



Últimos resultados de tomografia sísmica regional no Brasil e avaliação de sua incerteza

Marcelo Peres Rocha¹, Marcelo Assumpção¹ e Martin Schimmel²

1 - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP); 2 – Institut de Ciències de la Terra “Jaume Almera” (IJA,CSIC), Barcelona, Espanha

Copyright 2006, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no II Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, Natal, 21-23 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do II SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Nos resultados recentes de tomografia sísmica regional com ondas P e S foram reveladas novas anomalias que não tinham sido observadas em trabalhos anteriores, como por exemplo, maiores velocidades na parte oeste do cráton do São Francisco e menores velocidades no sul do estado do Mato Grosso. Isso se deu, principalmente, pela expansão da área de estudo com a instalação de novas estações. Com o aumento da base de dados foi possível obter também uma melhor definição das anomalias que já tinham sido observadas. Os resultados para onda S se correlacionam bem com os de onda P, o que indica que as anomalias observadas são robustas, já que para cada um desses tipos de onda existe uma base de dados independente. Para estimar e localizar as incertezas dos resultados, implementamos o método estatístico de re-amostragem *Jackknife*, além das clássicas inversões com modelos sintéticos.

Introdução

O método de tomografia sísmica regional de tempo de percurso tem sido aplicado nos últimos anos nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil para ondas P (e.g. VanDecar et al., 1995; Schimmel et al., 2003; Escalante, 2002; Rocha, 2003; Rocha et al., 2004; Rocha & Assumpção, 2005) e ondas S (e.g. VanDecar et al., 1995; Schimmel et al., 2003) com o objetivo de observar anomalias de velocidade no manto superior e correlacioná-las com as principais estruturas tectônicas nessa região. Recentemente novos dados foram processados, revelando estruturas em regiões nas quais isso ainda não era possível devido falta de estações.

A área de estudo bem como a distribuição das estações está mostrada na Figura 1. Nesta figura, as linhas finas representam os limites políticos, e as linhas grossas as principais províncias geológicas. Estações de período curto foram utilizadas somente para ondas P (símbolos pretos). Estas estações não foram utilizadas para onda S devido não registrarem as frequência dominantes para este tipo de onda (frequências entre 0.05 e 0.2 Hz). As estações que foram utilizadas tanto para ondas P como para ondas S estão representadas por símbolos brancos

na Figura 1. Os diferentes símbolos da Figura 1 representam os projetos e as instituições dos quais cada estação pertence. As informações dos eventos foram obtidas de tabelas da USGS (*US Geological Survey*). Na Figura 2 está mostrada a distribuição dos eventos com respeito à área de estudo para onda P e S.

Durante a interpretação dos resultados, é necessário possuir informações sobre a resolução do modelo tomográfico, bem como estimativas de sua incerteza. Sem estas análises as imagens tomográficas têm o seu valor interpretativo reduzido (Schimmel et al., 2003). Nós utilizamos o método *Jackknife* (Efron, 1982; Lees & Crosson, 1989) de análise estatística na base de ondas S para mapear sua incerteza. Os resultados destas análises são preliminares.

Metodologia da tomografia sísmica

As imagens tomográficas apresentadas aqui foram geradas a partir da inversão de resíduos relativos de tempo de percurso de ondas telessísmicas. O esquema utilizado para inversão foi o de VanDecar (1991).

Os resíduos relativos são obtidos da diferença entre o tempo de chegada observado (marcado visualmente no sismograma) e o tempo teórico (no caso, IASP91 - Kenneth & Engdahl, 1991), sendo que para cada evento a média é subtraída dos resíduos. Esta formulação é utilizada para restringir as anomalias de velocidade ao segmento final dos raios sísmicos, e assim, eliminar a influência de estruturas fora do volume estudado.

Durante a marcação das fases, nós utilizamos o método de correlação cruzada MCPCC (Multi-Channel Phase Cross-Correlation) de Schimmel *et al.* (2003) para diminuir as inconsistências relacionadas com a presença de ruído e de chegadas simultâneas de diferentes fases no sinal.

