n} . Como consequência da relação (15), tem-se $g_i e_i^{(1)} = 0$, logo o primeiro termo do lado direito da equação (1) desaparece.

Assim, as estimativas dos parâmetros WA, equação (7), são obtidas a partir da inversão de (10) utilizando decomposição em valores singulares. Não foram usados estabilizadores na inversão, o número de condição da matriz de sensibilidade para os testes aqui apresentados era da ordem de 10^2 , considerando então o problema como bem posto.

Modelos e configuração do experimento

Os testes numéricos foram realizados em dois modelos que diferem quanto ao grau de anisotropia (de acordo com estabelecido em Thomsen, 1986) e geometria de aquisição. Para o modelo I, a configuração utilizada na aquisição dos dados é de VSP walkaway multiazimutal (Figura 1), com 18 fontes por perfil, localizadas na superfície e espaçadas

de 0,1 km (Figura 2). Os dados foram medidos em seis perfis regularmente espaçados de 36° .

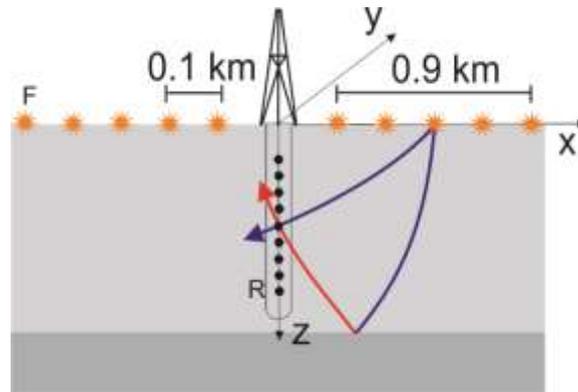


Figura 2: Disposição das fontes e do receptor para o modelo I, sendo que as fontes (F) estão na superfície espaçadas de 0.1 km e o poço está no centro e os receptores (R) no interior deste. As ondas P diretas estão em azul e as refletidas em vermelho.

O modelo é formado por duas camadas. O topo da primeira camada era inicialmente um meio TIV (meio isotrópico com eixo de simetria vertical) e cujos os parâmetros elásticos normalizados pela densidade são: $A_{11} = A_{22} = 15.71$, $A_{33} = 13.39$, $A_{12} = 5.05$, $A_{13} = A_{23} = 4.46$, $A_{44} = A_{55} = 4.98$ e $A_{66} = 5.33$. O eixo de simetria do meio foi rotacionado de $\theta = 80^\circ$ em relação ao eixo y e em seguida, rotacionado de $\varphi = 25^\circ$ em relação ao eixo z . A base da primeira camada, que está a uma profundidade de 5 km, era inicialmente um TIV, cujos parâmetros elásticos normalizados pela densidade são: $A_{11} = A_{22} = 35.348$, $A_{33} = 30.128$, $A_{12} = 11.363$, $A_{13} = A_{23} = 10.035$, $A_{44} = A_{55} = 11.205$ e $A_{66} = 11.9925$. O eixo de simetria do meio foi rotacionado de $\theta = 90^\circ$ em relação ao eixo y (deste modo, o modelo na base é agora um TIH, meio isotrópico com eixo de simetria horizontal). Deste modo a primeira camada é um meio anisotrópico e usando a medida comum de anisotropia de onda P (máximo de $\varepsilon \times 100\%$, em que ε representa ε_x , ε_y ou ε_z), a anisotropia no modelo na camada é de 8%. A segunda camada é isotrópica, cujas velocidades das ondas P e S normalizadas pela densidade são $\alpha = 4,0$ km/s e $\beta = 2.35$ km/s, respectivamente e possui 1 km de espessura.

Para o modelo II a configuração da aquisição é de 60 fontes distribuídas ao longo de seis perfis na superfície, cujos azimutes estão variando entre 0° e 360° com incremento de 30° (Figura 3). As fontes estão espaçadas talque sua inclinações variam de -75° a 75° com incremento de 0,25 km (Figura 4) em relação ao eixo vertical.

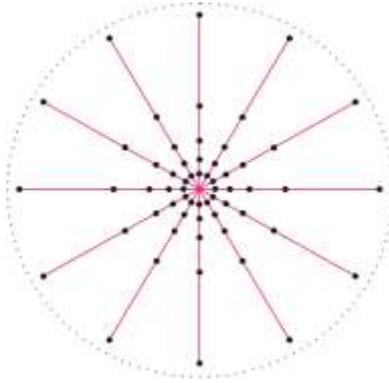


Figura 3: Distribuição dos perfis (magenta) para o modelo 2, sendo os pontos pretos as fontes e o centro é a cabeça do poço.

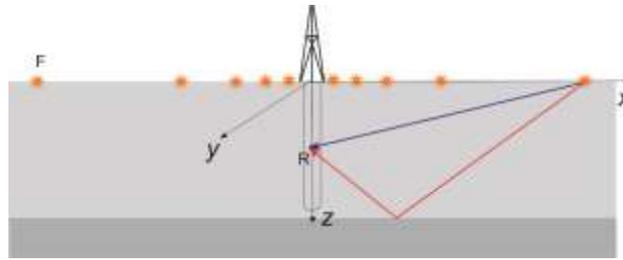


Figura 4: Esta Figura representa um meio homogêneo, em que as fontes estão distribuídas irregularmente. A linha azul representa a onda direta e a linha vermelha está mostrando a onda refletida. Ambas são linhas retas devido ao meio ser homogêneo.

Este modelo é constituído por duas camadas planas, sendo a primeira camada (meio incidente) um meio anisotrópico triclinico homogêneo com espessura de 1,1 km, apresentado em Rusmanugroho and McMechan, 2012. O tensor dos parâmetros elásticos normalizados pela densidade em $(\text{km/s})^2$, é descrito da seguinte forma:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 5,5618 & 2,1916 & 2,5979 & 0,1496 & -0,0144 & -0,3308 \\ & 5,5145 & 2,6089 & 0,2066 & -0,0081 & -0,2901 \\ & & 6,7882 & 0,2115 & -0,0134 & -0,2240 \\ & & & 1,7636 & -0,0658 & -0,0011 \\ & & & & 1,7490 & 0,0392 \\ & & & & & 1,6588 \end{bmatrix} \quad (16)$$

O grau de anisotropia da primeira cama é de 10%, sendo considerado portanto, como tendo anisotropia moderada (Thomsen,1986).

