



## Inversão sísmica em três dimensões a partir de dados de reflexão sísmica por algoritmos genéticos híbridos\*

Samuel G. Huamán Bustamante (\*), ICA/DEE/PUC-Rio, Brasil  
Marco Aurélio C. Pacheco ICA/DEE/PUC-Rio, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The objective of the present work is to investigate a method to help in the quantification of seismic characteristics underground. The two-dimensional seismic model of reflection employs the equation *Normal Move Out* (NMO) to calculate the travel times of P waves reflected on inclined and isotropic layers. This equation uses the root mean square velocity as a representative value of the joined layers velocities. At the inversion process, for multiple layers, the root mean square velocities are the main problem to estimate the layer velocities. Consequently, to solve that problem, the proposed method estimates sequentially the parameters of the seismic model using travel times and the Hybrid Genetic Algorithms (Genetic algorithm and the *Nelder Mead Simplex* algorithm). The travel times are synthetic and the estimation of parameters is treated as a minimization problem. With proposed method was obtained high grade of accurate, and the reduction of 85.23% of computing time when the method uses only Genetic Algorithms. For decreasing the complexity and the delay to generate the models in three dimensions is proposed the construction of a three-dimensional seismic model formed with two-dimensional models, under every rectangular cell of the mesh of receptors of the seismic survey, for curved isotropic layers with soft variations in the gradient and without discontinuities. The two-dimensional models form polygons that represent the surfaces of interfaces that are designed under the rectangles of the surface or soil. Two sets of polygonal surfaces are generated to help at the geometric localization of layers.

### Introdução

A sísmica de reflexão foi evoluindo desde a interpretação de traços sísmicos no tempo para determinar a espessura das camadas (1D), logo de um conjunto de traços sísmicos obtidos por receptores distribuídos numa linha horizontal para formar uma seção (2D), e finalmente de um conjunto de traços sísmicos distribuídos numa superfície para formar um volume (3D).

Desde alguns anos atrás, existe uma tendência de priorizar a sísmica 3D. Um dos fatores para isto é o avanço tecnológico, especialmente na área de

processamento de dados, face à possibilidade de um melhor entendimento geológico através da visualização das seções sísmicas e cortes horizontais que podem ser feitos ao longo de todo um cubo sísmico (Brown, 1999).

As técnicas 3D, apesar dos seus altos custos tornam-se extremamente atrativas por permitirem tanto a redução do número de poços necessários, quanto uma mais eficaz locação destes últimos (Onip, 2003). Um fator importante é a densidade dos traços da malha que irá afetar tanto qualidade da imagem (denso é melhor) como o custo do projeto (esparsa é melhor) (Cooper, 2004).

Até agora foram desenvolvidas complicadas equações, e toda vez mais exatas, visando estimar parâmetros e descrever formas na subsuperfície. Embora muitas destas equações sejam simplificações para reduzir o tempo de cômputo, ainda existem possibilidades de desenvolver novos métodos e adaptar técnicas para reduzir o tempo de cômputo e melhorar a acurácia. Na literatura podem ser encontrados trabalhos que aplicam métodos, com diferentes técnicas, para estimar parâmetros sísmicos. (Margrave, 2003) Alguns desses métodos utilizam Algoritmos Genéticos, mas sem muito sucesso quando a complexidade do problema aumenta (Medeiros, 2005).

A proposta deste trabalho é desenvolver um método eficaz para estimar os parâmetros sísmicos de um modelo de camadas isotópicas em três dimensões com baixo grau de inclinação a partir de dados de reflexão sísmica 3D disponibilizados, usando Algoritmos Genéticos Híbridos (AGH).

Nos capítulos seguintes se descreve a sísmica de reflexão orientada à estimação de parâmetros sísmicos de um modelo sísmico em três dimensões a partir de um modelo bidimensional.

### Descrição do Problema Principal e do Modelo de Camadas Inclinadas Isotópicas

Nesta seção é descrito o modelo sísmico para múltiplas camadas inclinadas bidimensionais, que relacionam os parâmetros medidos (ou dados observáveis) com os parâmetros a serem estimados. Também é descrito o método seqüencial de estimação proposto usando AGH e o método de levantamento sísmico para estimar parâmetros de camadas em três dimensões.