Método Jackknife

O método estatístico de re-amostragem *Jackknife* (Efron, 1982; Lees & Crosson, 1989) foi implementado neste trabalho para estudar a incerteza do modelo tomográfico. Uma das principais vantagens deste método é que não é necessário assumir uma distribuição particular para os erros dos dados, já que a variabilidade do modelo é acessada diretamente da variabilidade destes dados (Pulliam et al., 1993). O procedimento adotado segue a formulação utilizada por Lees & Crosson (1989) e está descrito a seguir.

Primeiro, realizamos uma inversão usando todos os dados (raios) e o resultado é armazenado em uma matriz (\widehat{S}_{all}). Então, são gerados K subconjuntos a partir da base original retirando aleatoriamente desta $1/K$ raios para cada subconjunto gerado. Uma inversão é realizada para cada um dos K subconjuntos, e os resultados são armazenados em K matrizes (\widehat{S}_j). Para cada uma destas “mini-inversões” é gerada uma “pseudo-inversão” (\widetilde{S}_j), a partir da seguinte combinação linear:

$$\widetilde{S}_j = K\widehat{S}_{all} - (K-1)\widehat{S}_j \quad (1)$$

As pseudo-inversões representam a informação do modelo que é explicada pela porção dos dados que foi retirada. Considerando que cada subconjunto tem uma diferente porção de dados excluídos, a variabilidade do modelo, devido a todos os dados, está contida nas pseudo-inversões. O desvio padrão obtido com método *Jackknife* é dado pela formulação abaixo:

$$\widetilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K \widetilde{S}_j^2 - \frac{1}{K} (\sum_{j=1}^K \widetilde{S}_j)^2}{K(K-1)}} \quad (2)$$

Como o método *Jackknife* utiliza os resultados tomográficos para suas estimativas, este depende do algoritmo utilizado na inversão. Desta forma, a teoria de propagação de ondas não está diretamente envolvida neste método, estando apenas implícita pela inversão e suas aproximações.

Em nosso caso, os dados são os tempos de percurso da onda sísmica desde a fonte até a estação. Nós geramos 100 subconjuntos retirando aleatoriamente cerca de 1% de raios da base original. Retirando apenas 1% dos dados, não variamos muito a geometria da base original (eventos/estações). Se nos resultados é observada uma variação significativa devido à retirada de uma pequena quantidade de raios, poderemos concluir que nestes pontos existe uma forte dependência com os dados.

Resultados e Discussões

Os resultados estão apresentados nas Figuras 3 (imagens horizontais) e 4 (imagens verticais). Nestas figuras estão mostradas imagens tomográficas para onda P e S, e também os resultados do método *Jackknife* para ondas S.

Comparando os resultados tomográficos de onda P e onda S, observamos que existe boa correlação entre as anomalias, porém para as ondas S estas anomalias são mais espalhadas, o que pode ser explicado pela menor resolução teórica que este tipo de onda possui e também pela menor quantidade de dados processados para este tipo de onda. A base de dados para onda é parcial, faltando processar dados de algumas estações recentemente instaladas.

Nas partes sul e oeste do Cráton do São Francisco foram observadas anomalias de alta velocidade para os dois tipos de onda. No mapa de incerteza obtido com o método *Jackknife*, observa-se uma incerteza de 0,6% (cerca de metade do valor da anomalia) nessa região. Essa incerteza está sendo atribuída à menor quantidade

de cruzamentos dos raios ao se aproximar da superfície, as quais são necessárias para resolução das estruturas.

Como observado anteriormente para ondas P (Escalante, 2002; Rocha, 2003), devido ao processamento de novos dados, observou-se nos resultados de onda S uma anomalia de baixa velocidade no sul de Mato Grosso e oeste de Goiás. Essa anomalia estaria relacionada ao impacto inicial de uma hipotética pluma mantélica que teria gerado a atual Ilha de Trindade. Assumpção et al. (2004a,b) sugeriu, baseado em dados de sismicidade, que esta anomalia estaria relacionada com o afinamento litosférico existente na região de colisão entre os blocos Amazônicos e São Francisco, que deu origem à Província Tocantins. Para essa região, as incertezas obtidas com o método *Jackknife* variam entre 0,3% e 0,6% (entre 25% e 50% da anomalia) dependendo também da profundidade.