A segunda camada possui espessura de 0,9 km e é caracterizada por um meio isotrópico cujas velocidades das ondas P e S normalizadas pela densidade são calculadas pela raiz quadrada de A_{33} e A_{44} do meio incidente, respectivamente.

TESTES NUMÉRICOS

Como continuação do trabalho apresentada em Barreto et al, 2013, a seguir são apresentados testes numéricos que analisam a dependência das estimativas dos parâmetros WA do: nível de ruído nos dados de vagarosidade e polarização, tipo de anisotropia do modelo e tipo de onda P utilizada na inversão.

- Quanto ao nível de ruído

Aos dados de vagarosidade e polarização do modelo I foram aplicados vários níveis de ruído. Nas componentes verticais do vetor de vagarosidade, o ruído aplicado possui desvio padrão igual a um valor percentual do maior valor da componente vertical do vetor de vagarosidade observado. Nos dados de polarização, o ruído está relacionado à mudança de direção na polarização. Foram considerados quatro níveis de ruído aplicados da seguinte forma:

- I. Nível de ruído I - Nos dados de polarização: 1° (ondas diretas) e 2° (ondas refletidas). Nos dados de vagarosidade: 5% (ondas diretas) e 10% (ondas refletidas). Foi chamado a esse nível de ruído de nível de referência;
- II. Nível de ruído II. Nos dados de polarização: 1° (ondas diretas) e de 2° (ondas refletidas). Nos dados de vagarosidade: 10% (ondas diretas) e 20% (ondas refletidas);
- III. Nível de ruído III. Nos dados de polarização: 2° (ondas diretas) e de 4° (ondas refletidas). Nos dados de vagarosidade: 5% (ondas diretas) e 10% (ondas refletidas);
- IV. Nível de ruído IV. Nos dados de polarização: 2° (ondas diretas) e de 4° (ondas refletidas). Nos dados de vagarosidade: 10% (ondas diretas) e 20% (ondas refletidas);

Os resultados das estimativas dos parâmetros WA obtidos na inversão foram analisados pela comparação das projeções estereográficas da aproximação de primeira ordem da

velocidade de fase (Pšenčík and Gajewski 1998) determinadas pelos valores exatos e estimados dos parâmetros WA. A fórmula de primeira ordem da velocidade de fase é dada por:

$$\mathbf{c}^2(x_m, n_m) = \sqrt{\alpha^2 + \mathbf{B}_{33}}. \quad (17)$$

A velocidade de fase $c(x_m, n_m)$ é uma função do vetor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ e do vetor de parâmetros \mathbf{x} , relação (7). São mostrados quatro tipos de projeções estereográficas: a) o quadrado da velocidade de fase calculado para os parâmetros WA exatos; b) o quadrado da velocidade de fase calculado para os parâmetros WA estimados; c) o erro percentual entre b) e a); d) a variação percentual da velocidade de fase estimada.

Os testes foram realizados utilizando dados de vagarosidade e polarização medidos em dois receptores dentro do poço: o mais raso a 0,1 km (receptor#1) e o mais profundo a 0,7 km (receptor #2). Os resultados são apresentados a seguir:

Na Figura 5 são mostrados os estereogramas da velocidade de fase calculados a partir dos parâmetros WA exatos, Figura 5a., e para os quatro níveis de ruído, Figuras 5 b., d., f. e h., além dos respectivos erros relativos, Figuras 5c., e., g. e i.

Ainda para o receptor #1, foram calculadas as variações das velocidades de fase. Na Figura 6, os estereogramas representam essas variações das velocidades de fase que foram calculadas na equação (17) usando os parâmetros WA estimados nas 500 inversões a partir: dos dados contaminados com o nível de ruído I. (Figura 6a.), dos dados contaminados com o nível de ruído II (Figura 6b.), dos dados contaminados com o nível de ruído III (Figura 6c.) e dos dados contaminados com o nível de ruído IV (Figura 6d.).

