

## Determinação de variações na espessura crustal da província Borborema por meio da função do receptor

Diogo Farrapo Albuquerque<sup>1</sup>, George Sand França<sup>1</sup>, Cesar Garcia Pavão<sup>1</sup>, Isabella Lorrainy Altoé<sup>1</sup>, Marcelo Rocha<sup>2</sup> e Carlos da Silva Vilar<sup>3</sup>.

(1) Observatório Sismológico, Universidade de Brasília; (2) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília; (3) Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<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

In the purpose of giving further information about the seismic velocity structure and Moho depth variations in the Borborema tectonic province, it was applied the receiver function method deconvolved in both frequency and time domains to seismological data recorded by three stations: AGBL (Águas Belas-PE), NVLB (Novo Lino-AL) and PTSB (Patos-PB).

### Introdução

O interior da Terra não é homogêneo, apresentando diversas discontinuidades que podem ser classificadas quimicamente ou fisicamente. A figura 1 mostra a principal classificação, levando em conta a variação de parâmetros físicos, como a velocidade das ondas sísmicas.

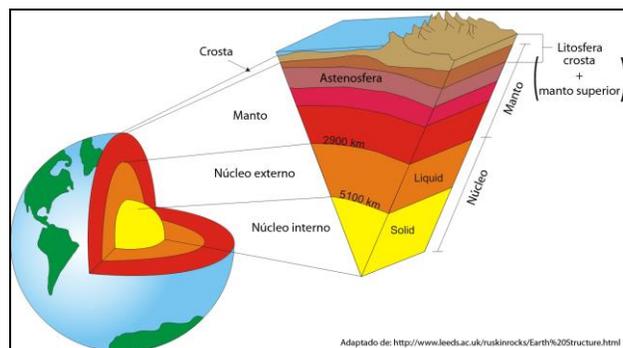


Figura 1: estrutura interna da Terra.

Neste trabalho, a discontinuidade de interesse é a Moho (interface crosta-manto) que possui localização variável, encontrando-se entre 7 e 10 km de profundidade (crosta oceânica) e entre 25 e 80 km (crosta continental).

Para a determinação da profundidade da Moho, e assim determinar a espessura crustal pontual, foi utilizada a função do receptor (FR) com deconvolução nos domínios da frequência e do tempo aplicada aos dados de três estações sismográficas instaladas na província Borborema (figura 2).

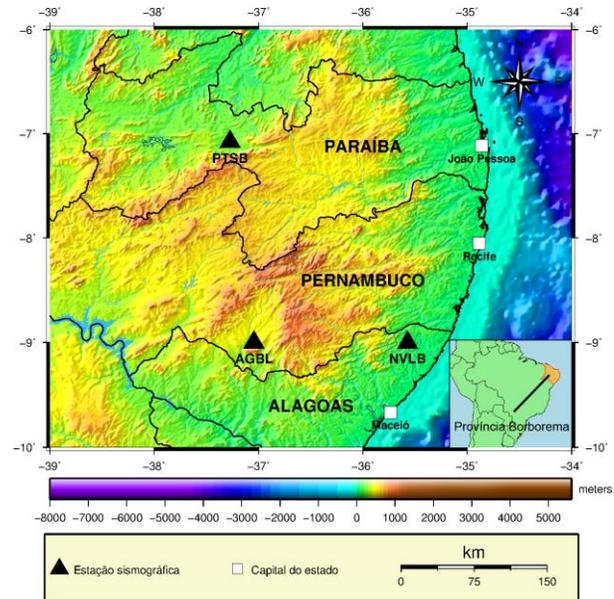


Figura 2: mapa com a localização das estações e da província Borborema.

A finalidade de utilizar duas metodologias de FR diferentes é testá-las e verificar se ambas convergem para valores semelhantes, assim como identificar qual técnica é mais apropriada para cada caso.