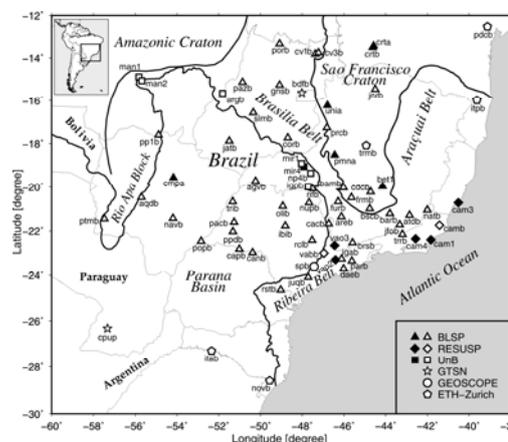


Figura 1 – Mapa da área de estudo com a distribuição das estações utilizadas. *BLSP* – Brazilian Lithosphere Seismic Project; *RESUSP* – Rede Sismográfica da Universidade de São Paulo; *UnB* – Universidade de Brasília; *GTSN* – Global Telemetered Seismic Network; *GEOSCOPE* – Institut de Physique du Globe de Paris; *ETH* – Swiss Federal Institute of Technology of Zurich.

Nos resultados para onda S observou-se também a anomalia de baixa velocidade na borda oeste da Bacia do Paraná, que segundo VanDecar et al. (1995) se trataria de uma estrutura térmica remanescente da pluma que deu origem a Ilha de Tristão da Cunha. Existem evidências de que essa anomalia não se trata de uma estrutura térmica (Liu et al., 2003). Nos resultados de onda S esta anomalia aumenta consideravelmente de volume com a profundidade, fato que não ocorre com os resultados de onda P. A base de ondas S possui menos dados processados que a base de ondas P, por isso acreditamos que a inclusão destes dados (principalmente fases do núcleo) poderiam diminuir esse efeito. De acordo com os resultados obtidos com o método *Jackknife* para ondas S, essa região possui incertezas menores que 0,3% (cerca de 20% da anomalia) em profundidades entre 250 e 600 km, o que indica que esta anomalia deve ser robusta.

A estrutura de alta velocidade relacionada com o núcleo cratônico da Bacia do Paraná observada nos resultados de onda P (Schimmel et al., 2003; Escalante, 2002 e Rocha, 2003), também foi observada nos novos resultados para onda S (e também onda P). Nos mapas de desvio padrão para onda S esta estrutura possui

predominantemente incertezas menores que 0,3% (cerca de 20% da anomalia) da anomalia.

Em maiores profundidades, a anomalia de alta velocidade interpretada como continuação da placa subduzida de Nazca em trabalhos anteriores (VanDecar et al., 1995; Schimmel et al., 2003; Escalante, 2002 e Rocha, 2003), foi mapeada como duas estruturas separadas (Figura 4b,c,f). Nos perfis verticais de desvio padrão (Figura 4j) observa-se que nesta região as incertezas chegam a valores superiores a 0,6% (cerca de 50% do valor da anomalia).

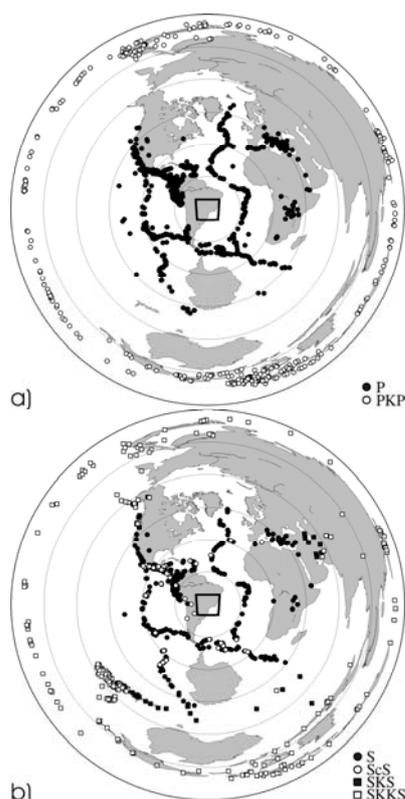


Figura 2 – Distribuição azimutal dos eventos em relação à área de estudo (retângulo preto no centro). Os círculos concêntricos indicam intervalos de distância angular de 30° com relação ao centro da área de estudo.