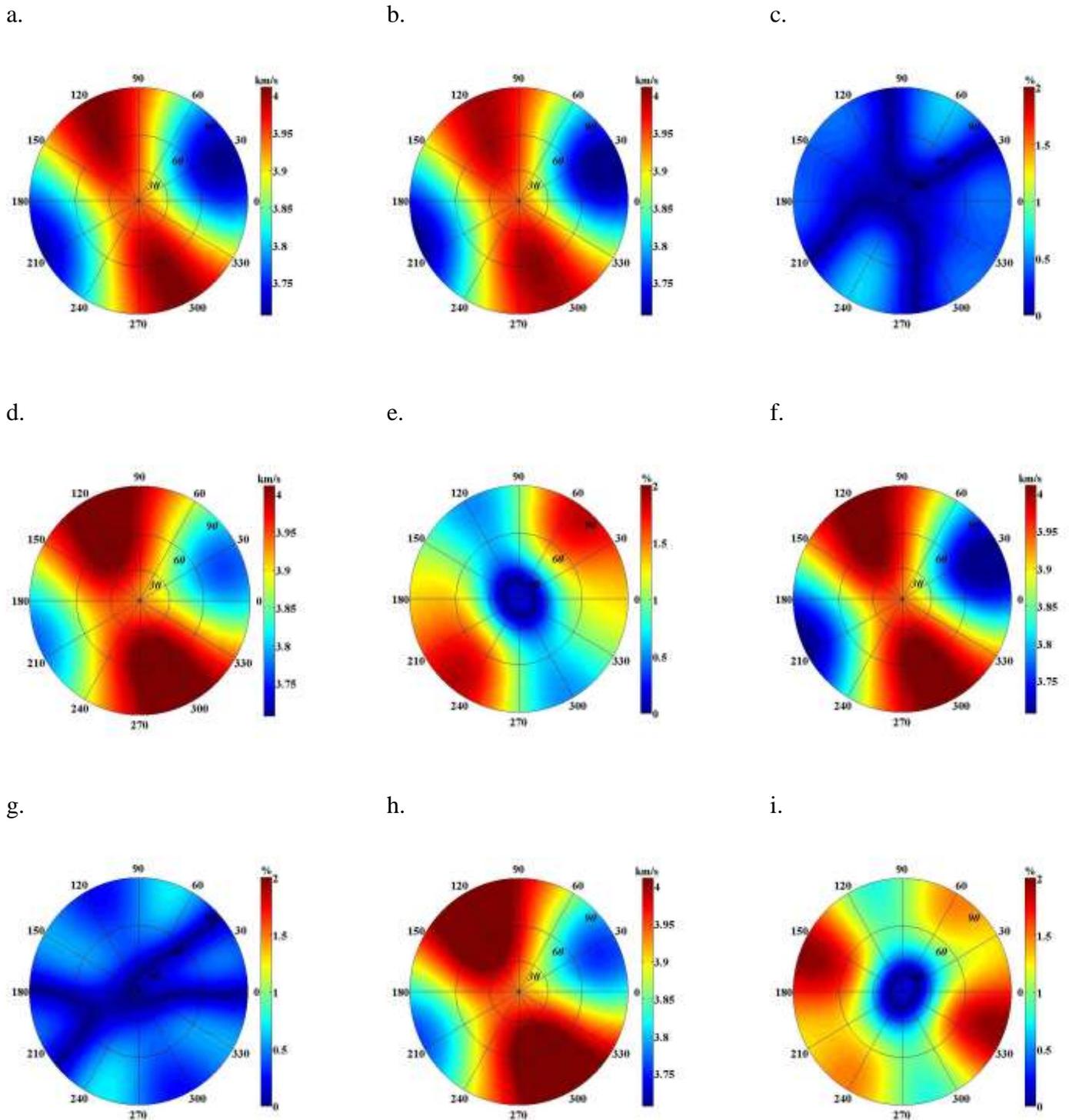


Figura 5 - Para o receptor #1 no modelo I, mais raso, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.

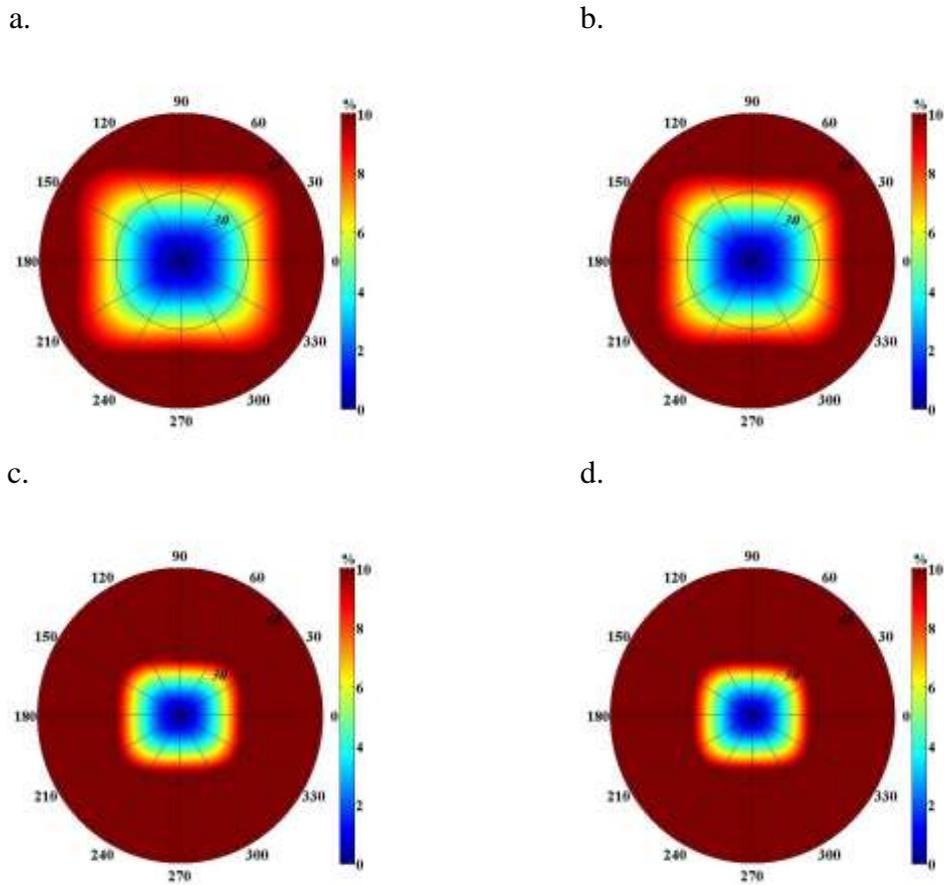


Figura 6 - Para receptor #1 no modelo I, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções.

Os resultados para o receptor mais profundo são mostrados nas Figuras 7 e 8. Na Figura 7 são mostrados os estereogramas da velocidade de fase calculados a partir dos parâmetros WA exatos, Figura 7a., e para os quatro níveis de ruído, Figuras 7b., d., f. e h., além dos respectivos erros relativos, Figuras 7c., e., g. e i. Além disso, foi calculada a variação das velocidades de fase obtidas a partir das estimativas dos parâmetros WA para os quatro níveis de ruído, Figura 8.