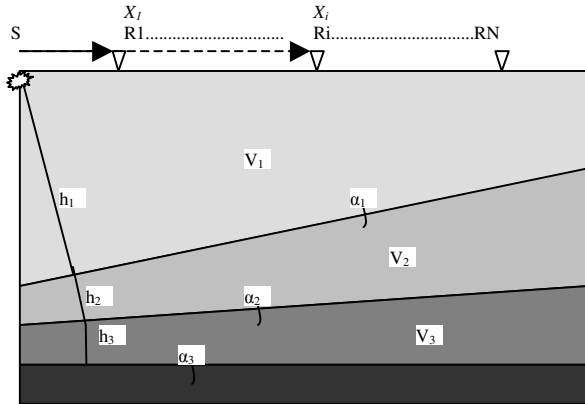
Os principais parâmetros dos modelos usados na reflexão sísmica são as velocidades, porque estão relacionadas com os parâmetros elásticos das estruturas do subsolo. Quando as ondas atravessam múltiplas camadas muitas vezes não é fácil determinar com exatidão a diferença entre uma e outra, (pela mudança

continua das propriedades). Isto é devido a que as mudanças das amplitudes das ondas sísmicas refletidas são tão pequenas que não é possível perceber a interface entre duas camadas. Por isto pode-se dizer que a velocidade intervalar atribuída a uma camada é também uma velocidade representativa. Aproveitando a idéia anterior, para o cálculo do tempo de trânsito das ondas sísmicas, duas camadas com velocidades diferentes podem se fundir para formar uma nova camada. A nova velocidade é função das velocidades das camadas unidas. Uma forma de calcular a velocidade representativa é usando a velocidade raiz média quadrática, da expressão (1),

$$V_{rms}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N V_i^2 t_{oi}}{\sum_{i=1}^N t_{oi}}, \quad (1)$$

que é função das velocidades das camadas e dos tempos de deslocamento zero de cada camada acima da interface analisada, onde a  $V_{rms}$  depende do tipo do meio (para meios homogêneos e isotrópicos),  $N$  é o número de camadas consideradas,  $V_i$  é velocidade intervalar ou do meio 'i',  $t_{oi}$  é o tempo de deslocamento zero para a camada 'i'.

Há muitos casos onde é preciso estimar os parâmetros em camadas curvas (como as dobras geológicas) onde as interfaces são não lineares, mas é possível dividi-las em segmentos retos considerando um ângulo de inclinação com referência ao horizonte. Assim há um novo parâmetro para estimar. A análise se faz primeiramente para uma interface e depois, por indução se estende para várias interfaces (das camadas). Em Dourado (2008) pode-se encontrar o cálculo do tempo de trânsito para uma camada inclinada com um ângulo de inclinação  $\alpha$ , isotrópica, com uma fonte e um receptor.

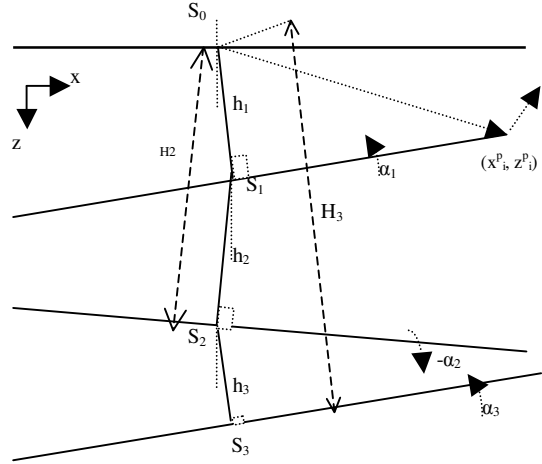


**Figura 1** - Parâmetros sísmicos para múltiplas camadas inclinadas e deslocamentos entre fonte e receptores.

No caso de múltiplas camadas inclinadas, se devem considerar um ângulo para cada interface, como é apresentado no perfil da Figura 1.

As distâncias  $h_i$  são as trajetórias mais curtas que a onda sísmica percorre (são perpendiculares às interfaces), então o ponto onde a onda atinge perpendicularmente a interface é o ponto de início da propagação da onda no seguinte meio e ponto de localização da nova distância mais curta até a próxima camada. Para calcular os

tempos de trânsito das ondas refletidas P em camadas inclinadas, aplica-se o mesmo critério das camadas horizontais: a união de camadas.