Conclusões

Com a instalação de novas estações foi possível mapear novas estruturas utilizando o método de tomografia sísmica regional para ondas P e S. As imagens para estas ondas são correspondentes, porém uma melhor comparação poderá ser feita quando a base de dados estiver completa. Com o método *Jackknife* foi possível obter estimativas locais da incerteza do modelo. Esse método demonstra a variabilidade do modelo tomográfico com respeito aos dados, o que não deve ser confundido com resolução. O uso deste método, em conjunto com análises de dados sintéticos permite uma interpretação mais segura das anomalias tomográficas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq (Bolsa de doutorado proc. nº. 141318/2004-0, e bolsa de estágio no exterior SWE proc. nº. 203726/2005-7), bem

como com o apoio da FAPESP, CAPES, e Fundo CT-Mineral do MCT. Agradecemos também ao Observatório Sismológico da UnB, às empresas De Beers, Embasa-BA, RTDM, ao IPT, EMATER-MG, EPAMIG, e UFMS. Agradecemos ao Institut de Ciències de la Terra “Jaume Almera” (IJA,CSIC), Barcelona, Espanha.

Referências

- Assumpção, M., Meijian An, M. Bianchi, G. S. L. França, M. Rocha, J. R. Barbosa, & J. Berrocal**, 2004a. Seismic studies of the Brasília fold belt at the western border of the São Francisco Cráton, Central Brazil, using receiver function, surface-wave dispersion and teleseismic tomography. *Tectonophysics*, 388:173–185.
- Assumpção, M., M. Schimmel, C. Escalante, M. Rocha, J.R. Barbosa & L.V. Barros**, 2004b. Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophys. J. Int.*, 159:390–399.
- Efron, B.**, 1982. The Jackknife, the Bootstrap and Other Rescaling Plans. *SIAM Rev.*, 30; 421-449.
- Escalante, C.**, 2002. Tomografia sísmica do manto superior sob o sudeste e centro oeste do Brasil: Dissertação (mestrado) IAG/USP, São Paulo, SP, 74 p.
- Kenneth, B.L.N., & Engdahl, E. R.**, 1991. Travel times for global earthquakes location and phase identification: *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.
- Lees, J. M., & R. S. Crosson**, 1989. Tomographic inversion for three-dimensional velocity structure at Mount St. Helens using earthquake data, *Journal of Geophysical Research*, 94, 5716-5728.
- Liu, K. H., S. Gao, P. G. Silver and Y. Zhang**, 2003. Mantle layering across central South América. *Journal of Geophysical Research*, 108(B11), 2510, doi:10.1029/2002JB002208.
- Pulliam, R. J., D. W. Vasco, & L. R. Johnson**, 1993. Tomographic Inversions for Mantle P Wave Velocity Structure Based on the Minimization of l2 and l1 Norms of International Seismological Centre Travel Time Residuals. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 699-734.
- Rocha, M. P.**, 2003. Ampliação da Tomografia Sísmica do Manto Superior no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil com ondas P. 71 p. Dissertação (mestrado) - IAG-USP, São Paulo.
- Rocha, M. P., M. Assumpção, & M. Schimmel**, 2004. Tomografia sísmica com ondas P no Brasil: Resultados Recentes. (CD-ROM). I Simp. Reg. da SBGf, São Paulo.
- Rocha, M. & M. Assumpção**, 2005. Upper mantle travel time seismic tomography with P-waves in Brazil. General Assembly of IASPEI (Abstract), Santiago, Chile.
- Schimmel, M., Assumpção, M. & VanDecar, J. C.**, 2003. Seismic velocity anomalies beneath SE Brazil from P and S wave travel time inversions: *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, doi: 10.1029/2001JB000187.
- VanDecar, J. C.**, 1991. Upper-mantle structure of Cascadia subduction zone from non-linear teleseismic travel time inversion, PhD thesis, University of Washington, Seattle.
- VanDecar, J.C., James, D.E., & Assumpção, M.**, 1995. Seismic evidence for a fossil plume beneath South America and implications for plate driving forces. *Nature*, 378, 25-31.