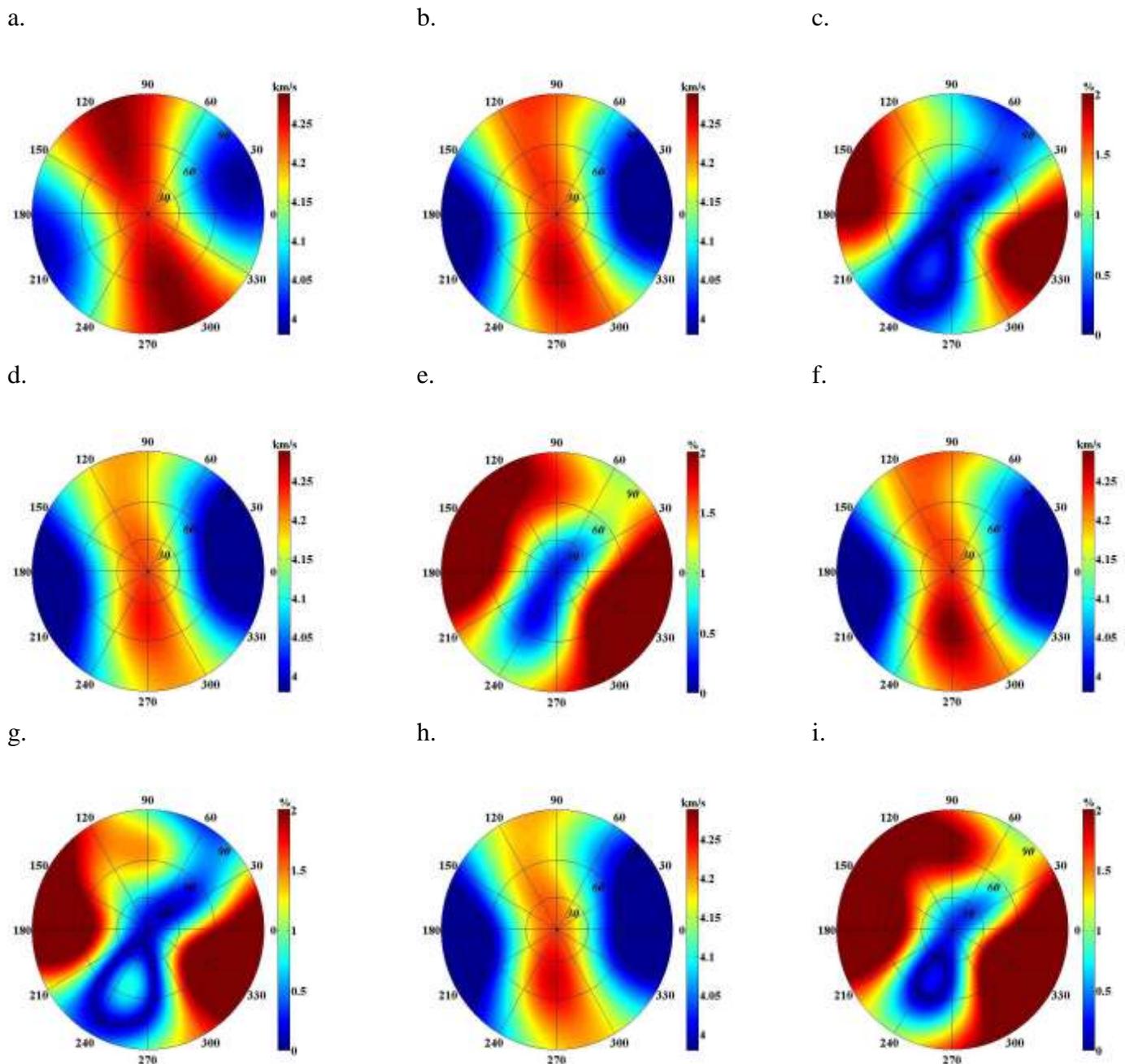


Figura 7 - Para o receptor #2 no modelo I, mais profundo, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.

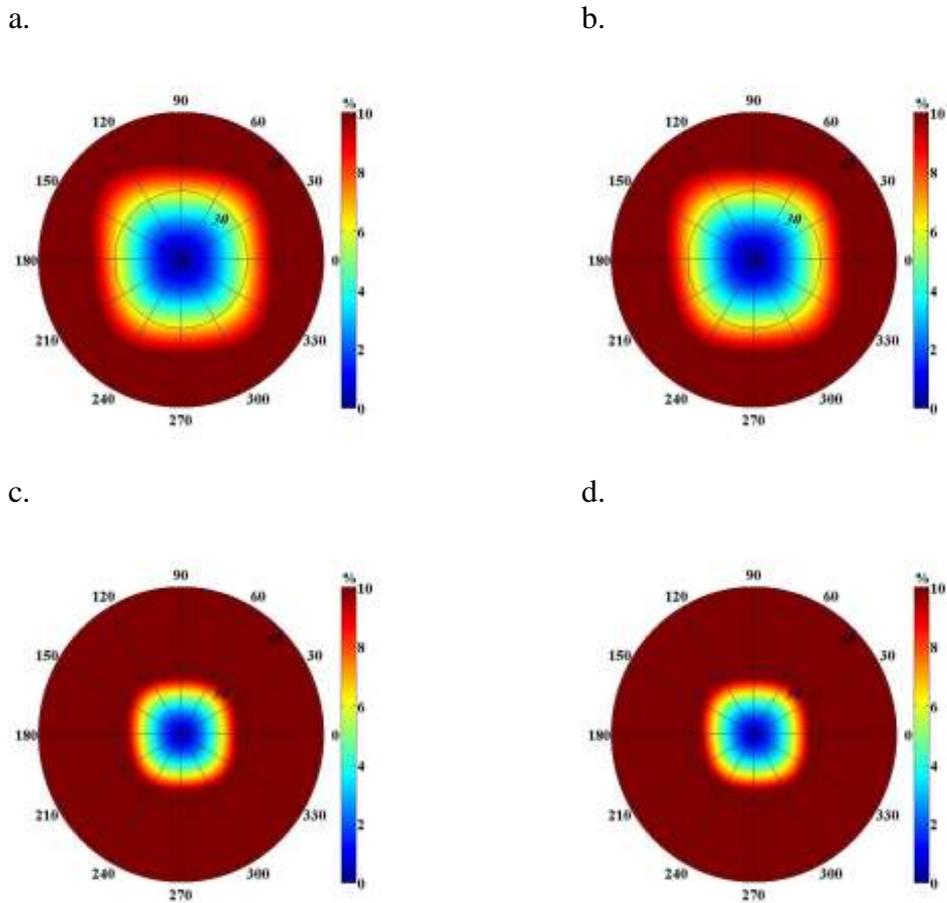


Figura 8 - Para o receptor #2 do modelo I, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções para os quatro níveis de ruído.

Da mesma forma que na Figura 6, as variações mostradas nos estereogramas da Figura 8 foram obtidas da velocidade de fase calculada na equação (17) usando os parâmetros estimados nas 500 inversões a partir: dos dados contaminados com o nível de ruído I. (Figura 8a.), dos dados contaminados com o nível de ruído II (Figura 8b.), dos dados contaminados com o nível de ruído III (Figura 8c.) e dos dados contaminados com o nível de ruído IV (Figura 8d.).

Baseado nos resultados para as velocidades de fase apresentadas nas Figuras de 6 a 8, quando as estimativas dos parâmetros WA para diferentes níveis de ruído pode-se concluir que:

- As estimativas oscilam mais com o aumento do ruído nos dados de vagarosidade que com o aumento do ruído nos dados de polarização. Por outro lado, o aumento do ruído nos dados de polarização contribui para a piora nos valores estimados para os parâmetros WA;
- Considerando o item anterior, de uma maneira geral (considerando estabilidade e valor estimado) as estimativas dos parâmetros WA são mais sensíveis a ruído nos dados de polarização que nos dados de vagarosidade. Esse resultado era esperado uma vez que na escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência o vetor normal à frente de onda P foi considerado como sendo paralelo ao vetor de polarização observado. Assim na equação (7) além dos dados do lado direito estarem contaminados com ruído, a matriz de sensibilidade **M** também se apresenta contaminada com ruído;
- As estimativas oscilam mais no receptor #2, mais profundo, que no receptor #1, mais raso. Acredita-se que esse resultado deve-se a diminuição da cobertura;
- Considerando que o grau de anisotropia do modelo utilizado nos testes é de 8% estamos considerando que as melhores estimativas apresentam variação em torno de no máximo 4%. Neste caso, os melhores resultados são obtidos para o nível de ruído I, os dados de polarização são contaminados com ruído que muda a sua direção em 1° (para as ondas diretas) e 2° (para as ondas refletidas) e os dados da componente vertical da vagarosidade foram contaminados com ruído cujo desvio padrão era de 5% (para as ondas diretas) e 10% (para as ondas refletidas) do valor da maior observação. Esse nível de ruído foi chamado neste trabalho de ruído de referência;
- Para o nível de ruído de referência, dos quinze parâmetros WA que descrevem a propagação da onda P, sete parâmetros WA são bem estimados, são eles ϵ_z , χ_x , χ_y , ϵ_{15} , ϵ_{24} , ϵ_{34} e ϵ_{35} .
- Ainda de acordo com os estereogramas das variações das estimativas, verifica-se que os sete parâmetros WA são bem estimados dentro de um cone de 30° em torno do poço onde estão situados os geofones para o nível de ruído de referência.

- Quanto ao grau de anisotropia

Foram feitos testes em que o grau de anisotropia do modelo variava. São mostrados os resultados da inversão para o modelo 2 que tem anisotropia moderada (em torno de 10%, Thomsen, 1986). Na Figura 9 são mostrados os valores da velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA exatos, Figura 9a, os valores calculados a partir dos parâmetros WA estimados a partir da inversão de dados de vagarosidade e polarização para diferentes níveis de ruído, Figuras 9b, 9d, 9f e 9h, além dos erros percentuais relativos (Figuras 9c, 9e, 9g e 9i). Na Figura 10, as variações mostradas nos estereogramas foram obtidos da velocidade de fase calculada na equação (17) usando os parâmetros estimados nas 500 inversões a partir: dos dados contaminados com o nível de ruído I. (Figura 10a.), dos dados contaminados com o nível de ruído II (Figura 10b.), dos dados contaminados com o nível de ruído III (Figura 10c.) e dos dados contaminados com o nível de ruído IV (Figura 10d.).

De acordo com as Figuras 9 e 10 verificam-se as estimativas para o modelo com um grau de anisotropia moderado apresenta erro e variação maior, comparado com os resultados obtidos para o modelo I que tem fraca anisotropia. Este resultado deve-se ao fato de que o esquema de inversão apresentado neste trabalho baseia-se em uma aproximação em torno de um meio isotrópico de referência. Assim quanto mais fraca for a anisotropia do meio, espera-se um resultado melhor para a inversão.

DA mesma forma que os resultados para o modelo I, os resultados para a anisotropia moderada do modelo II, verifica-se que estimativas oscilam mais com o aumento do ruído nos dados de vagarosidade que com o aumento do ruído nos dados de polarização. Por outro lado, o aumento do ruído nos dados de polarização contribui para a piora nos valores estimados para os parâmetros WA.

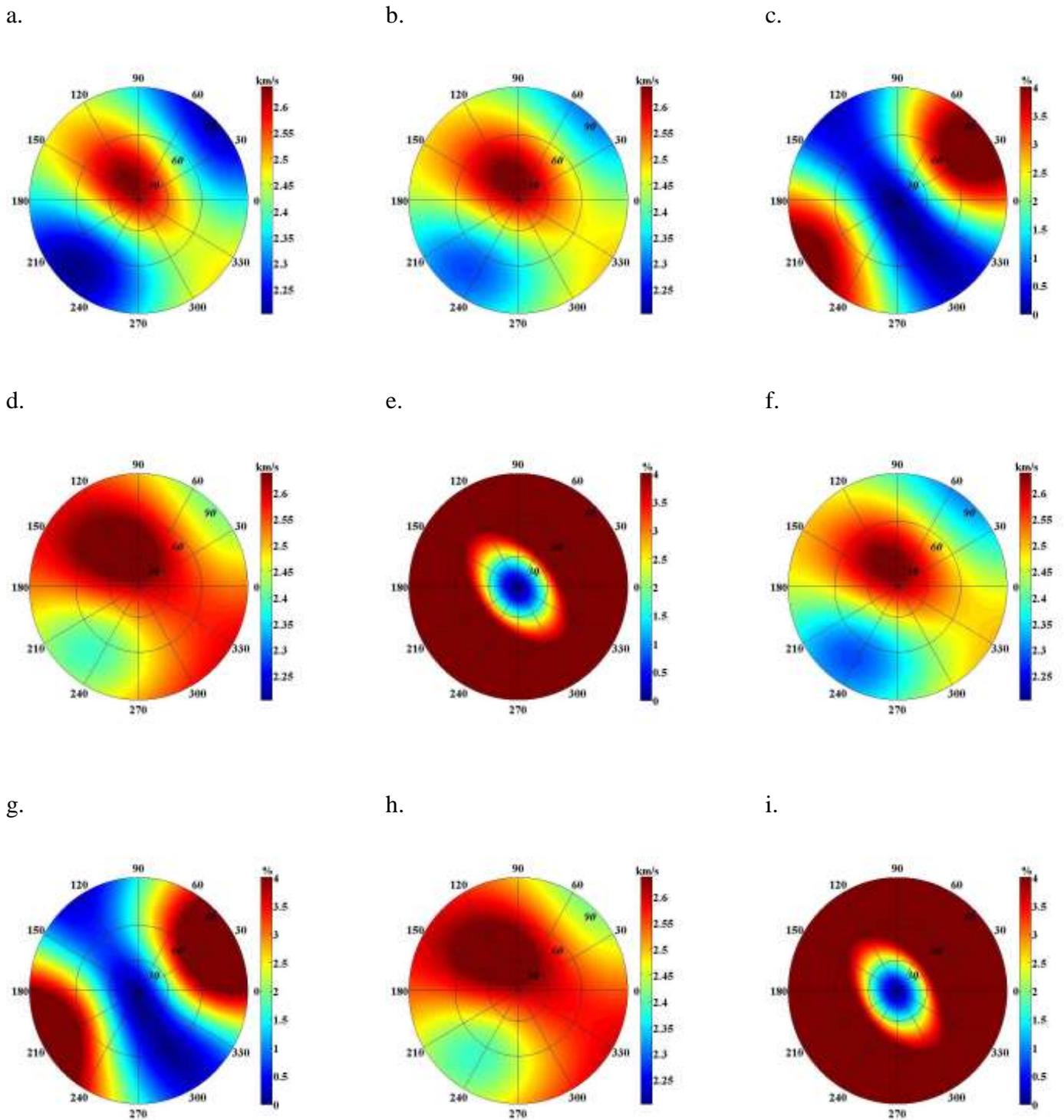


Figura 9 - Para um receptor a profundidade de 0,25 km no modelo II, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.