**Figura 2** - Seção com camadas inclinadas com interfaces retas com os parâmetros que descrevem o modelo sísmico.

Para induzir a equação do tempo, para a camada 'i' com registro do receptor 'j', observar a Figura 2, e o sentido de giro na medição do ângulo de inclinação, tal e como mostrado na Equação (2).

$$t_{i,j}^2 = \left( \frac{H_i \cos \alpha_i}{V_{rms_i}} \right)^2 + \frac{(X_j + 2 H_i \sin \alpha_i)^2}{V_{rms_i}^2}, \quad (2)$$

Onde  $H_i$  é a nova distância mais curta da fonte à interface da camada 'i',  $\alpha_i$  é o ângulo de inclinação,  $V_{rms_i}$  é a velocidade da onda na nova camada e  $X_j$  é o deslocamento entre a fonte e o receptor 'j'. A seguir se a expressão que determina a menor distância  $H_i$ , desde o ponto da origem  $S_0$  da onda sísmica até uma camada 'i' sob a superfície da terra.

$$H_i = \sum_{c=1}^i h_c \cos(\alpha_c - \alpha_i), \quad (3)$$

onde  $\alpha_c$  é o ângulo de inclinação da camada intermediária 'c' e  $\alpha_i$  é o ângulo de inclinação da última camada considerada.

Dado que os tempos de deslocamento zero  $t_{oi}$  não são constantes na camada 'i' então os pesos para a  $V_{rms_i}$  também muda. Os novos pesos devem ser proporcionais aos tempos que a onda demora em atravessar cada camada. Então propõe-se que o tempo-peso para a camada 'i' e para o receptor 'j', seja calculado tal e como mostrado na Equação (4),

$$t_{oi} = \frac{2 \left( (H_i + (X_j/2) \sin \alpha_i) - (H_{i-1} + (X_j/2) \sin \alpha_{i-1}) \right)}{V_{rms_i}}, \quad (4)$$

todos os termos desta equação já foram definidos anteriormente.

Na Figura 2 pode-se observar que se as coordenadas  $x_i^p$  e  $z_i^p$  dos pontos de reflexão na superfície de interface são conhecidos, então pode se induzir a partir da primeira camada a menor distância para a camada 'i', é:

$$h_i = z_i^p \cos\alpha_i + x_i^p \operatorname{sen}\alpha_i - \sum_{c=1}^{i-1} h_c \cos(\alpha_c - \alpha_i). \quad (5)$$

### Método de Estimação de Parâmetros

A estimação é planejada como se fosse um problema de otimização que emprega AGH (Gouveia, 1994). A metodologia proposta deve organizar eficientemente os métodos e técnicas de otimização para obter resultados de um modo exato e rápido.

A partir dos traços sísmicos é disponibilizado um conjunto de dados de tempo para cada camada. Devem existir mais equações do que parâmetros a serem estimados para lidar com a incerteza e ruído das medições (Tarantola, 2005), logo o problema torna-se um problema de otimização. Para cada camada inclinada se resolve um sistema de equações não lineares. Este sistema é formado com 'j' filas e igual ao número de receptores para a camada 'i', onde os tempos  $t_{rij}$  são valores observados ou de referência (dados) e os deslocamentos  $X_j$  considerados constantes para cada equação. Assim, cada camada apresenta um sistema de equações próprio, relacionado com o sistema anterior mediante  $H_i$  e  $V_{rms\_i}$ . Os valores dos tempos,  $t_{is}$ , são calculados a partir dos parâmetros estimados. Para achar a raiz dos erros médios quadráticos, da expressão (6) que também é a função de avaliação, usam-se os tempos sintéticos (ou medições no campo)  $t_{ris}$ , e os tempos  $t_{is}$ . Quando menor o erro  $E_{rms}$  significa que os parâmetros estão mais perto dos valores reais ou originais.

$$E_{rms\ i} = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{s=1}^j \left( \frac{t_{ris} - t_{is}}{t_{ris}} \right)^2}. \quad (6)$$

A expressão (6) se torna a função de avaliação para o método de otimização.