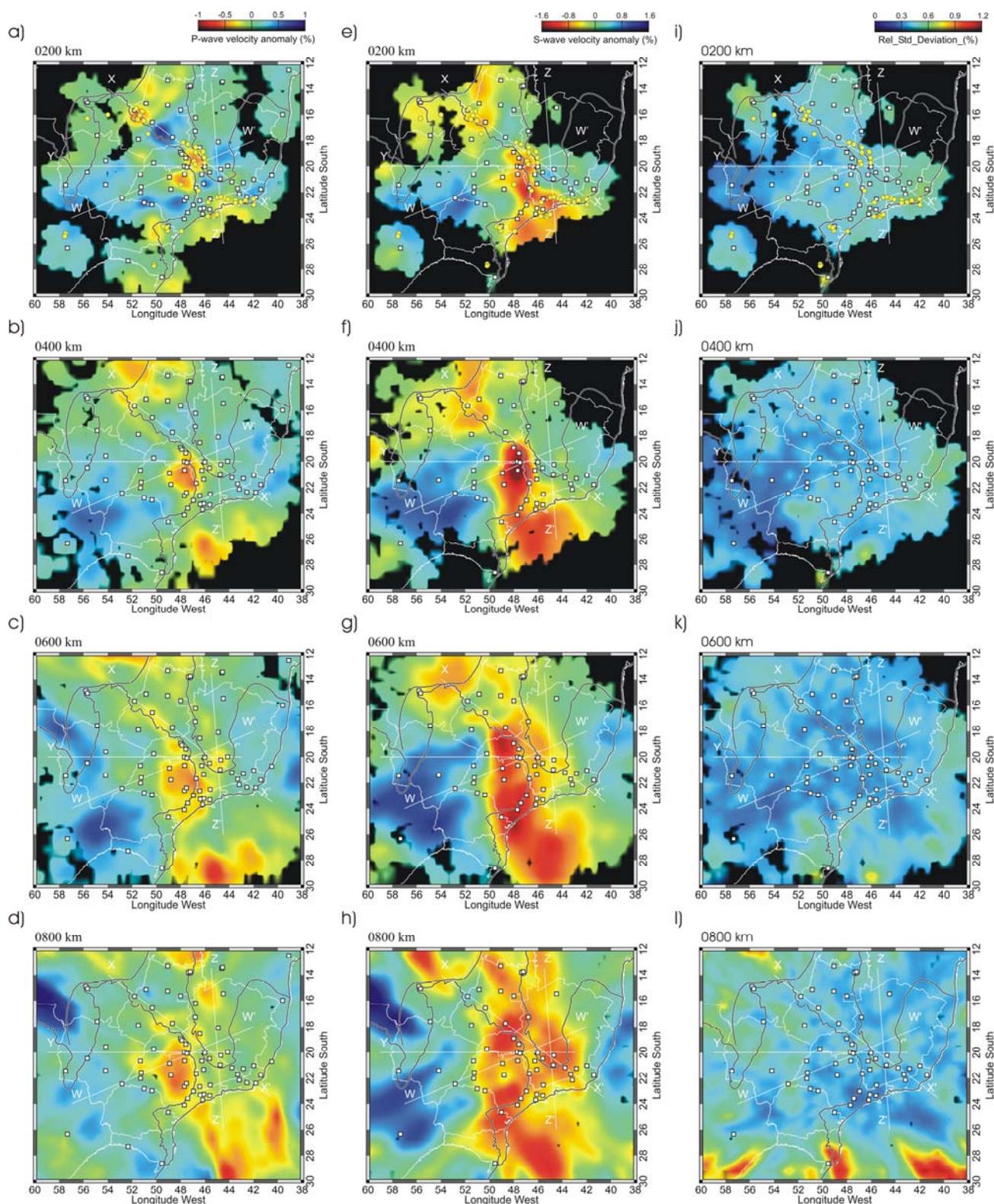


Figura 3 - Comparação entre os resultados da tomografia para onda P (Figuras 3a, 3b, 3c, 3d), tomografia para ondas S (Figuras 3e, 3f, 3g e 3h) e do método Jackknife para onda S (Figuras 3i, 3j, 3k e 3l). Nestas figuras estão indicados os perfis verticais apresentados na Figura 4. Os quadrados brancos indicam as estações utilizadas e os círculos amarelos (Figuras 3a, 3e e 3i) representam intrusões alcalinas do Cretáceo Superior. As regiões em negro indicam ausência de dados.

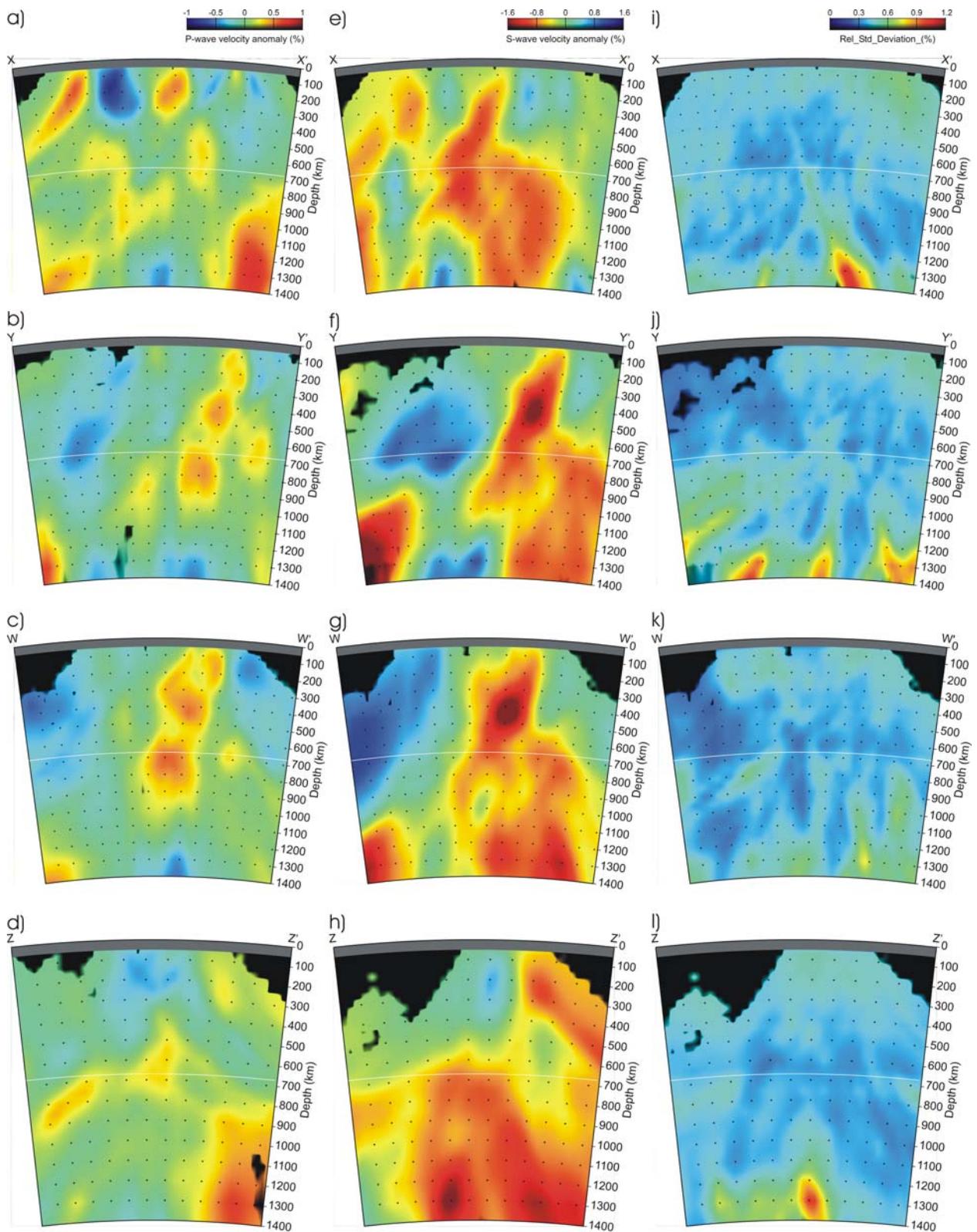


Figura 4 - Comparação entre os resultados (verticais) da tomografia para onda P (Figuras 3a, 3b, 3c e 3d), tomografia para ondas S (Figuras 3e, 3f, 3g e 3h) e do método Jackknife para onda S (Figuras 3i, 3j, 3k e 3l). As regiões em negro indicam ausência de dados.