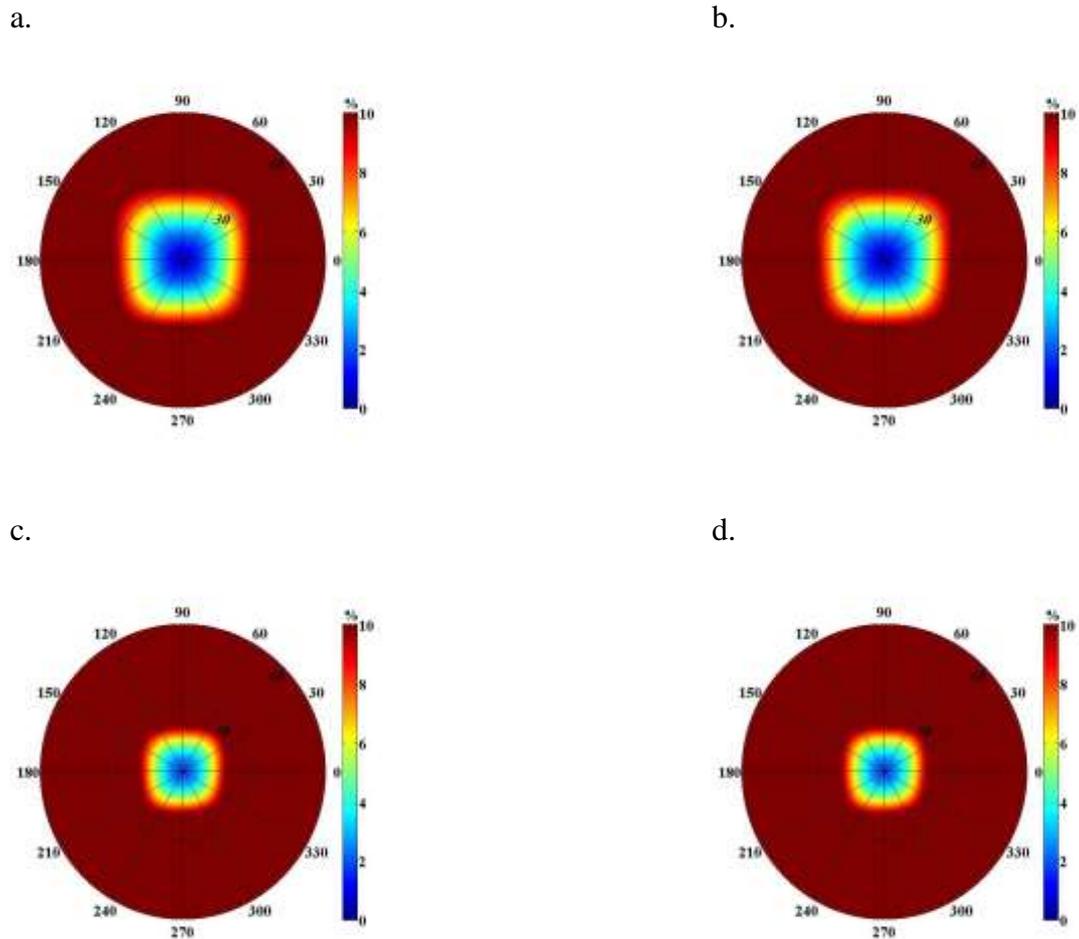


Figura 10 - Para o modelo II, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções.

- Quanto ao tipo de onda

Em seguida os parâmetros WA foram estimados no receptor #1 do modelo I considerando: apenas dados de onda P direta e considerando ondas P diretas e refletidas. O ruído de referência (5% do maior valor da componente vertical do vetor de vagarosidade e erro na polarização de 1°) foi o nível de ruído usado nos dados de vagarosidade e polarização da onda P direta. O nível de ruído considerado nas ondas refletidas foi o dobro do ruído das ondas diretas.

Para o receptor #1, os erros percentuais entre a velocidade de fase exata e a calculada a partir das estimativas dos parâmetros WA obtidos da inversão de ondas diretas e

refletidas, Figura 11a, e a velocidade de fase calculada da estimativa dos parâmetros WA obtidos da inversão de apenas de ondas direta, Figura 11b.

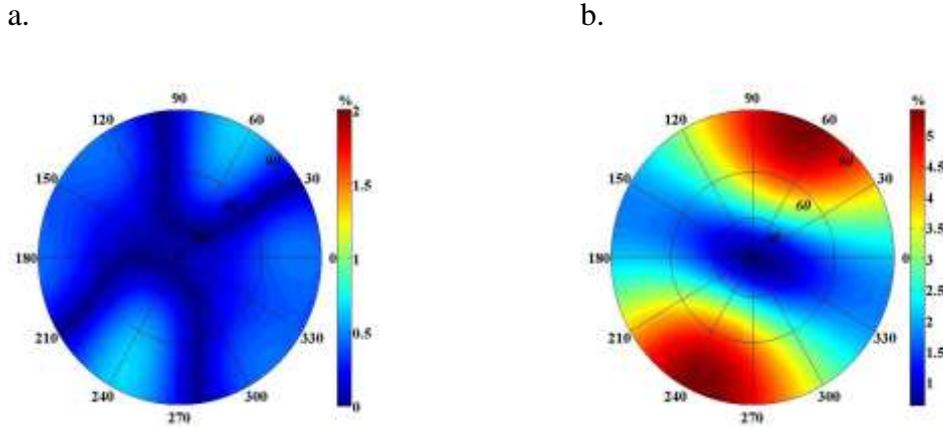


Figura 11 - Na Figura 11, os estereogramas representam: a) Erro considerando a velocidade de fase calculada usando os parâmetros WA estimados a partir de dados de vagariedade e polarização de ondas P diretas e refletidas. b) Erro considerando a velocidade de fase calculada usando os parâmetros WA estimados a partir de dados de vagariedade e polarização de ondas P diretas.