Para resolver este sistema de equações completo usando AGH, diferente de trabalhos de pesquisa anteriores (Medeiros, 2005), inicia-se pela primeira camada onde há um número de parâmetros pequeno e estes não dependem de resultados anteriores. Para obter os parâmetros ótimos da camada 'i' se aproveitam os resultados das 'i-1' camadas anteriores. Quando se tenta resolver simultaneamente o sistema de equações de todas as camadas a expressão  $V_{rms}$ , desde a segunda camada até a última, se torna não unívoca, isto é, que uma infinidade de combinação de valores das velocidades intervalares pode satisfazer a expressão. Isso faz que a convergência ao valor mínimo zero, da curva de desempenho, do  $E_{rms}$  se torne difícil.

Estrutura do Cromossomo: os três genes, para o modelo sísmico de camadas inclinadas isotrópicas, como da Tabela 1, são: distância mínima, velocidade da onda na camada e ângulo de inclinação da camada. Esta forma do cromossomo permite generalizar o método para

múltiplas camadas com mínimas alterações dos parâmetros do AG por camada; se ajustam só uma vez, e quando é aumentada uma camada ao modelo o ajuste de parâmetros é feito só para esta camada.

**Tabela 1** - Matriz que representa a estrutura da solução geral para o modelo de camadas inclinadas e isotrópicas. Um cromossomo por cada camada.

Matriz para o modelo X ou Y			
Estrutura do Cromossomo	Gene1	Gene2	Gene3
Solução para a 1 <sup>a</sup> Camada	$h_1$	$V_1$	$\alpha_1$
Solução para a 2 <sup>a</sup> Camada	$h_2$	$V_2$	$\alpha_2$
...	...	...	...
Solução para a i <sup>a</sup> Camada	$h_i$	$V_i$	$\alpha_i$

Os valores dos genes devem estar compreendidos em domínios definidos pelas características de origem dos dados sísmicos.

Operadores Genéticos: para resolver o sistema de equações é necessário representar os genes com números reais (Michalewicz, 1996). Os operadores genéticos para cromossomos com genes reais têm o mesmo princípio de operação que os binários, o que muda é a natureza continua dos genes que podem ter uma infinidade de valores dentro de seus intervalos de definição. Neste trabalho se empregou as bibliotecas de *Toolbox* do Matlab (Mathworks, 2007). Para reprodução o Matlab têm operadores para realizar o elitismo, seleção estocástica uniforme, cruzamento heurístico e mutação uniforme.

Parâmetros da Evolução - para o controle da população o Matlab usa alguns parâmetros para o tipo da população (vetor de reais para este trabalho). Para o tamanho da população específica quantos indivíduos existem em cada geração. Os valores iniciais da população podem ser preenchidos usando uma função estabelecida pelo Matlab (*uniforme*). É claro que com os valores iniciais preenchidos por um especialista pode diminuir o tempo de execução, mas poderia ser impraticável iniciar as populações em projetos com uma grande quantidade de experimentos ou problemas de minimização. Como o método seqüencial proposto neste trabalho usa um AGH para resolver o sistema de equações de cada camada, dois parâmetros do AGH mudam para melhorar seu desempenho: a taxa de mutação e o número de gerações.

Parâmetros do Algoritmo Nelder Mead Simplex: Para construir um algoritmo híbrido o Matlab usa um AG e algumas funções de minimização como a função que usa o método de busca do algoritmo *Nelder Mead Simplex* (Lagarias et al., 1998). Este método de busca direta não usa gradientes numéricos ou analíticos (Mathworks, 2007).

Estudo de Caso prévio: Para avaliar o método de estimação de parâmetros proposto no trabalho original (Huamán, 2008) foi feito um caso de estudo, para o modelo sísmico de camadas isotrópicas inclinadas, usando dados sintéticos dos tempos de trânsito das

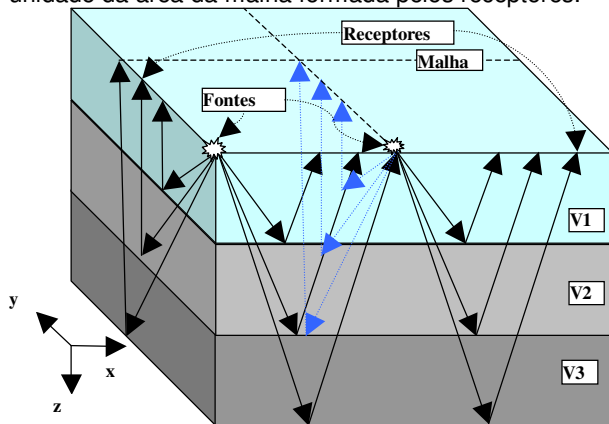
ondas refletidas P, e neste artigo se apresenta o resultado, onde usaram-se tempos de trânsito sintéticos de referência para evitar acumulação de erros na interpretação dos dados. Os tempos de referência foram calculados com as mesmas equações da função de avaliação. Isto permitiu fazer uma análise mais objetiva do método.

Houve uma redução do número de experimentos e conseqüentemente do tempo de execução das subrotinas com AGH em aproximadamente 85,23% em comparação as subrotinas com AG. Cada valor do tempo de execução é a mediana de 10 experimentos diferentes num intervalo de 390 até 788 segundos usando AG, e de 51 até 92 segundos usando AGH. Para quantificar o erro global do modelo se empregou o erro percentual médio absoluto simétrico modificado, msMAPE (Chen et al., 2004), dado que existem valores de referência iguais a zero.

Foram feitas heurísticas para determinar o número de Receptores e influência do Ruído que podem ser conferidos no trabalho de Huamán (2008).

### Método de Levantamento Sísmico

O método de levantamento proposto está baseado na distribuição perpendicular dos receptores, apresentado no capítulo dois e detalhada na Figura 3. Essa distribuição tem a vantagem de estimar as pendentes (ângulo de inclinação) das camadas em ambas as direções  $X$  e  $Y$ , com as quais é possível estimar a orientação das superfícies de reflexão para uma dobra ou unidade da área da malha formada pelos receptores.



**Figura 3** – Representação do cubo sísmico para o levantamento proposto. Distribuição das fontes e receptores para cada unidade ou dobra da malha que cobre a área do levantamento.

Ao iniciar, localiza-se a área do levantamento e se divide em uma malha de quadrados ou retângulos com lados que satisfazem a taxa de aspecto (Cooper, 2004). Os espaçamentos dos receptores e fontes dependem da profundidade ou da resolução esperada. Os receptores se distribuem ao longo dos lados dos quadrados ou retângulos. As fontes se localizam nos vértices e junto com os receptores formam tiros sísmicos. Esta distribuição simplifica as equações que dependem do azimute. Antes de estabelecer o tamanho dos retângulos se deve fazer testes para evitar reflexões sobre

superfícies descontínuas. Também se podem amostrar múltiplas vezes ou deslocar as fontes constantemente.

Simulador: desenvolveu-se um simulador de levantamento sísmico simples, em três dimensões para gerar as duas matrizes com os parâmetros das seções verticais paralelas o eixo  $X$  e  $Y$ , dos tempos de referência (dados) para cada retângulo da malha. O simulador está formado por oito blocos de código (no Matlab):

### Estudo de Caso

O estudo de caso, para avaliar o método de estimação de parâmetros tridimensional, foi realizado em um modelo de referência de três camadas, e foram realizados os procedimentos seguintes.

O modelo sintético tridimensional consta de três camadas homogêneas e isotrópicas separadas com superfícies curvas, geradas com curvas senóides e parabólicas. As camadas curvas estão empilhadas como se fossem estratos que formam uma dobra geológica. Assume-se que a velocidade da onda nas camadas é proporcional à profundidade.

**Tabela 2** – Intervalos dos parâmetros Sísmicos da estrutura de camadas curvas e isotrópicas em três dimensões.

	Espessura [ $h_{min}$ $h_{max}$ ] m	Velocidade da Onda P (m/s)	Ângulo de Inclinação (rad) [ $\alpha_{min}$ $\alpha_{max}$ ]
1 <sup>a</sup> Camada	[360,0 520,0]	2000	X: [-0,2065 0,2065] Y: [0,0 -0,3218]
2 <sup>a</sup> Camada	[122,0 228,0]	2500	X: [-0,0627 0,0627] Y: [0,0 -0,1244]
3 <sup>a</sup> Camada	[258,1 311,9]	3000	X: [-4,7x10 <sup>-4</sup> 4,7x10 <sup>-4</sup> ] Y: [0,0 0,0].

O cubo sísmico tem comprimento de 1200 metros no eixo  $X$ , 480 no eixo  $Y$ . A profundidade de exploração é assumida próxima aos 1000 metros. A Tabela 2 descreve o número de camadas e os intervalos dos parâmetros sísmicos.

Para gerar os tempos sintéticos (dados) é usado o simulador descrito na seção anterior. A área da malha é de 480 x 1200 m<sup>2</sup>, dividida em 10 quadrados de 240 x 240 m<sup>2</sup>, onde os deslocamentos máximos em  $X$  e  $Y$  são iguais a 240 metros. O número de receptores por tiro sísmico (ou lado do quadrado) é de 12 com distâncias de 20 metros entre receptores e entre fonte e o receptor mais próximo. Com 12 ou mais receptores é possível obter rapidez para a resolução do sistema de equações Huamán (2008).

Com as matrizes das soluções, formadas com os parâmetros sísmicos estimados para cada tiro sísmico paralelos aos eixos  $X$  e  $Y$ , é construída uma estrutura, composta de estruturas mais simples para cada retângulo da malha, mostradas na Tabela 3.

Fica clara a qualidade dos resultados da estimação das velocidades intervalares (as segundas colunas das submatrizes), nas Tabela 3. Para avaliar os outros dois parâmetros é necessário transformá-los a coordenadas, e assim, compará-los com os pontos da superfície original.

**Tabela 3** – Estrutura com os resultados da estimação usando AGH para os tiros sísmicos paralelos ao eixo X. A ordem das matrizes está invertida em Y. Por exemplo, a matriz (3; 1) contém os parâmetros do modelo paralelo ao eixo X do quadrado da malha (3;1)

2	412,9	2 000,0	0,2026	462,2	2 000,0	-0,0111	435,2	2 000,0	-0,2008	390,2	2 000,0	-0,0853	386,0	2 000,0	0,0920
	201,4	2 500,0	0,0611	157,8	2 500,0	-0,0020	182,7	2 500,0	-0,0614	209,5	2 500,0	-0,0301	213,5	2 500,0	0,0325
	294,5	3 000,0	0,0004	280,1	3 000,0	0,0000	291,1	3 000,0	-0,0004	301,8	3 000,0	-0,0003	302,2	3 000,0	0,0003
1	393,8	2 000,0	0,2030	442,2	2 000,0	-0,0108	415,7	2 000,0	-0,2013	370,3	2 000,0	-0,0865	366,3	2 000,0	0,0932
	213,0	2 500,0	0,0611	170,4	2 500,0	-0,0020	194,6	2 500,0	-0,0614	221,9	2 500,0	-0,0302	225,7	2 500,0	0,0325
	301,8	3 000,0	0,0004	287,6	3 000,0	0,0000	298,4	3 000,0	-0,0004	309,2	3 000,0	-0,0003	309,7	3 000,0	0,0003
Posição Y/X	1			2			3			4			5		

Para gerar as superfícies estimadas se intersectam as retas de interface dos modelos sísmicos vizinhos de camadas inclinadas em X, que representam à interface entre duas camadas, para obter os vértices dos polígonos das superfícies de interfaces entre camadas, justo embaixo dos quadrados vizinhos da malha de receptores da superfície. O número de secções paralelas ao eixo X é de três. Cada seção paralela esta deslocada 0, 240 e 480 metros respectivamente. Para determinar os vértices dos polígonos do segundo conjunto de superfícies de interface se executam os mesmo procedimentos do primeiro conjunto, mas com os parâmetros estimados dos modelos sísmicos paralelos ao eixo Y, mostrados na Figura 4.

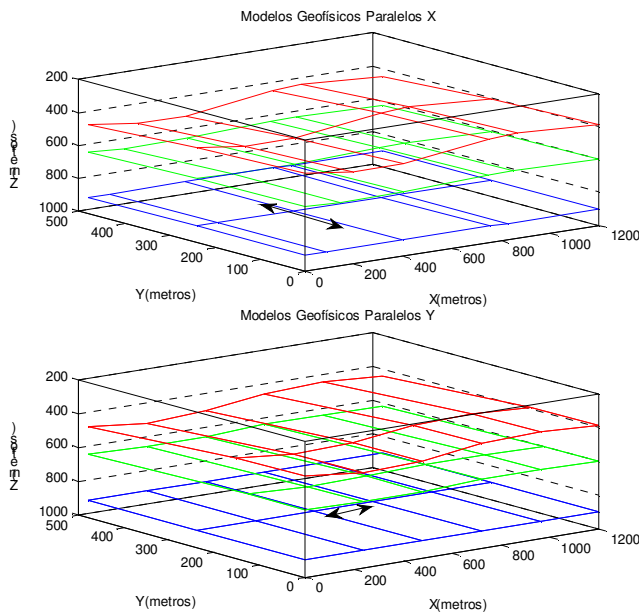
distâncias e os ângulos) estimados são avaliados separadamente. Os parâmetros geométricos do modelo estimado são representados pelas coordenadas dos vértices das superfícies, e assim, são calculados os erros em relação com as coordenadas das superfícies originais. O MAPE das velocidades no eixo X esta no intervalo de 0 até  $0,2306 \times 10^{-5} \%$ , e no eixo Y no intervalo de  $0,0997 \times 10^{-5} \%$  até  $0,2584 \times 10^{-5} \%$ .

Uma característica que influencia na estimação de parâmetros do estudo de caso proposto é a rugosidade. A rugosidade é calculada através de uma corda de comprimento conhecido, esticada acima do substrato (superfície). Uma cadeia que está ligada a um extremo da corda é apoiada em todo o contorno do substrato. A rugosidade é a razão entre o comprimento da cadeia (A) e o comprimento da corda (B) da Eq.16. (Shumway, 2008; Luckhurst et al., 1978)

$$Rugosidade = A/B . \quad (7)$$

Os resultados dos erros indicam uma relação proporcional entre rugosidade e os erros de estimação dos parâmetros sísmicos.

O tempo de execução para estimar os parâmetros e gerar as superfícies do cubóide sísmico foi de 40 minutos, aproximadamente, com os seguintes recursos computacionais: processador de 64 bits, 1,81 GHz e 1 GB de RAM. Os resultados são do experimento mais rápido de um conjunto de cinco (5) experimentos com tempos execução de 40 até 55 minutos. Considerou-se mais relevante à escolha do experimento mais rápido do que as pequenas diferenças dos erros de estimação entre experimentos.



**Figura 4** – Três Superfícies Estimadas das interfaces entre camadas para cada conjunto de superfícies geradas uma com os modelos X (esquerda) e a outra como os modelos Y (direita).

**Resultados**

Os resultados, da estimação de parâmetros, são avaliados usando duas métricas do erro: erro percentual absoluto e erro percentual absoluto médio (MAPE). Os erros das velocidades e os parâmetros geométricos (as

**Tabela 4** – Erros percentuais absolutos para as componentes em Z de cada vértice das superfícies estimadas, MAPEs, erros máximos e rugosidades para cada superfície de interface construída a partir de modelos sísmicos paralelos ao eixo X.

	Erros Percentuais Absolutos dos Vértices – Modelos paralelos a X						MAPE	Erro Máximo	Rugosidade
Interface 1	0,0082	0,0157	0,0181	0,0222	0,0132	0,0304	3,15%	32,77 m	1,0109
	0,027	0,0179	0,0496	0,0159	0,0258	0,0645			
	0,038	0,0319	0,0589	0,027	0,0345	0,0683			
Interface 2	0,0026	0,0078	0,0028	0,0047	0,0029	0,0034	0,54%	7,75 m	1,0010
	0,0068	0,0016	0,012	0,0049	0,0067	0,0128			
	0,0036	0,0012	0,0088	0,0016	0,0032	0,0092			
Interface 3	0	0,5e-4	0,28 e-4	0,13 e-4	0,02 e-4	0,19 e-4	0,00%	0,05 m	1,0000
	0	0,5 e-4	0,28 e-4	0,13 e-4	0,02 e-4	0,19 e-4			
	0	0,5 e-4	0,28 e-4	0,13 e-4	0,02 e-4	0,19 e-4			

### Conclusões

O método seqüencial proposto neste trabalho consegue estimar com exatidão e rapidez os parâmetros das camadas, para modelos sísmicos com camadas inclinadas isotrópicas. A exatidão está ligada à forma seqüencial de resolver o sistema de equações que consegue a unicidade das equações das velocidades  $V_{rms}$  e evita aos AGs e AGHs fazerem a busca em um espaço muito amplo e com múltiplos mínimos. A rapidez ou diminuição do tempo de aproximadamente 85,23%, é resultado de usar AGHs no lugar de AGs. Esse último valor mostra uma vantagem considerável dos AGHs empregados para solucionar o sistema de equações não lineares. Com um número adequado de receptores (e de equações), três vezes maior do que o número de parâmetros é possível conseguir pequenos erros de estimação. Se este número cresce, então o tempo de execução diminui até um valor mínimo, determinado pelos recursos computacionais. A distribuição das linhas de receptores, em ângulo reto, proporciona informação redundante para conferir os resultados da estimação. Os dois conjuntos de superfícies geradas, com os modelos sísmicos estimados, fornecem informação complementar das pendentes e curvatura das verdadeiras superfícies. O método proposto consegue estimar com exatidão as velocidades, da onda P nas camadas, para os modelos paralelos aos eixos X e Y. Isto é importante porque as velocidades são usadas para calcular propriedades mecânicas das camadas, além disso, podem auxiliar a outros métodos sísmicos e de migração. Na realidade, com dados reais, é possível ter erros na estimação por duas causas: a primeira é por considerar um plano de reflexão vertical; a segunda é por considerar trajetórias retas das frentes de onda. Outra fonte de erro depende do tipo de estrutura, quanto mais rugosa a superfície, maiores serão os erros dos vértices dos polígonos

### Referência Bibliográfica

- Brown, A. R.** Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data, 5th Edition, Memoir, 42, American Association of Petroleum Geologists, 1999.
- Huaman B., S. G.** Inversão de parâmetros sísmicos em três dimensões a partir de dados de reflexão sísmica por algoritmos genéticos híbridos. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro RJ, Brasil, agosto 2008.

- Chen, Z.; Yang, Y.** Assessing Forecast Accuracy Measures. Iowa, USA: Iowa State University, March 2004.
- Cooper N. A** world of reality—Designing land 3D programs for signal, noise, and prestack migration, part 1 of a 2-part tutorial. Calgary, Alberta, Canada: Mustagh Resources, October 2004.
- Dourado, J. C.** Sísmica de Reflexão 3, A Seção Sísmica. Aula 8, revisão 2001. Disponível em: <www.geologia.ufpr.br/graduacao/geofisica2007/reflexa\_o3\_aula8.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2008.
- Gouveia, W.** Residual statics estimation by a hybrid distributed genetic algorithm. Consortium Project on Seismic Inverse Methods for Complex Structures, May 10, 1994. CWP-153. PDF File.
- Lagariasy, J. C.; Reedsz, J. A.; Wrightx, M. H.; Wright, P. E.** Convergence Properties of The Nelder-Mead Simplex Method In Low Dimensions. Society for Industrial and Applied Mathematics Vol. 9, No. 1, pp. 112-147, 1998.
- Luckhurst B. E.; Luckhurst K.** Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities, Journal of Marine Biology. Volume 49, Number 4, December, 1978.
- Margrave, G. F.** Numerical Methods of Exploration Seismology with algorithms in MATLAB. Calgary, Canada: Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, July 11, 2003.
- Mathworks, Inc.** Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox™ 2. User's Guide, copyright 2004-2007. Disponível em: <www.mathworks.com>. Acesso em 7 jun. 2008.
- Medeiros, S. C. D.** Inversão de Parâmetros em Dados Sísmicos por Algoritmos Genéticos. 2005. 87p. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.
- Michalevicz, Z.** Genetic Algorithms + data structures = evolution programs. Springer-Verlag, 1996.
- Onip; On.** Situação da Sísmica Terrestre no Brasil: Projeto ONIPGEO. CTPetro, FINEP. 2003.
- Shumway, Lab-Research.** Rugosity, Habitat Complexity, Evolution of Brain and Behavior in African Cichlid Fishes. Disponível em: <http://people.bu.edu/cshumway/Habitat%20Complexity.htm> . Acesso em 4 jul. 2008.
- Tarantola, A.** Inverse Problem Theory and Method for Model Parameter Estimation. Paris, France: Siam, 2005. 357p.