### Função do receptor

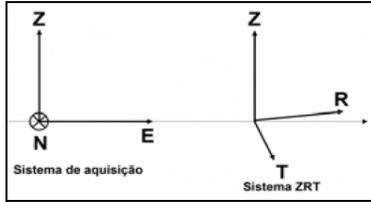
A função do receptor é um método simples e direto de extrair informações a respeito da crosta e do manto superior por meio de ondas sísmicas de terremotos distantes registradas em estações triaxiais (Langston & Ammon, 1991).

O princípio físico do método baseia-se no fato de que a onda sísmica primária (P), ao mudar de um meio de maior para um de menor velocidade, tem parte de sua energia convertida em onda S (fase Ps), gerando também múltiplas reflexões (fases Ppps e Ppps+Ppps), como indicado na figura 4.

Para que haja um registro preponderante das fases horizontais de interesse, é necessário rotacionar o sismograma na direção do evento, mudando do sistema de coordenadas convencional de aquisição da estação (Vertical, Norte-Sul e Leste-Oeste) para o sistema ZRT (Vertical, Radial e Transversal).

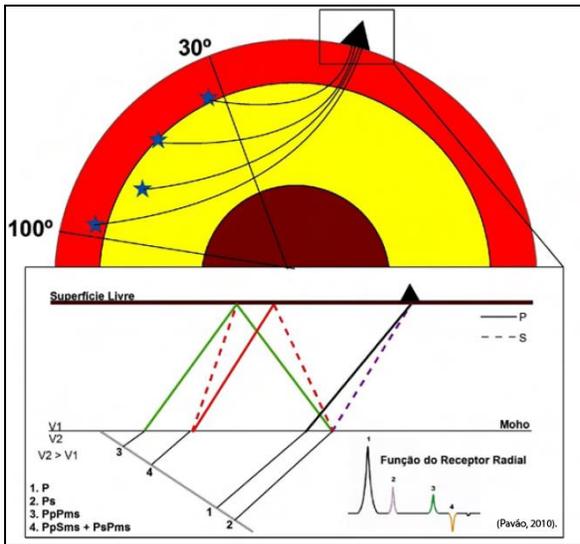
Com isso, teremos um registro da onda P na direção vertical e da Ps na direção radial do sistema ZRT. Em

tese, não deve haver registro na componente transversal, haja vista que esta é perpendicular à radial, e, portanto, não há resultante em outras direções. A figura 3 ilustra essa mudança no sistema de coordenadas.



**Figura 3:** mudança no sistema de coordenadas de ZNE para ZRT.

Para que o evento tenha utilidade na obtenção da FR, a onda P deve atingir a base da estação com um ângulo de incidência maior do que 40°. Por isso, foram selecionados telessismos ocorridos em distâncias a partir de 30°. Eventos com distâncias acima de 100° não são registrados devido ao efeito de zona de sombra. A figura 4 mostra o diagrama de raios da função do receptor, onde o triângulo escuro simboliza a estação sismográfica.



**Figura 4:** princípio físico da função do receptor (Pavão, 2010, com adaptações).

A função do receptor é obtida pela deconvolução da componente radial pela vertical, que isola a resposta do receptor e o resultado é a assinatura das fases convertidas e múltiplas reflexões que indicam a estrutura da crosta subjacente à estação sismográfica (Langston, 1979; Owens, 1984; Ammon, 1991).

Com os valores de tempo de chegada das ondas P, Ps e múltiplas (PpPms) é possível calcular a espessura crustal (H) e a razão Vp/Vs (Zandt et al., 1995) por meio das equações (1) e (2).

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\left(1 - p^2 V_p^2 \left[2 \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_p P_{ms}}\right) + 1\right]^2 + p^2 V_p^2\right)} \quad (1)$$

$$H = \frac{\Delta p_s}{\sqrt{V_s^{-2} - p^2} - \sqrt{V_p^{-2} - p^2}} \quad (2)$$

Onde:

- ΔPs é a diferença de tempo entre as fases P e Ps;
- ΔPpPms é a diferença de tempo de chegada das fase múltiplas;
- p é o parâmetro de raio;
- Vp é a velocidade da onda P;
- Vs é a velocidade da onda S.

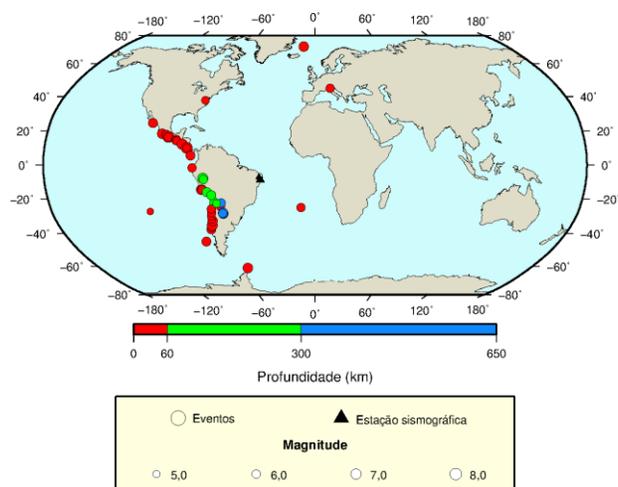
**Processamento dos dados**

O processamento ocorreu em diversas etapas, começando com a preparação dos *shell scripts*, passando pela conversão e organização do banco de dados sismológicos até a obtenção dos traços da função do receptor, dos valores de espessura crustal e razão Vp/Vs.

Em síntese, o procedimento é descrito a seguir:

- Conversão dos dados do formato *miniseed* para SAC (*Seismic Analysis Code*; Goldstein & Snoke, 2005);
- Criação das listas de eventos com distâncias epicentrais entre 30° e 100° e magnitudes a partir de 4,5, fornecidas pelo *United States Geological Survey (USGS)*;
- Separação das formas de onda dos eventos a partir das informações contidas nas listas;
- Seleção preliminar dos eventos com a marcação de onda P usando o programa SAC;
- Deconvolução no domínio da frequência usando o programa *pwaveqn* (Ammon, 1991);
- Marcação das fases Ps e seleção dos melhores traços da função do receptor no programa SAC;
- Cálculo de profundidade da Moho usando o programa *HK-Stacking* (Zhu & Kanamori, 2000);
- Deconvolução no domínio do tempo usando o programa *iterdecon* (Ligorria & Ammon, 1999);
- Cálculo da profundidade da Moho usando o programa *PWSS* (Bianchi, 2008).

A figura 5 mostra a localização geográfica das estações sismográficas utilizadas neste trabalho e dos telessismos que geraram os melhores traços da função do receptor, assim como suas magnitudes e profundidades.



**Figura 5:** eventos utilizados na execução da função do receptor nos domínios do tempo e da frequência.

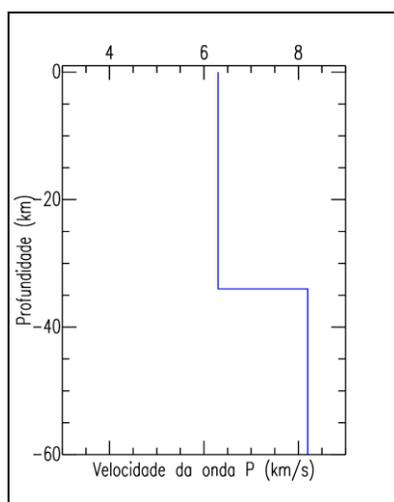
O programa *HK-Stacking* (Zhu & Kanamori, 2000) usa a correção *moveout* relativo das fases secundárias geradas em uma descontinuidade logo abaixo de uma estação para inferir a profundidade e a razão  $V_p/V_s$  da camada subjacente à interface (França, 2003).

O programa *PWSS* (*Phase Weighted Slant Stacking*) procura por direções lineares de empilhamento das fases correlacionáveis em seções de função do receptor (Bianchi, 2008). O principal propósito desta técnica de empilhamento utilizada no *PWSS* é minimizar o ruído aleatório ao realçar as fases de interesse.

### Modelo de velocidade

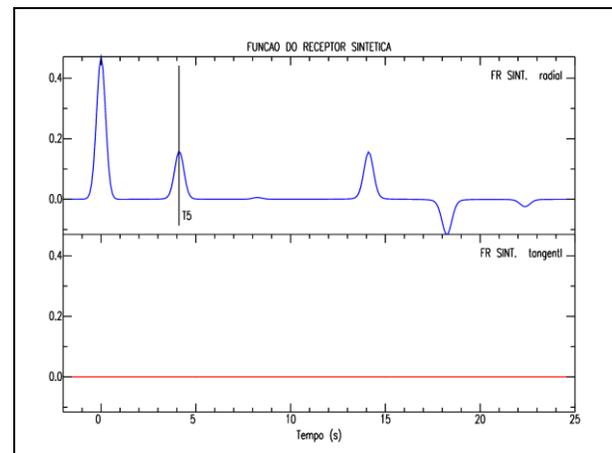
Para balizar os resultados da FR, foi criado um modelo de velocidade preliminar a partir de valores encontrados durante o levantamento bibliográfico.

A figura 6 mostra o modelo de velocidade para a onda P, com velocidade média de 8,2 km/s no manto e de 6,3 km/s na crosta. Para esta, foi considerada uma espessura média em torno de 34 km.



**Figura 6:** modelo de velocidade para a onda P.

A figura 7 mostra uma FR sintética gerada no domínio da frequência tendo por base o modelo citado. A componente radial está representada pelo traço azul e a componente transversal pelo vermelho.



**Figura 7:** função do receptor sintética obtida a partir do modelo de velocidade.

### Resultados

As estimativas de espessura crustal ( $H$ ) e razão  $V_p/V_s$  para as estações envolvidas neste projeto estão listadas nas tabelas 1 e 2.

A tabela 1 mostra os valores resultantes do *HK-Stacking* a partir dos traços de FRs no domínio da frequência. Como parâmetros iniciais, foram usados a velocidade média da onda P na crosta (6,3 km/s) e os pesos dados às fases P, Ps e múltiplas, que foram 0,7, 0,2 e 0,1, respectivamente.

**Tabela 1:** valores de espessura crustal e razão  $V_p/V_s$  calculados pelo programa *HK-Stacking*.

Estação	$V_p$ (km/s)	$H$ (km)	$V_p/V_s$
AGBL	6,3	$33,7 \pm 1,7$	$1,77 \pm 0,04$
NVLB	6,3	$44,3 \pm 2,5^*$	$1,61 \pm 0,10^*$
PTSB	6,3	$34,4 \pm 1,1$	$1,70 \pm 0,03$

O resultado do cálculo de profundidade para a estação NVLB não foi satisfatório, uma vez que foi encontrado um valor muito alto de espessura crustal (44,3 km) e uma baixa razão  $V_p/V_s$  (1,61), não condizendo, portanto, com a média dos resultados das outras duas estações e com aqueles encontrados no referencial teórico.

É importante salientar que a causa principal dessa discrepância de valores está relacionada à baixa qualidade dos dados da estação AGBL, que apresentaram, na maior parte do tempo, ruído de alta amplitude e alta frequência, o que acabou por sobrepor os registros telessísmicos, impossibilitando assim, a aplicação do método da FR.

A tabela 2 mostra os valores calculados pelo programa *PWSS* para traços de FR obtidos com a deconvolução no domínio do tempo.

**Tabela 2:** valores de espessura crustal e razão Vp/Vs calculados pelo programa PWSS.

Estação	Vp (km/s)	H (km)	Vp/Vs
AGBL	6,3	32,2 ± 2,5	1,82 ± 0,11
NVLB	-	-	-
PTSB	6,3	34,0 ± 0,8	1,73 ± 0,03

Também não foi possível obter traços de FR no domínio do tempo com os registros de NVLB e, por isso, o PWSS não teve aplicação.

Para as estações AGBL e PTSB, as estimativas em ambos os métodos de deconvolução foram boas quando comparadas com os trabalhos de sismica de refração profunda (Soares et al., 2009) e função do receptor no domínio da frequência (Barbosa, 2008; Pavão, 2010) na região da província Borborema.

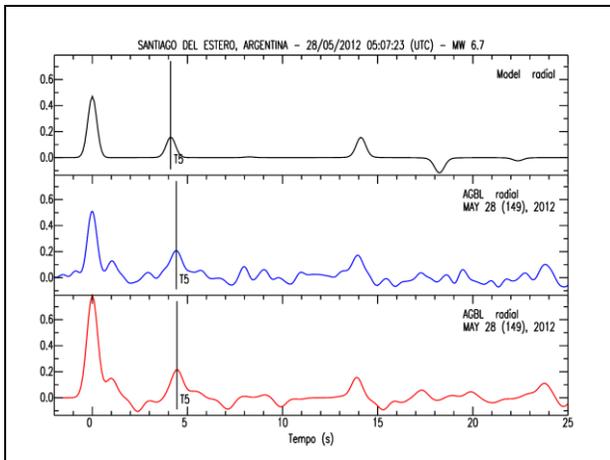
Soares et al. (2009) obteve valores de espessura crustal variando entre 28 e 35 km ao longo de uma linha com 880 km de extensão ligando as cidades de Granja (CE) e Serinhaém (PE), cruzando a província Borborema de noroeste a sudeste.

Barbosa (2008) e Pavão (2010) utilizaram a FR com deconvolução no domínio da frequência para dados de estações sismográficas distribuídas aleatoriamente por esta província e conseguiram valores de H variando entre 29 e 36 km.

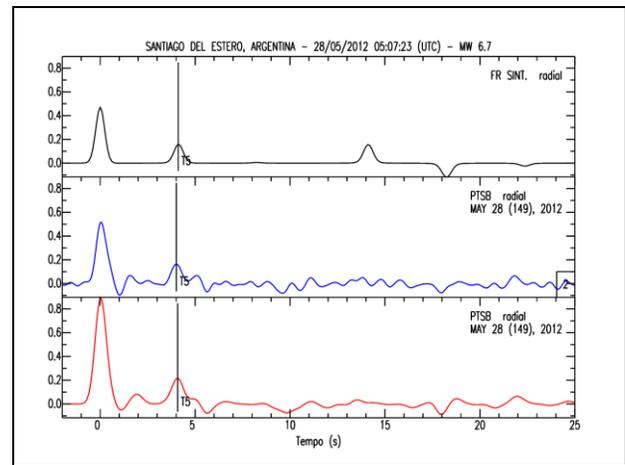
As razões Vp/Vs obtidas aqui também condizem com o valor médio para a crosta continental, que gira em torno de 1,78 (Zandt & Ammon, 1995).

As figuras 8 e 9 mostram os melhores traços da função do receptor nos domínios da frequência (em azul) e do tempo (em vermelho) em relação ao modelo de velocidade (em preto).

A FR foi aplicada ao registro de um terremoto de magnitude 6,7 ocorrido no dia 28/05/2012, em Santiago Del Estero, Argentina e que foi bem registrado pelas estações AGBL e PTSB.



**Figura 8:** comparação entre traços de FR com deconvolução nos domínios da frequência (linha azul) e do tempo (linha vermelha) com relação ao modelo sintético (linha preta) para a estação AGBL.



**Figura 9:** comparação entre traços de FR com deconvolução nos domínios da frequência (linha azul) e do tempo (linha vermelha) com relação ao modelo sintético (linha preta) para a estação PTSB.

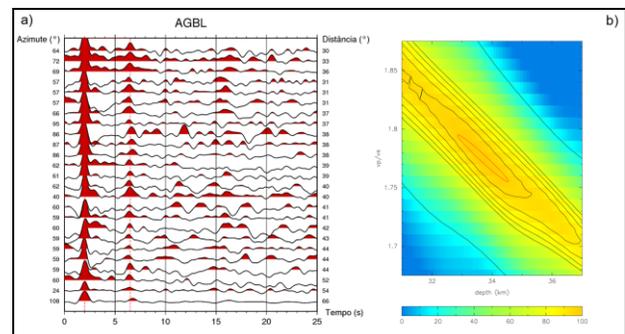
Como se pode notar nas duas figuras anteriores, o modelo de velocidade está em concordância com os resultados de ambos os métodos de deconvolução.

Para a estação AGBL, foi possível identificar claramente o tempo de chegada das fases P, Ps (~4,5 s) e múltipla positiva (~14,0 s). A múltipla negativa não ficou clara para estes traços.

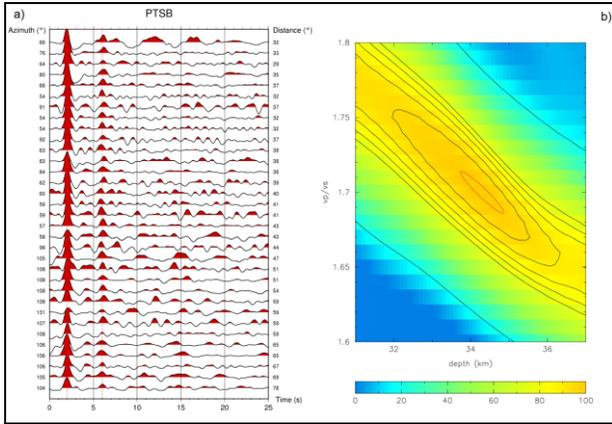
Para a estação PTSB, também foi possível identificar com clareza o tempo de chegada das fases P, Ps (~4,1 s) e múltipla negativa (~18,0 s). Não foi possível visualizar a fase múltipla positiva.

As figuras 10 e 11 mostram os traços de FR no domínio da frequência (a) e os valores de espessura crustal e razão Vp/Vs calculados pelo programa HK-Stacking (b), para as estações sismográficas AGBL e PTSB.

A linha vermelha tracejada em (a) representa o tempo de chegada das ondas P e Ps, respectivamente. A elipse vermelha em (b) representa a variação dos parâmetros profundidade versus Vp/Vs. O gradiente de cores indica a variação da correlação dos parâmetros envolvidos, onde o amarelo representa a região de máxima correlação (100%) e o azul o de mínima (0%).



**Figura 10:** (a) traços da função do receptor no domínio da frequência; (b) resultado do programa HK-Stacking para a estação sismográfica AGBL.

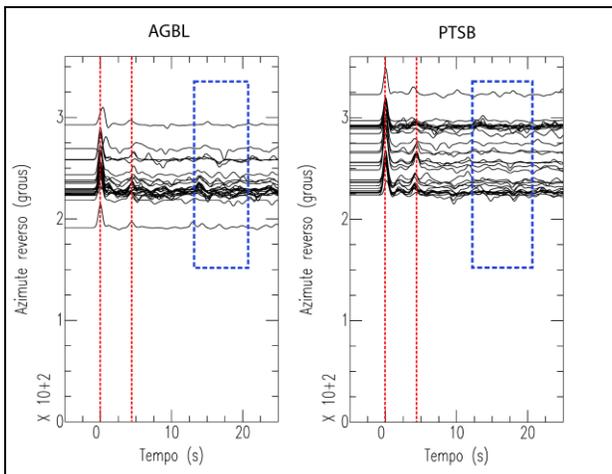


**Figura 11:** (a) traços da função do receptor no domínio da frequência; (b) resultado do programa HK-Stacking para a estação sismográfica PTSB.

Na obtenção das funções do receptor nos domínios da frequência e do tempo foram usados os mesmos eventos, alcançando um total de 58, em que 25 foram registrados pela estação AGBL e os 33 restantes por PTSB.

Nos traços de FR mostrados nas figuras 10 e 11, as fases P e Ps estão bastante visíveis. No entanto, não é possível a identificação das fases múltiplas positivas (Ppps) e negativas (Psp+Ppps).

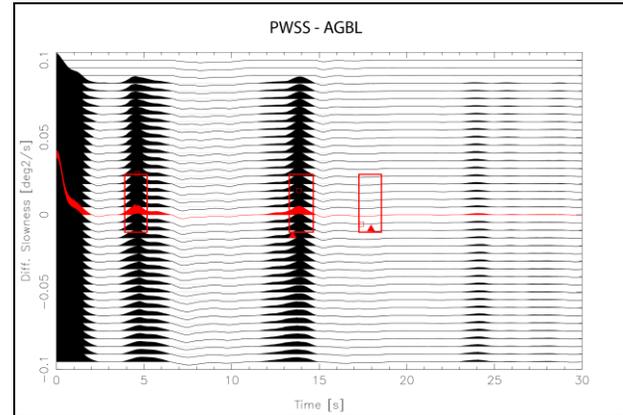
A figura 12 mostra a função do receptor no domínio do tempo para registros telessísmicos das estações AGBL (esquerda) e PTSB (direita). Os eventos encontram-se agrupados por azimute reverso (*back azimuth*). As linhas tracejadas em vermelho indicam os tempos de chegada das fases P e Ps, respectivamente. Já a linha tracejada em azul, indica o intervalo de tempo de chegada das fases múltiplas que, ao contrário do caso anterior, já são perceptíveis.



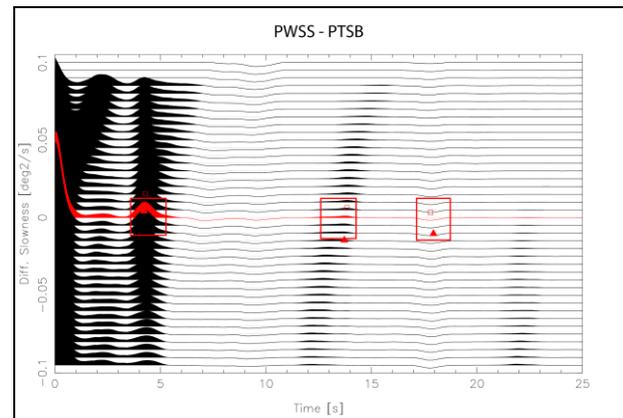
**Figura 12:** função do receptor no domínio do tempo para telessísmicos registrados pelas estações AGBL e PTSB.

As figuras 13 e 14 mostram o resultado do programa PWSS para registros telessísmicos das estações AGBL e

PTSB. A marcação das fases de referência para o cálculo de espessura crustal e razão  $V_p/V_s$  estão destacados por retângulos vermelhos.



**Figura 13:** resultado do PWSS para a estação AGBL.



**Figura 14:** resultado do PWSS para a estação PTSB.

O primeiro retângulo vermelho indica a fase P convertida em S na descontinuidade de Moho (Ps), o segundo a fase múltipla positiva (Ppps) e o terceiro, a múltipla negativa (Psp+Ppps).

Comparando as FRs produzidas no domínio da frequência com aquelas no domínio do tempo, é possível notar que nestas é mais fácil a identificação de todas as fases de interesse (P, Ps e múltiplas).

É importante a identificação de todas essas fases, pois como já foi mencionado, as diferenças de tempo de chegada são usadas no cálculo de espessura crustal e  $V_p/V_s$  de acordo com as equações (1) e (2).

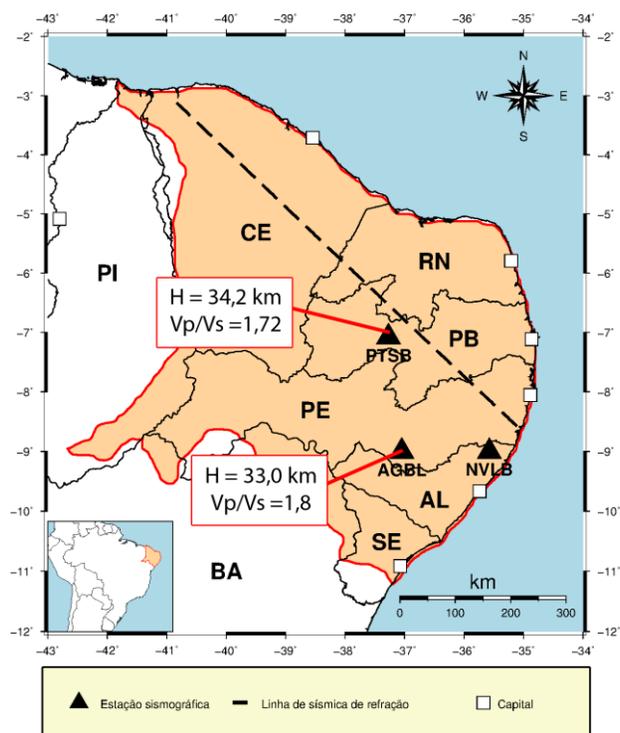
### Discussão e conclusão

A função do receptor com deconvolução nos domínios da frequência e do tempo tiveram performances semelhantes para a maioria dos traços, no que diz respeito à identificação dos tempos de chegada das fases P e Ps.

No entanto, os resultados utilizando a FR no domínio do tempo aliados ao método de empilhamento do programa PWSS proporcionaram maior clareza na identificação das fases múltiplas, que são de grande importância para minimizar o erro no cálculo das estimativas de espessura crustal (H) e razão  $V_p/V_s$ .

Os resultados de H e  $V_p/V_s$  para as estações AGBL (Águas Belas-AL) e PTSB (Patos-PB) estão consistentes com trabalhos que aplicaram metodologias semelhantes (Barbosa, 2008; Pavão, 2010) e até mesmo com metodologias diferentes, como a sísmica de refração profunda (Soares et al., 2009).

A figura 15 mostra a localização das estações sismográficas, da linha de refração sísmica profunda realizada por Soares et. al. (2009) e os valores médios de profundidade da descontinuidade de Moho (H) e razão  $V_p/V_s$  obtidos pelos dois tipos de função do receptor na província Borborema (região delimitada em vermelho no mapa).



**Figura 15:** localização das estações e valores médios obtidos pelos dois tipos de FRs dentro da província Borborema.

Para os dados da estação sismográfica NVLB, não foi possível obter estimativas confiáveis por conta da presença de lacunas e da baixa qualidade dos registros sísmicos, o que acabou por impossibilitar a aplicação do método.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Iniciação Científica, ao Pool de equipamentos,

que forneceu o necessário para a instalação das estações sismográficas, a todos os técnicos que participaram dos trabalhos de campo e, finalmente, ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), que ofereceu a estrutura física para a execução deste projeto.

### Referências

- AMMON, C., 1997. An overview of receiver function analysis. Acessado em 27, 28 e 29/04/2012. <http://www.eas.slu.edu/People/CJAmmon/HTML/RftnDocs/rftn01.html>.
- AMMON, C.J., 1991. The isolation effects from teleseismic P-waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, 2504–251.
- BIANCHI, M.B., 2008. Variações da estrutura da crosta, litosfera e manto para a plataforma Sul Americana através de funções do receptor para ondas P e S. PhD thesis, IAG, University of São Paulo, 133 pp.
- FRANÇA G S L A. 2003. Estrutura da crosta no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, usando função do receptor. Tese (Doutorado em Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo. 143f.
- FRANÇA G. S. & M. ASSUMPCÃO, 2004. Crustal Structure of the Ribeira fold Belt, SE Brazil, derived from Receiver Functions. *J. South Am. Earth Sc.*, v. 16, n. 8, p. 743-758.
- GOLDSTEIN, P. & A. SNOKE, 2005. "SAC Availability for the IRIS Community", Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management System Electronic Newsletter.
- LANGSTON CA. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J. Geophys. Res.*, 84: 4749–4762.
- PAVÃO C.G., G. S. FRANÇA. H. L. ROIG, G. S. MAROTTA; P. H. B. J. MENEZES; G. BARBOSA S. NETO. 2012. Spatial Interpolation Applied a Crustal Thickness in Brazil, aceito *Journal of Geographic Information System*.
- Ruskin Rocks. Acessado em 29/04/2012. <http://www.leeds.ac.uk/ruskinrocks/Earth%20Structure.html>.
- ZANDT, G., S. C. MYERS & T. C. WALLACE, 1995. Crust and mantle structure across the Basin and Range-Colorado Plateau boundary at 37o latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism, *J. Geophys. Res.*, 100, B6, 10529-10548.
- ZHU, L., AND H. KANAMORI, 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions, *J. Geophys. Res.*, 105, 2969–2980.