De acordo com a Figura 11, verifica-se que a melhor estimativa acontece quando são consideradas ondas P diretas e refletidas, ainda que para a onda refletida tem-se considerado o dobro do ruído aplicado as ondas diretas. Acredita-se que isto se deva ao fato de estar-se usando mais informação na inversão. Quando são utilizados apenas ondas diretas o erro nas estimativas é cerca de 2,5 vezes maior que o erro quando são utilizados dados de onda P direta e refletida e também verificada maior variação nas estimativas considerando apenas dados de onda P direta.

CONCLUSÃO

Neste trabalho é analisado um esquema de inversão entre os parâmetros de fraca anisotropia do meio (parâmetros WA) e os dados de vagarosidade e polarização dos dados de onda P em um experimento de VSP multiazimutal para a estimativa de anisotropia local. A relação entre os parâmetros do meio e os dados de VSP observados é uma aproximação de primeira ordem em torno de um meio isotrópico de referência apresentado em Zheng and Pšenčík, 2002. Esse esquema de inversão é afetado por fatores como o nível de ruído nos dados, orientação do poço, tipo de onda, grau de anisotropia e escolha dos parâmetros do meio isotrópico de referência. Uma análise da influência desses fatores nas estimativas dos parâmetros WA é apresentada neste trabalho.

De acordo com as análises realizadas conclui-se que:

- Considerando dados com diferentes níveis de ruído aplicados tanto a vagarosidade quanto a polarização, verifica-se que os parâmetros WA podem ser estimados para níveis de ruído moderado. Dos quinze parâmetros WA que descrevem a propagação de onda P apenas sete parâmetros WA são estimados. A estimativa dos parâmetros WA é avaliada pelo cálculo da velocidade de fase. A estimativa da velocidade de fase é útil para a construção de modelos de velocidade aplicados no imageamento sísmico, onde velocidades verticais são dificilmente estimadas dos dados de superfície.
- De acordo com os testes computacionais usando dados medidos em seis perfis regularmente espaçados os parâmetros WA e a velocidade de fase da onda P são bem estimados em um cone de 30° em torno do receptor dentro do poço. Acreditamos que este resultado se deve ao fato de que a acurácia das estimativas depende da cobertura dos dados. Uma vez que os dados utilizados na inversão são as componentes do vetor de vagarosidade ao longo da orientação local do poço e o vetor de polarização as estimativas mais confiáveis estão em um cone cujo eixo coincide com a orientação local do poço. Conseqüentemente somente os parâmetros WA que afetam esses dados são bem resolvidos. Desta forma o parâmetro ε_z (relacionado ao parâmetro elástico c_{33}) é o parâmetro melhor estimado e desta forma o meio isotrópico de referência é bem estimado. Além disso, para incidências menores que 30° a velocidade de fase está próxima à velocidade do meio de referência e depende somente do subconjunto de

parâmetros WA ϵ_z , χ_x , χ_y , ϵ_{15} , ϵ_{24} , ϵ_{34} e ϵ_{35} , que são melhores resolvidos nesse esquema de inversão.

- Considerando a inversão usando apenas dados de onda P direta ou usando dados de onda P refletida: A estimativa dos parâmetros WA usando apenas dados de onda direta perde um pouco em resolução e estabilidade quando comparada com a estimativa da inversão conjunta, inversão feita de dados de onda direta e refletida. Mas é a estimativa feita apenas de dados de onda refletida que é mais pobre quando comparada com a inversão conjunta.
- Considerando modelos com diferentes graus de anisotropias, os parâmetros WA são estimados a partir da inversão da equação (1), que é uma aproximação linear em torno de um meio isotrópico arbitrário, o melhor desempenho será melhor à medida que o grau de anisotropia do meio for menor também. Para meios com anisotropia moderada a forte (até 20%) verificou-se que o esquema de inversão proposto perde a validade.

Foram realizados outros testes onde as estimativas dos parâmetros WA são avaliadas considerando as possíveis escolhas dos parâmetros do meio isotrópico de referência e o grau de heterogeneidade do meio. Em relação a estes testes conclui-se que:

- As três possíveis escolhas do vetor normal à frente de onda P no meio de referência, \mathbf{n}_k . As três escolhas o vetor \mathbf{n}_k , não afetam de forma considerável as estimativas dos parâmetros WA, desde que o meio seja homogêneo ou fracamente heterogêneo. Nos testes feitos consideraram-se graus de heterogeneidade de até 30% e variações apenas na vertical. Em todos os testes sintéticos em modelos com fraca anisotropia utilizados para se estimar os parâmetros WA, foi calculado o ângulo formado entre o vetor \mathbf{n}_k no meio de referência e o vetor \mathbf{n}_k , calculado geometricamente e escolhido paralelo ao vetor de polarização. Verificou-se que em média esses ângulos não eram maiores que 4° . Este valor está dentro do limite considerado aqui aceitável de ruído nos dados de polarização de acordo com o item sobre o nível de ruído nos dados de polarização.

- A escolha da velocidade da onda P no meio de referência: As estimativas dos parâmetros WA depende fortemente da escolha de α , principalmente a estimativa do parâmetro ε_z , que é bem estimada por esse esquema de inversão.

APÊNDICE - MATRIZ DE SENSIBILIDADE

A matriz apresentada em (7) é formada pelo lado esquerdo desta equação a menos dos parâmetros WA, é uma matriz que cujo número de linhas é igual ao número de observações e o número de colunas é igual ao número de parâmetros. Para a i -ésima observação, a i -ésima linha dessa matriz é:

$$\begin{aligned}
M_{i1} &= \alpha n_{i1}^4 [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)n_{i3} - 1], & M_{i9} &= 2\alpha n_{i1}n_{i2}n_{i3} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(2n_{i3}^2 - 1) - n_{i3}], \\
M_{i2} &= \alpha n_{i2}^4 [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)n_{i3} - 1], & M_{i10} &= \alpha n_{i1}^3 [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3} - 1) - 2n_{i3}], \\
M_{i3} &= -\alpha n_{i3}^3 [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)D^2n_{i3}], & M_{i11} &= 2\alpha n_{i1}^3 n_{i2} [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)n_{i3} - 1], \\
M_{i4} &= -\alpha n_{i1}^2 n_{i3} [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)D^2n_{i3}], & M_{i12} &= \alpha n_{i2}^3 [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3} - 1) - 2n_{i3}], \\
M_{i5} &= \alpha n_{i2}^2 n_{i3} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(2n_{i3}^2 - 1) - n_{i3}], & M_{i13} &= 2\alpha n_{i2}^3 n_{i1} [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)n_{i3} - 1], \\
M_{i6} &= \alpha n_{i1}^2 n_{i2}^2 [2\alpha(\alpha^2 - \beta^2)n_{i3} - 1], & M_{i14} &= \alpha n_{i3}^3 n_{i2} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3} - 1) - 2], \\
M_{i7} &= \alpha n_{i1}^2 n_{i2} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3}^2 - 1) - 2n_{i3}], & M_{i15} &= \alpha n_{i3}^3 n_{i1} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3} - 3) - 2]. \\
M_{i8} &= \alpha n_{i2}^2 n_{i1} [\alpha(\alpha^2 - \beta^2)(4n_{i3} - 1) - 2n_{i3}], & &
\end{aligned} \tag{18}$$

Os elementos são as i -ésimas componentes do vetor de polarização no meio de referência. As colunas estão ordenadas de acordo com a disposição dos parâmetros WA em (8).

