

# Tomografia sísmica do manto superior no SE do Brasil utilizando ondas P

Marcelo Peres Rocha e Marcelo Assumpção, IAG/USP, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

We used inversion of P and PKP travel times for seismic tomography of the upper mantle beneath southeast and central-west Brazil. Our principal objectives are to improve the resolution obtained by the previous studies (VanDecar *et al.*, 1995; Escalante, 2002; Schimmel *et al.*, 2003), carried out between 1992 and 2001, and to map areas that were not covered by previous of stations. The new data set includes recent records of 2002. Preliminary results have confirmed the structures observed in the previous works and also have revealed new anomalous regions, particularly in the south of the Mato Grosso state. The new data set allowed the expansion of the study area and the imaging of new anomalies, which are correlated with the model proposed by Thompson *et al.*, (1998). Analysis of the database are also included to show consistency.

## Introdução

Os estudos dos eventos tectônicos passados são importantes para a compreensão atual da Terra. Estruturas como a crosta e o manto superior podem conter feições relacionadas a antigos processos geodinâmicos. A tomografia sísmica fornece informações destas estruturas, pois possibilita o seu mapeamento utilizando a inversão dos tempos de percurso das ondas geradas por terremotos que ocorrem em todo o mundo (Figura 1), obtendo informações sobre pequenas variações de velocidade em relação a um modelo de referência da Terra, no caso o IASP91 (Kenneth & Engdahl, 1991). Foram utilizadas as fases de onda P e PKPdf (PKIKP) de sismos com magnitude mínima de 4,6 mb e 5,4 mb respectivamente. Foram selecionados intervalos distintos de distância para cada fase (30° a 95° para P e 158° a 180° para PKPdf) buscando eliminar problemas causados pelas zonas de triplicação.

A área de estudo compreende principalmente a região sudeste e centro-oeste do Brasil, incluindo algumas estruturas geológicas importantes, como o Cráton do São Francisco e a Bacia do Paraná (Figura 2). Nesta área estão localizadas as estações utilizadas, a maioria de banda larga e pertencentes ao projeto "Brazilian Lithospheric Seismic Project" (BLSP). Foram utilizadas também estações de período curto da Rede Sismográfica da USP (RESUSP), estações da Universidade de Brasília

(UnB) e da Rede Mundial, "Global Telemetered Seismograph Network" (GTSN).

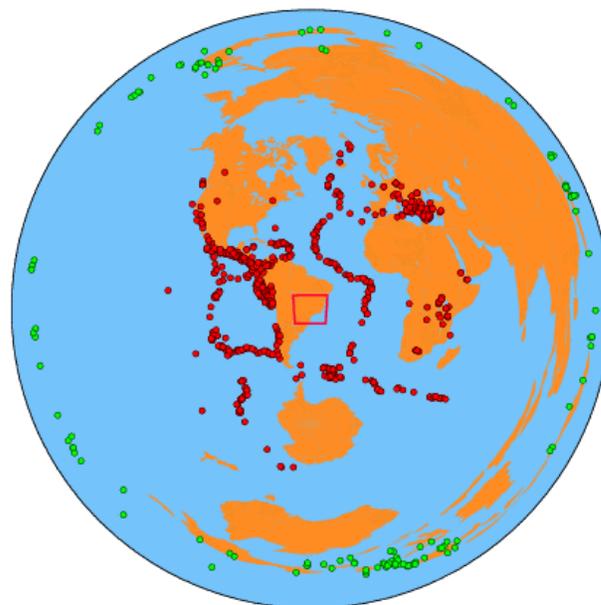


Figura 1 – Distribuição dos eventos de 2001 e 2002 com ondas P (círculos vermelhos) e PKPdf (círculos verdes) em relação à área de estudo representada pelo quadrilátero vermelho ao centro.

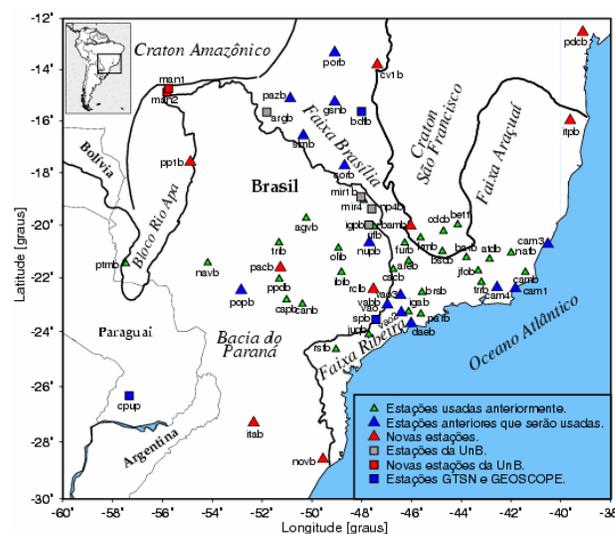


Figura 2 – Mapa da área de estudo contendo as estações utilizadas, e algumas das principais estruturas geológicas da região.

## Resíduos Relativos

Os dados utilizados neste trabalho são resíduos relativos do tempo de percurso das ondas P telessísmicas, obtidos da diferença entre o tempo observado e o tempo teórico. Muitas técnicas de inversão tomográfica utilizam resíduos de tempo de percurso para imagear estruturas no interior da Terra. Basicamente, os resíduos de tempo são as variações no tempo de percurso das ondas em relação a um modelo médio da Terra, e são utilizados para restringir o modelo tomográfico (modelo de anomalias), ao segmento terminal dos raios sísmicos. Este é o princípio do método tomográfico ACH com telessismos (Evans & Achauer, 1993).

Os resíduos **absolutos** de tempo de percurso podem ser definidos como a diferença entre o tempo observado e o tempo calculado (teórico). O tempo observado é obtido pela marcação visual (*picking*) das chegadas das fases, e o tempo teórico é obtido de tabelas para modelos 1D da Terra (IASP91). Assim, de uma fonte  $j$  qualquer até um receptor  $i = 1, \dots, I_j$ , o resíduo absoluto de tempo será dado da seguinte forma:

$$r_{ij} = to_{ij} - tc_{ij} \quad (1)$$

onde  $to_{ij}$  é o tempo de percurso observado e  $tc_{ij}$  é o tempo de percurso calculado para o modelo médio da Terra. De acordo com a Equação 1, atrasos no tempo observado produzirão resíduos absolutos positivos, caso contrário, estes serão negativos.

Os resíduos absolutos possuem grandes contribuições de erro relacionados à fonte e ao percurso das ondas telessísmicas (caminho da fonte ao receptor) chamadas de erros de fonte e percurso, respectivamente. Como a distância entre a fonte e o receptor é muito grande, estas contribuições podem ser consideradas constantes no segmento final dos raios sísmicos e podem ser removidas pela formulação dos resíduos relativos (Equação 2), que são a diferença entre os resíduos absolutos e a sua média para um mesmo evento.

$$rr_{ij} = r_{ij} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} r_{ij} \quad (2)$$

Na obtenção dos resíduos relativos, a marcação visual dos tempos de chegada ( $to_{ij}$ ) é uma das maiores fontes de inconsistência. Nem sempre é possível observar claramente as primeiras quebras devido à presença de ruído, o que dificulta a marcação das fases.

Uma forma de diminuir as inconsistências durante a marcação das fases é a utilização de métodos numéricos de correlação cruzada para fazer os *picks*. O método utilizado neste trabalho é o MCCC (Multi-Channel Cross-Correlation) de VanDecar & Crosson, (1990).

Basicamente, o método MCCC utiliza a coerência da forma de onda observada em pelo menos quatro sismogramas de estações diferentes relacionados a um mesmo evento, para determinar o tempo observado e conseqüentemente os resíduos relativos. A principal vantagem deste método é a não dependência da

identificação das primeiras quebras, muitas vezes influenciadas pela presença de ruído no sinal.

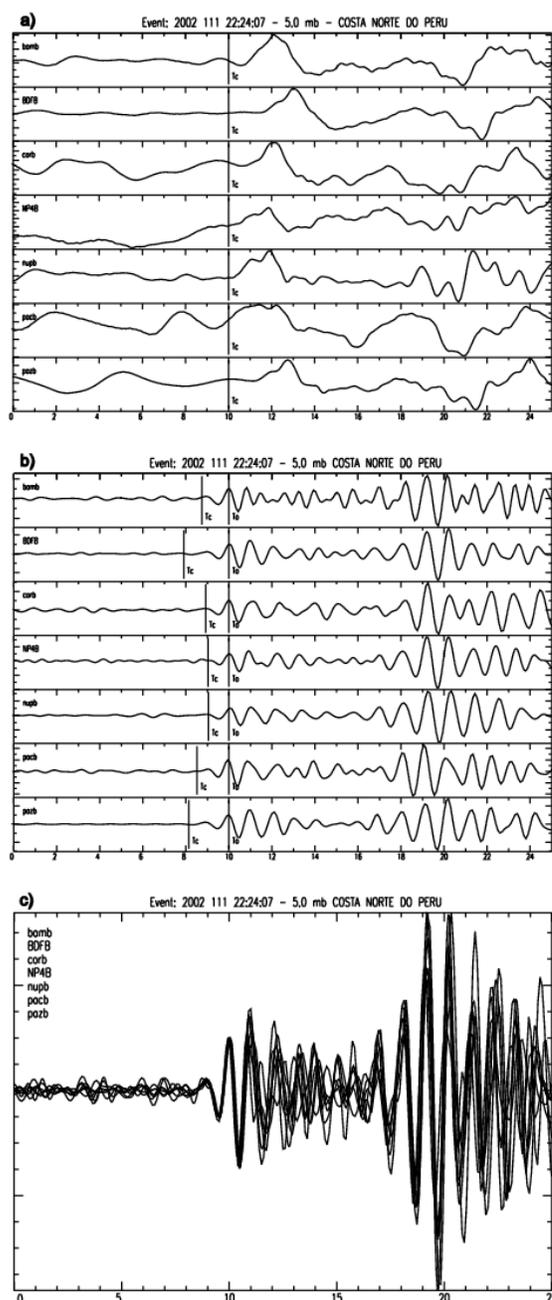


Figura 3 – Exemplo do procedimento de *pickagem*, utilizando o método MCCC (VanDecar & Crosson, 1990). A Figura 3a mostra o alinhamento dos tempos calculados ( $tc$ ) a partir do modelo IASP91 para os sismogramas não filtrados. A Figura 3b mostra os *picks* resultantes da correlação cruzada ( $to$ ) após filtragem. A Figura 3c mostra o empilhamento dos traços para a verificação da qualidade da *pickagem*. Sismo ocorrido no norte do Peru em 21/04/2002 (111) com magnitude 5.0 mb.

Na Figura 3 estão mostrados, os passos seguidos para obtenção dos resíduos relativos. Na Figura 3a os traços estão alinhados pelo tempo calculado ( $t_c$ ). Na Figura 3b o alinhamento é feito em relação ao tempo observado ( $t_o$ ), marcado utilizando um filtro passa-banda (frequências de corte 0.8 e 1,6 Hz) para realçar a chegada da fase. Na Figura 3c é mostrado o empilhamento dos traços a fim de observar a qualidade do processo de *pickagem*.

Os tempos determinados com a correlação cruzada foram usados para determinar a estrutura de velocidade do nosso modelo. Nosso modelo (Figura 4) é uma grade com 36 nós em profundidade, 64 em longitude e 56 em latitude, indo até uma profundidade máxima de 1600 km. Na parte central do modelo o espaçamento entre os nós é de 33,3 km em profundidade e aproximadamente 37 km em latitude e longitude.

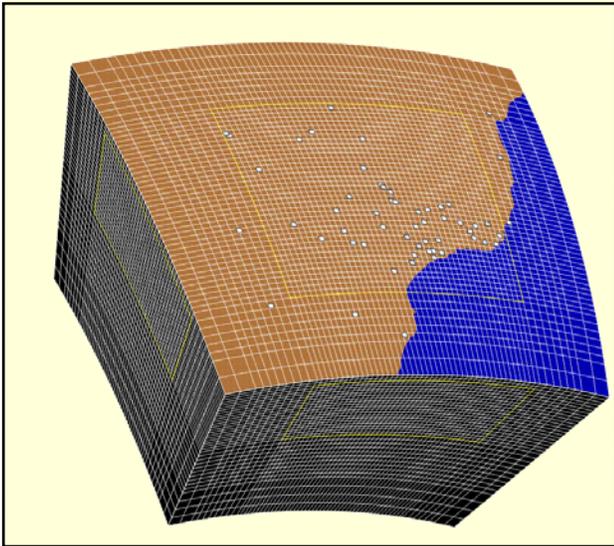


Figura 4 – Parametrização do modelo utilizado na inversão dos dados. Os quadrados brancos representam as estações utilizadas. O volume marcado pelas linhas amarelas é a região com melhor resolução do grid.

### Consistência dos dados

Para duas estações próximas, espera-se que os tempos de percurso das ondas (representados pelos resíduos relativos) vindas de uma mesma direção sejam semelhantes, principalmente se estas estações estiverem operando simultaneamente.

A Figura 6 mostra um exemplo de comparação da média dos resíduos relativos entre duas estações, **IGPB** (UnB) e **rifb** (BLSP) localizadas 23 km uma da outra.

Podemos observar uma boa correlação entre os resíduos médios das duas estações, tanto para fases P como para PKPdf, o que indica que o banco de dados tem informações estruturais de larga escala. Erros continuam existindo, mas na média o teste demonstra uma boa consistência entre os dados destas estações.

Observa-se também que o erro é maior para as fases P do que para as fases PKPdf. Isto é explicado pelo maior

intervalo de distância angular em um mesmo azimute para as fases P. Estas fases possuem maiores ângulos de incidência e uma maior variação deste ângulo para sísmos vindos de uma mesma direção (Figura 5). Já as fases PKPdf chegam praticamente na vertical, com uma menor variação da incidência. A distribuição residual mostrada nas Figuras 6 é baseada na média de todos os resíduos para raios vindos de uma mesma direção (azimute), e sendo assim, a maior variação do ângulo de incidência para as fases P causa o maior desvio padrão observado.

Finalmente, observa-se um erro muito maior para as fases P da estação IGPB do que para rifb. A estação IGPB possui diferenças no procedimento de instalação em relação à estação rifb, pois seus sensores não foram enterrados, enquanto que os sensores da estação rifb foram, deixando-a menos sensível a ruídos ambientais. Esta diferença pode explicar a maior variação da média dos resíduos relativos da fase P para a estação IGPB.

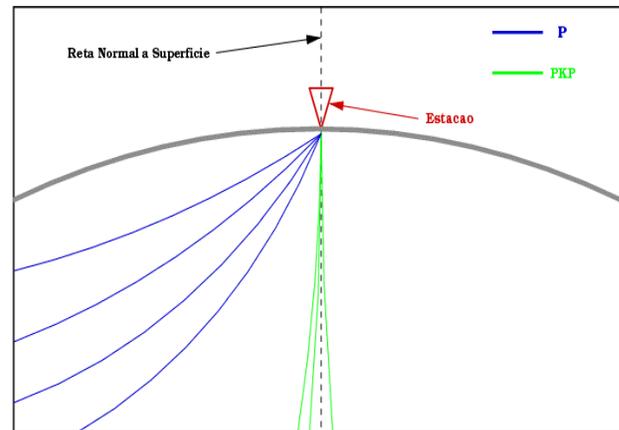


Figura 5 – Fases P e PKP chegando a uma estação sísmica qualquer, dando uma idéia da diferença entre os ângulos de incidência em relação à reta normal para estas duas fases.

A Figura 7 mostra a comparação entre os resíduos relativos para uma mesma estação (BDFB) em períodos diferentes. Os gráficos mostram a distribuição da média dos resíduos relativos em relação ao azimute para o período de 1992-1999 (BDFB\_9) com dados processados por Schimmel *et al.*, (2003) e para o período de 2000-2002, processados por Escalante (2002) e também pelos dados que estão sendo processados neste trabalho.

Na Figura 7 observa-se o mesmo comportamento mostrado na Figura 6, porém para as fases PKPdf o erro médio entre os resíduos é muito maior do que o esperado. Isto pode ser explicado por dois fatores, ou pelo maior volume de dados no período de 1992-1999 em relação ao período de 2000-2002 (sete anos de registro contra apenas três), ou por problemas na identificação (*pickagem*) das chegadas PKP (chegadas mascaradas por ruídos) no período de 2000-2002.

### Resultados e conclusões

Nossos resultados são reconstruções tomográficas geradas pela inversão da base de dados (processados

até agosto de 2002), mostradas na Figura 8. As Figuras 8a, 8b, 8c e 8d mostram as seções horizontais para as profundidades de 200, 300, 500 e 700 km respectivamente. A Figura 5e mostra uma seção vertical (A-A') até uma profundidade de 1400 km. Os valores dos parâmetros de inversão "flatness" e "smoothness" foram baseados nos valores utilizados por Schimmel *et al.*, (2003) e Escalante, (2002).

Nestas reconstruções (principalmente nas de 200 km) observa-se que a anomalia de baixa velocidade sob a província ígnea de Iporá, descrita por Escalante, (2002), possui uma continuação para noroeste (na região sul do estado de Mato Grosso), que se correlaciona muito bem com a província ígnea de Poxoréu e também com o modelo geoquímico de Thompson *et al.*, (1998). Desta forma, estes resultados podem contribuir com a hipótese de que nesta região o magmatismo ocorrido no Cretáceo Superior foi causado pela frente da Pluma de Trindade, e que sob a região de Goiás estaria a estrutura relacionada ao efeito da Pluma em áreas de litosfera mais fina.

### Agradecimentos

Agradecemos ao amigo Martin Schimmel por toda a ajuda e orientação, ao colega Shimeles Fisseha pela ajuda na redação e revisão deste trabalho, bem como ao técnico e amigo José Roberto Barbosa pelos esclarecimentos sobre as diversas estações e tipos de dados aqui utilizados.

### Referências

- Escalante, C.**, 2002, Tomografia sísmica do manto superior sob o sudeste e centro oeste do Brasil: Dissertação (mestrado) IAG/USP, São Pulo, SP, 74 p.
- Evans, J. R., and Achauer, U.**, 1993, Teleseismic velocity tomography using ACH method: theory and applications to continental-scale studies, in H. M. Iyer and K. Hirahara (Editors) *Seismic Tomography: Theory and Practice*: Chapman and Hall, London, pp. 319-360.
- Kenneth, B. L.N., and Engdahl, E. R.**, 1991, Travel times for global earthquakes location and phase identification: *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.
- Schimmel, M., Assumpção, M. and 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.
- Thompson, R. N., Gibson, S. A., Mitchell, J. G., Dickin, A. P., Leonards, O. H., Brod, J. A., and Greenwood, J. C.**, 1998, Migrating Cretaceous-Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume?: *Journal of Petrology*, 39, 1493-1526.
- VanDecar, J. C., and Crosson, R. S.**, 1990, Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 150-169.
- VanDecar, J. C., James, D. E., and Assumpção, M.**, 1995, Seismic evidence for a fossil plume beneath South America and implications for plate driving forces: *Nature*, 378, 25-31.

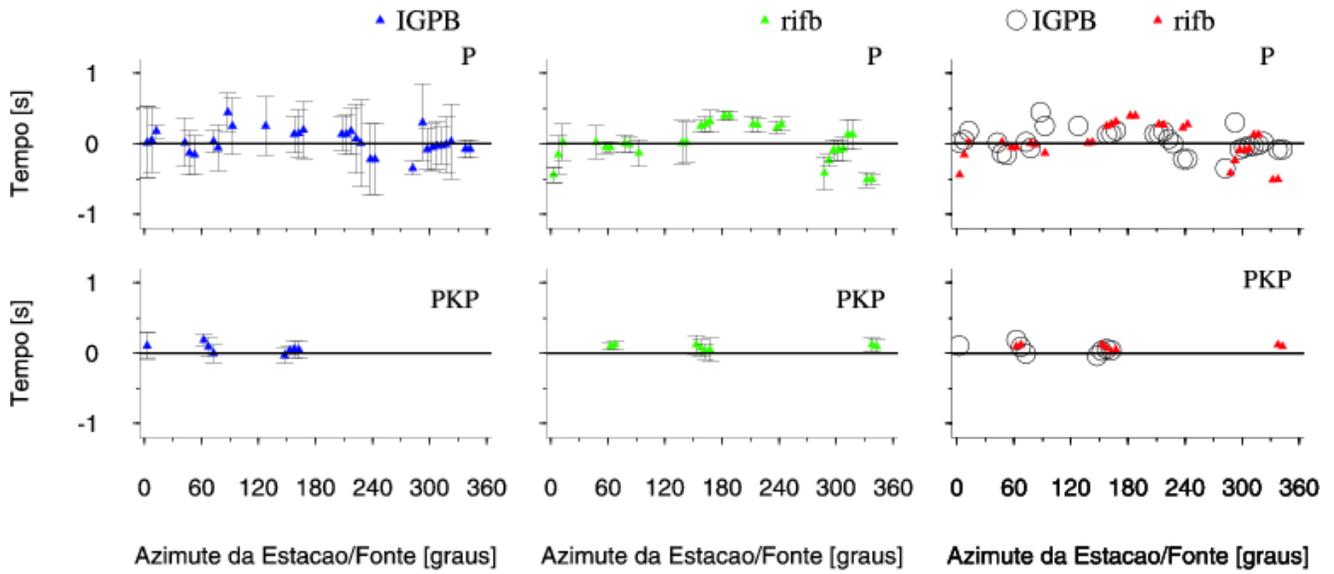


Figura 6 – Comparação dos resíduos relativos entre as estações IGPB (Estação da UnB; Igarapava, MG; Lat. -20,000 e Long. -47,7100) e rifb (Estação BLSP; Rifaina, SP; Lat. -20,0737 e Long. -47,5019) .

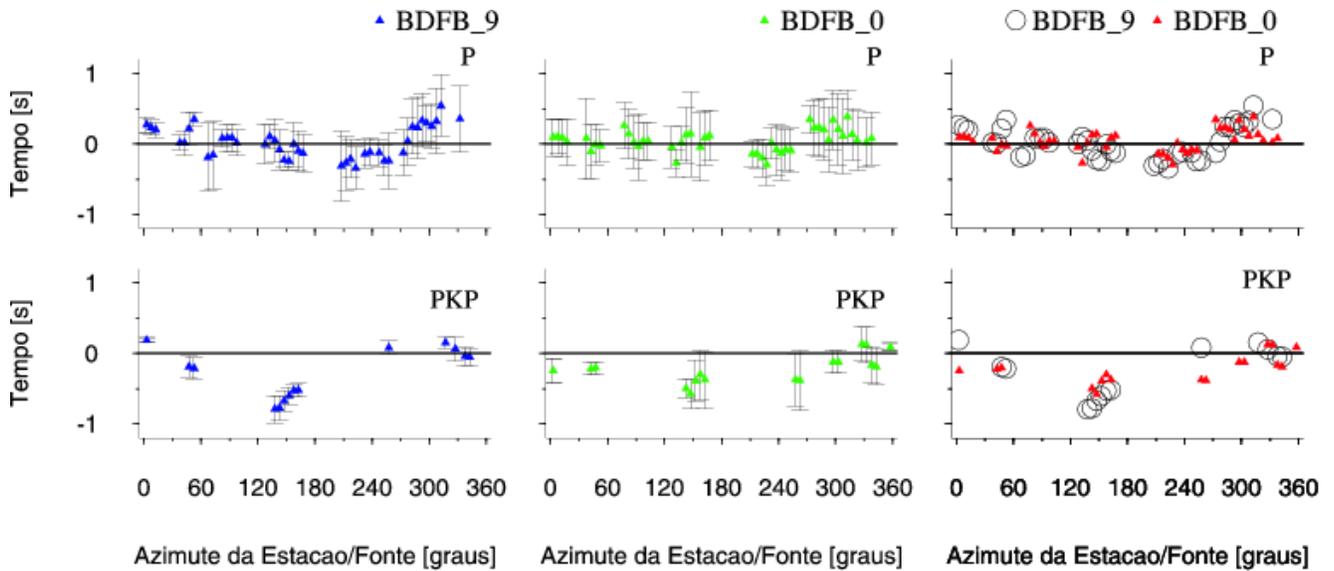


Figura 7 – Comparação dos resíduos relativos para dois períodos de operação da estação BDFB (Estação GTSN; Brasília, DF; Lat. -15,6418 e Long. -48,0148). BDFB\_9 mostra dados no período 1992-1999 e BDFB\_0 mostra dados no período de 2000-2002.

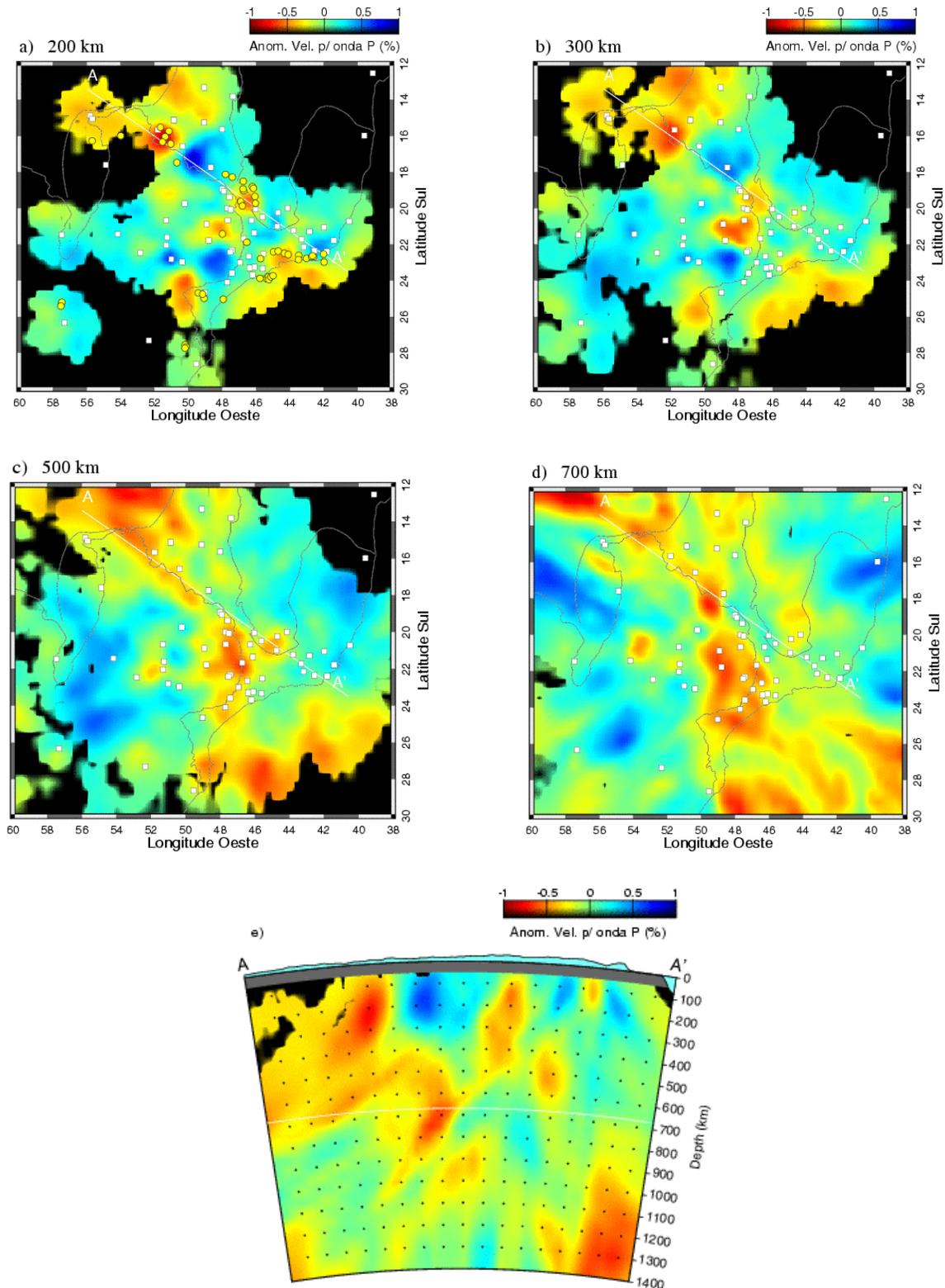


Figura 8 – Resultado das inversões utilizando a base de dados parcial (base de Schimmel *et al.*, (2003); Escalante, (2002) e os dados processados até o mês de agosto de 2002 feitos neste trabalho). Os quadrados brancos representam as estações utilizadas. a) Seção horizontal a 200 km de profundidade, mostrando a localização de alcalinas (círculos amarelos) com datações entre 90 e 55 Ma. b), c) e d) seções horizontais para 300, 500 e 700 km respectivamente. e) seção vertical A-A'.