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da UFPa, ao CNPQ e CAPES pelas bolsas de iniciação científica e mestrado. Ao Prof. Ivan Psencik pela ideia do trabalho e aos professores João Batista Correa da Silva e Jessé Costa pelas discussões.

REFERÊNCIAS

AKI, K & RICHARDS, P G -1980 - Quantitative seismology, Theory and Methods. 1. Ed W. H. Freeman and Company.

BARRETO, A. C. ; Gomes, E N S ; MACAMBIRA, R. ; COSTA, Jessé Carvalho – 2013 - Improvement of local anisotropy estimation from VSP data through experimental design. Journal of Geophysics and Engineering. v. 10, p. 045008-12.

FARRA, V. & PŠENČÍK, I. 2003. Properties of the zero-, 1st- and higherorder approximations of attributes of elastic waves in weakly anisotropic media. P. J. Acoust.Soc.Am. pp. 114, 1366.

GAJEWSKI, D & PŠENČÍK, I - 1990 - Vertical seismic profile synthetics by dynamic ray tracing in laterally varying layered anisotropic structures. J. Geophys. Res. 67(1): 300-306.

GOMES, E, ZHENG, X, PŠENČÍK, I, HORNE, S. & LEANEY, S. – 2004 - Local determination of weak anisotropy parameters from a walkaway VSP qP-wave data in the Java Sea region. Studia Geoph.et Geod. 48: 215-231.

HELBIG, K. 1994. Foundations of Anisotropy for Exploration Seismics. Oxford. Pergamon. (Handbook of Geophysical Exploration, 22).

HORNE, S. A. & LEANEY, W. S. 2000. Polarization and slowness component inversion for TI anisotropy. Geophysical Prospecting 48, 779-788.

PŠENČÍK, I & GAJEWSKI, D – 1998 - Polarization, phase velocity and NMO velocity of qP waves in arbitrary weakly anisotropic media. Geophysics. 63: 1754-1766.

RUSMANUGROHO, H. & McMEHAN, G. 2012. Sensitivity of estimated elastic moduli to completeness of wave type, measurement type, and illumination apertures at a receiver in multicomponent VSP data. *Geophysics* 77, 1-18.

SCHOENBERG, M. & DOUMA, J. 1988. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophys Prosp. Eur. Assn. Geosci. Eng.*, 36, 571-590.

THOMSEN, L - 1986 - Weak elastic anisotropy. *Geophysics*. 51 (10): 1954-1966.

ZHENG, X & PŠENČÍK, I – 2002 - Local determination of weak anisotropy parameters from qP-wave slowness and particle motion measurements. *PAGEOPH.*159: 1881-1905.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Configuração da aquisição de VSP walkaway multiazimutal. As fontes estão localizadas em perfis (com a cor magenta) na superfície em cada lado do poço, que está no centro. Os receptores estão localizados no interior do poço.....14
- Figura 2: Disposição das fontes e do receptor para o modelo I, sendo que as fontes (F) estão na superfície espaçadas de 0.1 km e o poço está no centro e os receptores (R) no interior deste. As ondas P diretas estão em azul e as refletidas em vermelho.....17
- Figura 3: Distribuição dos perfis (magenta) para o modelo 2, sendo os pontos pretos as fontes e o centro é a cabeça do poço.....18
- Figura 4: Esta Figura representa um meio homogêneo, em que as fontes estão distribuídas irregularmente. A linha azul representa a onda direta e a linha vermelha está mostrando a onda refletida. Ambas são linhas retas devido ao meio ser homogêneo.....18
- Figura 5 - Para o receptor #1 no modelo I, mais raso, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.....21
- Figura 6 - Para receptor #1 no modelo I, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções.....22
- Figura 7 - Para o receptor #2 no modelo I, mais profundo, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização

contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.....23

Figura 8 - Para o receptor #2 do modelo I, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções para os quatro níveis de ruído..... 24

Figura 9 - Para um receptor a profundidade de 0,25 km no modelo II, os estereogramas representam: a) Velocidade de fase calculada a partir dos parâmetros WA. b) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído I. c) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - b. d) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído II. e) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - d. f) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído III. g) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - f. h) Velocidade de fase calculada utilizando os parâmetros WA estimados a partir dos dados de vagarosidade e polarização contaminados com o nível de ruído IV. i) Erro percentual relativo entre as velocidades de fase de a - h.....27

Figura 10 - Para o modelo II, são mostrados os estereogramas com a variação percentual da velocidade de fase em todas as direções.....28

Figura 11 - Na Figura 11, os estereogramas representam: a) Erro considerando a velocidade de fase calculada usando os parâmetros WA estimados a partir de dados de vagarosidade e polarização de ondas P diretas e refletidas. b) Erro considerando a velocidade de fase calculada usando os parâmetros WA estimados a partir de dados de vagarosidade e polarização de ondas P diretas.....29



Sociedade Brasileira de Geofísica
Revista Brasileira de Geofísica - RBGf

DECLARAÇÃO

Declaro, para os devidos fins, que em 23/10/2013 o artigo intitulado "Analysis of a Linear Scheme for Estimation of Local Anisotropy from P-Wave data in Multi-Azimuth VPS Surveys" da autoria de Raiza de Nazaré Assunção Macambira, Ellen de Nazaré Souza Gomes e Adriano Cezar Rodrigues Barreto, foi submetido à Revista Brasileira de Geofísica para que possa ser avaliado pelo corpo editorial visando a possível publicação.

Rio de Janeiro, 05 de dezembro de 2013.


Adriana Reis Xavier

Editora da Sociedade Brasileira de Geofísica

Sociedade Brasileira de Geofísica
Avenida Rio Branco, 156 Sala 2509
Cep: 20043-900 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil