UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

AMPLIAÇÃO DA TOMOGRAFIA SÍSMICA DO MANTO
SUPERIOR NO SUDESTE E CENTRO-OESTE DO BRASIL
COM ONDAS P

MARCELO PERES ROCHA.

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO SOUSA DE ASSUMPÇÃO.

Dissertação apresentada ao Departamento de
Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de São
Paulo como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Ciências. Área: Geofísica.

São Paulo
· Julho/2003 ·

*Da minha aldeia vejo quanto da Terra se pode ver no Universo...
Por isso a minha aldeia é tão grande como outra terra qualquer
Porque eu sou do tamanho do que vejo
E não, do tamanho da minha altura...*

Fernando Pessoa

Para a minha Família, “Meu Povo”.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Estudos Anteriores	1
1.2 Objetivos Deste Trabalho	3
1.3 Área de Estudo	4
2 DADOS: CARACTERÍSTICAS E SELEÇÃO	6
2.1 Características das Estações	6
2.2 Características Fundamentais	11
2.2.1 Resíduos Relativos	11
2.2.2 Obtenção dos Resíduos Relativos: Método MCPCC	12
2.3 Seleção dos Eventos	14
2.3.1 Fases Utilizadas	14
3 DADOS: CONSISTÊNCIA	16
3.1 Estatísticas das Observações	16
3.2 Análises Comparativas	23
4 INVERSÃO DOS DADOS	29
4.1 Linearização	29
4.2 Parametrização do Modelo	30
4.3 Formulação da Inversão	32
4.4 Consistência da Inversão	35
4.5 Testes de Convergência e Regularização	37
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
5.1 Resultados Finais	41
5.2 Resultados Retirando Estações	56

6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	60
A	NOVAS ESTAÇÕES	62
B	EVENTOS UTILIZADOS - 2002	63
	BIBLIOGRAFIA	70

LISTA DE FIGURAS

1.1	Mapa da área de estudo contendo as estações utilizadas e algumas das principais estruturas geológicas da região.	4
1.2	Distribuição dos eventos de 2001 e 2002 com ondas P (círculos vermelhos) e PKP _{df} (círculos verdes) em relação à área de estudo representada pelo quadrilátero vermelho ao centro.	5
2.1	Sismômetro de banda larga da marca STRECKEISEN, modelo STS-2. Foto da instalação na estação pp1b (Sonora - MS) em uma base de cimento assentada em rocha (arenito). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	7
2.2	Sismômetros de período curto da marca MARK PRODUCTS, modelo L4C. Foto da instalação na estação ijuq (Juquiá - SP). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	8
2.3	Sismômetro de período curto da marca TELEDYNE, modelo S13, sendo utilizado em um teste de ruído na escolha de local para instalação de uma estação. (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	8
2.4	Sensor enterrado. Estação pp1b (Sonora - MS). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	9
2.5	Visão geral da estação pp1b (Sonora - MS). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	9
2.6	Exemplo dos passos seguidos para obtenção dos resíduos de tempo de percurso utilizando a correlação MCPCC (Schimmel <i>et al.</i> 2003). A) Sismogramas originais alinhados pelo tempo teórico do modelo IASP91. B) Sismogramas filtrados (0,8 a 1,6 Hz) alinhados pelos <i>picks</i> resultantes da correlação cruzada. C) Empilhamento dos traços para verificação da qualidade da <i>pickagem</i> . Sismo ocorrido no Norte do Peru em 21/04/2002 com magnitude 5,0 m_b	13
2.7	Triplicação de fases causada pelo forte gradiente na velocidade das ondas sísmicas.	14
2.8	Curva do tempo de percurso, mostrando as triplicações de fase resultantes do abrupto aumento da velocidade das ondas sísmicas nas profundidades de 410 km (de 15° à 17° aproximadamente) e 660 km (de 17° a 27° aproximadamente) - Fonte: Lay & Wallace (1995).	15
3.1	Histograma e distribuição gaussiana dos resíduos relativos de tempo de percurso para toda a base de dados (incluindo todas as estações).	17
3.2	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação BDFB.	19

3.3	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação corb.	19
3.4	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cv1b.	19
3.5	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação gnsb.	19
3.6	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pazb.	20
3.7	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação porb.	20
3.8	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pp1b.	20
3.9	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação slmb.	20
3.10	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação IGPB.	21
3.11	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MIR1.	21
3.12	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação NP4B.	21
3.13	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MAN1.	21
3.14	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MAN2.	22
3.15	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cam3.	22
3.16	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cam4.	22
3.17	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação vao1.	22
3.18	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação itpb.	23
3.19	Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pdcb.	23
3.20	Comparação da média dos resíduos relativos pelo <i>back azimuth</i> , entre as estações IGPB (UnB; Igarapava - MG; Lat. -20,0000 e Long. -47,7100) e rifb (BLSP; Rifaina - SP; Lat. -20,0737 e Long. -47,5019).	24
3.21	Fases P e PKPdf chegando a uma estação sísmica qualquer, dando uma idéia da diferença entre os ângulos de incidência destas fases em relação à reta normal. . .	24
3.22	Comparação da média dos resíduos relativos pelo <i>back azimuth</i> , entre as estações pacb (BLSP; Pacaembú - SP; Lat. -21.6074 e Long. -51.2618) e popb (BLSP; Porto Primavera - PR; Lat. -22,4564 e Long. -52,8367).	25
3.23	Comparação da média dos resíduos relativos pelo <i>back azimuth</i> , entre as estações bamb (BLSP; Bambuí- MG; Lat. -20.0398 e Long. -46.0308), frmb (BLSP; Formiga - MG; Lat. -20.4876 e Long. -45.6389) e furb (BLSP; Furnas - MG; Lat. -20.6782 e Long. -46.2779).	26
3.24	Comparação da média dos resíduos relativos pelo <i>back azimuth</i> , entre as estações gns - gnsa/gnsb (BLSP; Goianésia - GO; Lat. -15.2644 e Long. -15.2644), paz - paz4/pazb (BLSP; Araguapaz - GO; Lat. -15.1369 e Long. -50.8634) e slmb (BLSP; São Luis dos Montes Belos - GO; Lat. -16.5705 e Long. -50.3455).	27
3.25	Comparação dos resíduos relativos para dois períodos de operação da estação BDFB (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 2000-2002	28

4.1	Limites e espaçamentos horizontais entre os nós do modelo.	30
4.2	Parametrização do modelo utilizado na inversão dos dados. Os quadrados brancos representam as estações utilizadas (inclusive as novas estações incluídas neste trabalho - Apêndice A). O volume marcado pelas linhas amarelas é a região com melhor resolução da grade.	31
4.3	Representação esquemática dos tipos de problemas descritos pela teoria da inversão (Menke 1984).	32
4.4	Comparação entre as imagens tomográficas geradas pela inversão da base contendo dados com erros (Figuras a , c e e), e da base final depurada (Figuras b , d e f). As iterações referem-se ao processo de diminuição dos pesos para resíduos grandes.	36
4.5	Curvas de rms para as iterações com pesos decrescentes (<i>down-weighting</i>) da base de dados total (com erros) e da base final (depurada). Foram utilizados os valores de 90000 e 2800 para suavidade e <i>flatness</i> respectivamente.	37
4.6	Comparação entre as imagens tomográficas com diferentes valores para os parâmetros de regularização. Para a), c) e e) o valor de suavidade foi 200000 e o de <i>flatness</i> 5000. Para b), d) e f) a suavidade foi 90000 e o <i>flatness</i> 2800.	38
4.7	Curvas de rms para iterações de <i>down-weighting</i> na inversão da base de dados final com dois valores de regularização. Na curva com triângulos vermelhos, os valores de suavidade e <i>flatness</i> foram 90000 e 2800 respectivamente, já na curva com triângulos azuis, estes valores dobraram (suavidade - 200000 e <i>flatness</i> - 5000)	39
4.8	Modelos com diferentes valores para os parâmetros de regularização e com mesmo ajuste (rms) para os dados ($\sigma = 0,035s$). a) Suavidade 90000 e <i>flatness</i> 2800. b) Suavidade 200000 e <i>flatness</i> 5000.	39
4.9	Distribuição dos ângulos de incidência dos raios a 400 km de profundidade como função dos <i>back azimuths</i> , e o erro do ajuste para o conjunto de dados de ondas P.	40
5.1	Imagem tomográfica a uma profundidade de 200 km para um modelo de Terra, homogêneo e isotrópico.	44
5.2	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 150 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades. Os círculos amarelos representam as intrusões alcalinas do Cretáceo Superior, os quadrados brancos são estações da rede e as linhas brancas perfis verticais.	45
5.3	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 200 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	45
5.4	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 300 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades. Os quadrados brancos são estações da rede e as linhas brancas perfis verticais.	46

5.5	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 400 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	46
5.6	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 500 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	47
5.7	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 700 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	47
5.8	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 900 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	48
5.9	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 1100 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	48
5.10	Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 1300 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.	49
5.11	Perfil vertical A-A' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente a anomalia de baixa velocidade de Iporá.	50
5.12	Perfil vertical A-A' mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	50
5.13	Perfil vertical B-B' destacando no centro a anomalia de baixa velocidade atribuída à pluma de Tristan da Cunha de acordo com Schimmel <i>et al.</i> (2003) e VanDecar <i>et al.</i> (1995). A placa de Nazca aparece a esquerda da anomalia de Tristan da Cunha como segmentos de alta velocidade separados.	51
5.14	Perfil vertical B-B' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	51
5.15	Perfil vertical C-C' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente anomalias de baixa velocidade relacionadas a intrusões alcalinas datadas de 90-55 Ma.	52
5.16	Perfil vertical C-C' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	52
5.17	Perfil vertical D-D' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente as anomalias de baixa velocidade de Iporá e de alta velocidade relacionada à parte sul da Faixa Brasília (Escalante 2002).	53
5.18	Perfil vertical D-D' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	53
5.19	Perfil vertical E-E' até uma profundidade de 1400 km mostrando principalmente a junção da anomalia de baixa velocidade atribuída à pluma de Tristan da Cunha com uma anomalia (baixa velocidade) espúria (Escalante 2002) a partir dos 500 km.	54

5.20	Perfil vertical E-E' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	54
5.21	Perfil vertical F-F' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente a anomalia de baixa velocidade de Iporá e a tendência de baixa velocidade da região da Província Ígnea de Poxoréu em Mato Grosso.	55
5.22	Perfil vertical F-F' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.	55
5.23	Comparação entre as imagens tomográficas geradas para a) todos os dados, b) retirando argb, c) retirando as estações de Manso (1 e 2), d) retirando paz4 e pazb (mesma posição), e) retirando pp1b e f) retirando slmb.	57
5.24	Comparação entre as imagens tomográficas geradas para a) todos os dados, b) retirando estações UnB, c) retirando canb, d) retirando MAN2, e) retirando rsta e rstb (mesma posição) e f) retirando estações RESUSP e RSBC.	58

LISTA DE TABELAS

1.1	Contribuição de cada trabalho para a base de dados atual.	3
2.1	Período de funcionamento das estações do projeto BLSP (aajjj), relacionado ao tipo de sismômetro (Fonte: José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).	10
3.1	Informações sobre as estações mostradas nos histogramas. O $n.^0$ max. de raios é o valor do pico do histograma, isto é, número de raios com resíduos próximos de zero	18
A.1	Localização das novas estações incluídas na rede utilizada.	62
B.1	Novos eventos incluídos durante este trabalho na base de dados total.	63

AGRADECIMENTOS

Primeiramente Agradeço a Deus que me permitiu, apesar de todas as dificuldades, chegar até aqui. Agradeço principalmente aos meus queridos pais, Brasil Gomide Rocha e Sueli Peres Rocha, bem como aos meus irmãos, Brasil Gomide Rocha Júnior e Ricardo Peres Rocha por todo apoio e incentivo durante este período, pois sem eles com certeza eu não conseguiria.

Agradeço de forma especial ao Prof. Dr. Marcelo Sousa de Assumpção pela confiança ao me orientar, considerando o pouco tempo para o desenvolvimento deste projeto; ao amigo Dr. Martin Shimmel pela sua orientação e conselhos, os quais me deram segurança para explorar este novo caminho; ao colega Msc. Christian Escalante Vilca pela constante ajuda, conselhos e por ter sido a primeira pessoa que me mostrou o que é a Tomografia Sísmica e ao amigo José Roberto Barbosa por todos os esclarecimentos em relação aos diversos tipos de estações sísmográficas, e principalmente pela paciência.

Agradeço à minha ex-orientadora Prof. Dra. Liliana Alcazar Diogo pelo que me ensinou, e pela compreeção, à Prof. Dra. Naomi Ussami pela ajuda durante o meu ingresso e ao Prof. Dr. Wladimir Shukowsky por todas dúvidas tiradas e pela ajuda na revisão do trabalho. Da mesma maneira agradeço aos meus professores e colegas da época da graduação do curso de Física na UFMT, que me incentivaram e que me mostram que eu poderia conseguir, em especial aos professores Dr. Shozo Shiraiwa, Dr. Sérgio Roberto de Paulo, Dr. Carlos Rinaldi e Dr. Moacir Lacerda por todo incentivo, e ainda aos amigos Abílio Masteus Júnior e Welitom Rodrigues Borges pela amizade e ajuda durante a confecção e revisão desta dissertação.

Ainda agradeço a todos professores, técnicos, funcionários do IAG (de maneira geral), em especial a Maria Perpétua (Teca), e também aos colegas e amigos, Nilton, Henrique, Shimeles, Afonso, D. Beth, Marcelo “Slot”, Manuelle, Oleg, Hugo Saar, Fabio Shibata, Paulinho, Miguel, Márcia, Ivan, Mei, Meijian, Marcelo Gomez, Sabrina, George Sand, entre outros que não caberiam nesta dissertação se eu fosse citá-los pelo que representam. Principalmente, agradeço a querida amiga **Erika Reyes** por toda a força. Muito Obrigado a Todos!!!

De uma maneira toda especial quero agradecer a você **Kátia** por tudo, particularmente pela sua compreensão e paciência. *Ósculos e Amplexos.*

RESUMO

ROCHA, M. P. **Ampliação da Tomografia Sísmica do Manto Superior no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil com ondas P**. 2003. 71p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Variações dos tempos de percurso de fases P e PKP foram usados para tomografia sísmica do manto superior sob o sudeste e centro-oeste do Brasil. Os principais objetivos foram: Melhorar a resolução obtida pelos estudos anteriores (VanDecar *et al.*, 1995; Escalante, 2002; Schimmel *et al.*, 2003, feitos de 1992 a 2001) com a inclusão de novos dados e estações, mapear as áreas que não tinham sido cobertas pelas estações anteriores, tentar mostrar a consistência da base de dados, principalmente relacionada às novas estações e verificar a robustez das anomalias encontradas. Foi estudada a influência das estações localizadas nas regiões anômalas através de inversões secundárias (retirando estações). Nesta base foram incluídos registros recentes do ano 2002 e também registros de 2000 e 2001 para eventos utilizados nos trabalhos anteriores. Os resultados confirmaram as estruturas observadas nos trabalhos anteriores e também revelaram novas regiões anômalas, particularmente no sul do estado de Mato Grosso.

Das anomalias observadas nos trabalhos anteriores, confirmamos em nossos resultados o Cráton do São Francisco como uma anomalia de alta velocidade, com suas raízes chegando a 250 km de profundidade, a anomalia de baixa velocidade interpretada como resto fóssil da pluma de Tristan da Cunha (VanDecar *et al.* 1995), a boa correlação das anomalias rasas de baixa

velocidade com as intrusões alcalinas do Cretáceo Superior (Schimmel *et al.* 2003), a anomalia de baixa velocidade inferida por Escalante (2002) na região de Iporá em Goiás (possível região do impacto inicial da pluma de Trindade), uma anomalia de alta velocidade sob a região da Bacia do Paraná (profundidades rasas) interpretada inicialmente por Schimmel *et al.* (2003) como possível núcleo cratônico da Bacia do Paraná e também, nesta mesma região (maiores profundidades), uma anomalia de alta velocidade interpretada como a litosfera subduzida da Placa de Nazca (Schimmel *et al.*, 2003 e Escalante, 2002).

A nova base permitiu a expansão da área de estudo e o imageamento de anomalias de baixa velocidade na província ígnea de Poxoréu em Mato Grosso, as quais são consistentes com o afinamento litosférico proposto no modelo de Thompson *et al.* (1998).

Palavras-chave: Tomografia Sísmica, Manto Superior, Ondas P, Cráton do São Francisco, Bacia do Paraná, Placa de Nazca, Pluma de Tristan da Cunha, Pluma de Trindade.

ABSTRACT

ROCHA, M. P. **Extension of Upper Mantle Seismic Tomography in Southeast and Central Brazil using P-waves.** 2003. 71p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Variations of P and PKP travel times were used for seismic tomography of the upper mantle beneath southeast and central Brazil. Our principal objectives were: To improve the resolution obtained by the previous studies (carried out by VanDecar *et al.*, 1995; Escalante, 2002; Schimmel *et al.*, 2003 between 1992 and 2001) with inclusion of new data and stations, to map areas not covered by previous stations, to show the consistency of the database, mainly of the related to the new stations and to verify the robustness of the detected anomalies. The influence of the stations located in the anomalous areas were studied through secondary inversions (removing stations). The new data set includes recent records of 2002 and also new records from 2000 and 2001 for events used in the previous works. Our results confirm the structures observed in the previous works and also revealed new anomalous regions, particularly in the south of the Mato Grosso state.

We confirmed the anomalies observed in the previous works: The São Francisco craton has as a high-velocity anomaly, with roots down to 250 km depth, the low velocity anomaly interpreted as a fossil remnant of the Tristan da Cunha plume (VanDecar *et al.* 1995), the good correlation of the shallow low velocity anomalies with the alkaline intrusions of the Late-Cretaceous (Schimmel

et al. 2003), the low velocity anomaly inferred by Escalante (2002) in the Iporá igneous province in Goiás (possible area of the initial impact of the plume of Trindade), a high-velocity anomaly under the Paraná Basin (shallow depths) interpreted initially by Schimmel et al. (2003) as possible cratonic nucleus of the Paraná Basin and also, in this same area (larger depths), a high-velocity anomaly interpreted as the slab of the Nazca Plate (Schimmel et al., 2003 and Escalante, 2002).

The new data set allowed the expansion of the study area and the imaging of low velocity anomalies in the igneous province of Poxoréu in Mato Grosso, which are consistent with the model of lithospheric thinning proposed by Thompson *et al.* (1998).

Key-words: Seismic Tomography, Upper Mantle, P-waves, São Francisco craton, Parana Basin, Nazca Plate, Tristan da Cunha plume, Trindade plume.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O estudo dos eventos tectônicos passados e da evolução geológica permitem uma melhor compreensão da estrutura atual da Terra. A crosta e o manto superior contêm feições estruturais relacionadas a antigos processos geodinâmicos. A tomografia sísmica fornece informações destas estruturas através do mapeamento das variações de velocidade das ondas sísmicas. Isto é feito com a inversão dos tempos de percurso das ondas geradas por terremotos que ocorrem em todo o mundo, obtendo assim, informações sobre pequenas variações de velocidade em relação a um modelo médio da Terra. Neste trabalho damos continuidade ao estudo do manto superior sob o sudeste e centro-oeste do Brasil utilizando a tomografia sísmica.

1.1 ESTUDOS ANTERIORES

Desde 1992 o IAG-USP, algumas vezes em conjunto com instituições internacionais, vem realizando estudos tomográficos nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Este estudo é uma continuação dos outros trabalhos de tomografia sísmica utilizando ondas P (VanDecar *et al.*, 1995; Escalante, 2002; Schimmel *et al.*, 2003), todos do projeto “Brazilian Lithospheric Seismic Project” (BLSP92, BLSP95 e BLSP02), e busca adicionar mais informações à base de dados gerada por estes trabalho, para melhorar a resolução das estruturas observadas.

Os estudos tomográficos de VanDecar *et al.* (1995) revelaram principalmente uma anomalia de baixa velocidade próxima do centro do arranjo utilizado por ele (entre as latitudes -16° e -27° e entre as longitudes de -41° e -55°). Esta anomalia foi interpretada como sendo uma estrutura termal mais quente remanescente da pluma de Tristan da Cunha sob a Bacia do Paraná correlacionada com os derrames de basaltos ocorridos a ~ 135 Ma nesta região. O Cráton do São Francisco mostrou velocidades altas no manto superior.

No trabalho de Schimmel *et al.* (2003) foram investigadas maiores profundidades e novas áreas em relação à área de VanDecar *et al.* (1995).

Os resultados de Schimmel *et al.* (2003) mostraram uma boa correlação entre as províncias de intrusões alcalinas do Cretáceo Superior e as áreas com anomalias de baixa velocidade. Também foi confirmada a anomalia observada anteriormente por VanDecar *et al.* (1995), sendo interpretada da mesma maneira.

Ainda foi observada neste trabalho uma anomalia de alta velocidade abaixo do Cráton do São Francisco com raízes de aproximadamente 200 km, e uma outra no manto superior na parte oeste da Bacia do Paraná que poderia indicar um núcleo cratônico para esta Bacia conforme inferido por Cordani *et al.* (1984). Foi encontrada uma região com altas velocidades no manto inferior abaixo da Bacia do Paraná. Esta região foi interpretada como sendo a litosfera subduzida da Placa de Nazca, chegando a profundidade de 1300 km.

Os resultados de Escalante (2002) confirmam a presença da anomalia de alta velocidade abaixo do Cráton do São Francisco com raízes entre 200 e 300 km de profundidade e a anomalia de alta velocidade no oeste da Bacia do Paraná como observada por Schimmel *et al.* (2003). Além destas, as anomalias de altas velocidades referentes à subducção da Placa de Nazca foram observadas.

A anomalia de baixa velocidade interpretada como sendo o conduto fóssil da pluma de Tristan da Cunha, nos resultados do trabalho de Escalante (2002) é notada a partir de 250 km de profundidade, sendo que a partir dos 500 km ela cresce em volume e estende-se até uma profundidade de 600 a 700 km.

A principal diferença do trabalho de Escalante (2002) em relação ao de Schimmel *et al.* (2003) foi o aumento da área de investigação e a maior cobertura de estações, principalmente na região de Goiás. Foi observada uma estrutura de baixa velocidade na região da província ígnea de Iporá em Goiás, que poderia estar relacionada ao efeito inicial da pluma de Trindade. Esta anomalia é consistente com o modelo proposto por Thompson *et al.* (1998).

Outros trabalhos de tomografia utilizando ondas de superfície foram realizados englobando esta região (Silveira *et al.* (1998); Heintz *et al.* (2000); Vdovin *et al.* (1999); Van der Lee *et al.* (2001)), e podem ser considerados complementares aos estudos tomográficos na região sudeste e centro-oeste do Brasil. Basicamente, as estruturas observadas nestes trabalhos são rasas (até 300 km) devido à menor penetração das ondas de superfície. A resolução lateral deste tipo de onda é pequena considerando seus longos períodos. Desta maneira para este tipo de tomografia são apenas mapeadas estruturas de larga escala (centenas de quilômetros). Os resultados principais destes trabalhos são a observação das grandes unidades tectônicas da América do Sul, como o Cráton Amazônico e o Altiplano. No trabalho de Van der Lee *et al.* (2001) a anomalia de baixa velocidade sob a Bacia do Paraná foi detectada.

1.2 OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Considerando que a resolução tomográfica depende da quantidade e distribuição dos dados na área de estudo (cobertura das estações) temos como objetivo principal incluir novos dados na base existente, principalmente em regiões onde não existiram estações anteriores. Esperamos com a inclusão de novas estações (estações não utilizadas nos trabalhos anteriores) mapear novas áreas e ainda aumentar a precisão dos resíduos relativos no processo de *pickagem* (Capítulo 2).

Queremos também observar a influência das estações localizadas nas regiões anômalas de maior interesse através de inversões secundárias (testes retirando estações da base), e assim estudar quais anomalias são robustas e quais ainda necessitam de mais estações/dados para serem confirmadas.

TABELA 1.1 — Contribuição de cada trabalho para a base de dados atual.

Trabalhos	Fases	Eventos	Chegadas	Estações/Evento
(Schimmel <i>et al.</i> 2003)	P	656	4281	
(1992 - 1999)	PKP	152	1086	6,6
	Total	808	5367	
(Escalante 2002)	P	386	1625	
(2000 - 2001)	PKP	96	496	4,4 *
	Total	482	2121	
Este Trabalho:	P	234	2830	
(2002) e inclusão	PKP	34	414	12,1 **
de dados em 2000 e 2001	Total	268	3244	
TOTAL GERAL	P	1276	8736	
	PKP	282	1996	6,9
	Total	1558	10732	

*,** Estes valores não expressam completamente o que ocorre, pois muitas das chegadas atribuídas a este trabalho (e.g. UnB), referem-se a eventos processados inicialmente por Escalante (2002).

A Tabela 1.1 mostra uma comparação dos dados referentes aos trabalhos anteriores e este. O trabalho de Schimmel *et al.* (2003) utilizou e reprocessou todos os dados utilizados por VanDecar *et al.* (1995) de 1992 a 1994, e adicionou dados até 1995. As informações deste trabalho, portanto, cobrem o período 1992-1999.

Comparando com os dados de Escalante (2002), observamos que apesar da quantidade de eventos do presente trabalho ser menor (268), a quantidade de raios é maior (3244). Isto se deve à inclusão de outras estações durante este trabalho na base de dados de Escalante (2002) como os da rede USP e da UnB. Ou seja, a quantidade de eventos se manteve para os anos de 2000 e 2001, mas o número de raios aumentou. Cada evento é registrado, em média, por ~ 7 estações.

1.3 ÁREA DE ESTUDO

A região estudada compreende principalmente o sudeste e centro-oeste do Brasil, incluindo algumas estruturas geológicas importantes, como o Cráton do São Francisco e a Bacia do Paraná. A área fica entre as Latitudes -12° e -30° e entre as longitudes -38° e -60° (Figura 1.1), e nela estão localizadas cerca de 68 estações (banda larga e período curto) utilizadas neste trabalho e nos anteriores. A maior densidade de estações fica na região sudeste.

FIGURA 1.1 — Mapa da área de estudo contendo as estações utilizadas e algumas das principais estruturas geológicas da região.

Na Figura 1.1 as estações representadas por triângulos verdes foram utilizadas principalmente no trabalho de VanDecar *et al.* (1995) e Schimmel *et al.* (2003). As em triângulo azul foram utilizadas principalmente no trabalho de Escalante (2002), exceto as estações da rede sismográfica da USP “RESUSP” (vao, vao2 e vao3) e da rede sismográfica da Bacia de Campos “RSBC” (cam1, cam3 e cam4) utilizadas neste trabalho e algumas no trabalho de Schimmel *et al.* (2003). As estações representadas em vermelho (quadrados e triângulos) foram usadas

exclusivamente neste trabalho (Apêndice A).

Na Figura 1.2 está mostrada a distribuição azimutal dos eventos com relação à rede. Os eventos mostrados nesta figura são do ano de 2002 (Apêndice B) utilizados somente neste trabalho, e do ano de 2001 no trabalho de Escalante (2002). Os círculos vermelhos representam fases P e os verdes fases PKPdf. A seleção de apenas estas duas fases primárias está justificada no Capítulo 2.

FIGURA 1.2 — 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.

O contexto tectônico da área de estudo está ligado a diversos eventos ocorridos durante o ciclo Brasileiro/Pan-Africano (Brito Neves *et al.* 1991). Um detalhamento maior da evolução tectônica da região pode ser encontrado em Escalante (2002).

CAPÍTULO 2

DADOS: CARACTERÍSTICAS E SELEÇÃO

Os dados utilizados neste trabalho são resíduos relativos de tempo de percurso de fases de ondas P telessísmicas, obtidos da diferença entre o tempo observado e o tempo teórico. Foram utilizadas estações pertencentes a diversos projetos e grupos de pesquisa: IAG/USP (rede temporária BLSP, rede permanente RESUSP e rede permanente RSBC), UnB (rede Amazon Scope), ETH-Zurique (projeto BLSP02) e rede digital mundial.

Será feita neste capítulo uma descrição das características dos dados, como por exemplo as diferenças entre as estações dos diversos grupos de pesquisa e o cálculo dos resíduos relativos. Serão também discutidos os critérios de seleção dos dados, com um enfoque nas fases, nos intervalos de distância selecionados para cada fase, e também na magnitude dos eventos.

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES

A maioria das estações utilizadas na tomografia do sudeste e centro-oeste brasileiro possuem sismômetro de banda larga (“broadband”, Figura 2.1), e seus dados vêm sendo usados no projeto “Brazilian Lithospheric Seismic Project” (BLSP). Na Tabela 2.1 estão as estações que forneceram dados para o projeto BLSP, incluindo as de período curto (Figura 2.2). Praticamente todas as estações BLSP operaram com o registrador da marca REFTEK. Utilizamos também estações de período curto da Rede Sismográfica da USP (RESUSP) e da Rede Sismográfica da Bacia de Campos (RSBC), e ainda estações de banda larga da Universidade de Brasília (UnB), da Rede GTSN (Global Telemetered Seismograph Network - USGS) e uma da GEOSCOPE (SPB - Sorocaba/SP). As novas estações estão indicadas no Apêndice A.

A Figura 2.1 mostra um sismômetro triaxial de banda larga da marca STRECKEISEN, modelo STS-2, usado na maioria das estações “broadband” do projeto BLSP. Algumas estações utilizam sismômetros triaxiais da marca GURALP com período de 100 segundos. Na Figura 2.2 são mostrados sismômetros de período curto para as três componentes, utilizados nas estações “short period” deste projeto.

A Figura 2.3 mostra a componente vertical de um sismômetro de período curto da marca TELEDYNE, modelo S13, usados nas redes RESUSP e RSBC. Nesta foto o sismômetro está sendo usado para testes de ruído, feitos para avaliar os locais de instalação das estações.

FIGURA 2.1 — Sismômetro de banda larga da marca STRECKEISEN, modelo STS-2. Foto da instalação na estação pp1b (Sonora - MS) em uma base de cimento assentada em rocha (arenito). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

As estações da UnB possuem sismômetros de banda larga triaxial GURALP com período de 30 segundos.

Para as estações BLSP, os sensores das estações de banda larga foram enterrados, buscando diminuir os efeitos dos ruídos ambientais (temperatura, principalmente) sobre os registros. A Figura 2.4 mostra o sensor soterrado, e a Figura 2.5 mostra uma visão geral da estação.

Os registros de período curto foram transformados para imitar os registros de banda larga, e assim, as formas de onda registradas com instrumentos de período curto e banda larga puderam ser utilizados juntamente durante a marcação das chegadas como veremos mais adiante. O intervalo de frequência dos dados ficou em torno de 1Hz.

Todas as estações foram equipadas com receptores GPS, permitindo uma melhor localização e um tempo de registro mais preciso (correção de tempo automática). O tempo da maioria das estações (BLSP) foi corrigido utilizando arquivos com informações da operação do GPS, o que chamamos de correção de tempo controlada. Este tipo de correção garante um tempo ainda mais preciso, diminuindo as inconsistências da base de dados total. Os dados da RESUSP e da RSBC (IAG/USP) são corrigidos automaticamente no registro em tempo real efetuado no IAG. Em princípio, não há necessidade de correção adicional. Não tivemos controle sobre a correção de tempo das estações da UnB.

FIGURA 2.2 — Sismômetros de período curto da marca MARK PRODUCTS, modelo L4C. Foto da instalação na estação ijuq (Juquiá - SP). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

FIGURA 2.3 — Sismômetro de período curto da marca TELEDYNE, modelo S13, sendo utilizado em um teste de ruído na escolha de local para instalação de uma estação. (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

FIGURA 2.4 — Sensor enterrado. Estação pp1b (Sonora - MS). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

FIGURA 2.5 — Visão geral da estação pp1b (Sonora - MS). (Foto de José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

TABELA 2.1 — Período de funcionamento das estações do projeto BLSP (aaajj), relacionado ao tipo de sismômetro (Fonte: José Roberto Barbosa, Laboratório de Sismologia do IAG/USP).

Localidade	Nome	Tipo	Modelo	Período	Situação (20/06/03)
Goianésia - GO	gnsa	PC	L4C	01257-01314	Ativada
	gnsb	BL	STS-2	01314-presente	
São Luis de Montes Belos - GO	slmb	PC	L4C	01174-01258	Ativada
	slmb	BL	STS-2	02085-presente	
Porangatú - GO	porb	BL	STS-2	00217-02087	Desativada
Caldas Novas, Corumba - GO	cor2	PC	S13	99280-00144	Desativada
	corb	BL	GURALP	00144-03072	
Araguapaz, Aruanã - GO	paz4	PC	L4C	99282-00146	Desativada
	pazb	BL	GURALP	00146-02255	
Ponte de Pedra, Sonora - MS	pp1b	BL	STS-2	02272-presente	Ativada
Nova Veneza - SC	novb	PC	L4C	02173-02285	Ativada
	novb	BL	STS-2	02285-presente	
Rio Claro - SP	rcla	PC	L4C	02243-02310	Ativada
	rclb	BL	GURALP	02295-presente	
BambuÍ - MG	bamb	BL	STS-2	02063-presente	Ativada
Nuporanga - SP	nupb	BL	GURALP	01283-01355	Ativada
	nupb	BL	STS-2	01355-02306	
	nupa	PC	L4C	02306-presente	
Porto Primavera - SP	popb	BL	STS-2	99237-02266	Desativada
DAEE, Mogi das Cruzes - SP	daeb	BL	STS-2	00321-02079	Desativada
Canoas, Itambaracá - PR	canb	BL	STS-2	99235-01211	Desativada
Tijuco Alto, Adrianópolis - PR	rsta	PC	L4C	98234-99300	Desativada
	rstb	BL	STS-2	00271-01226	
Nova Alvorada - MS	navb	BL	STS-2	94273-95166	Desativada
Porto Murinho - MS	ptmb	BL	STS-2	94275-95167	Desativada
Ibitinga - SP	ibib	BL	STS-2	94208-95164	Desativada
Olímpia - SP	olib	BL	STS-2	94214-95047	Desativada
Juquiá - SP	ijuq	PC	L4C	99294-99336	Desativada
	juqb	BL	STS-2	99336-01157	
Campos - RJ	cmpb	BL	STS-2	99041-99???	Desativada
Igaratá - SP	igab	PC	L4C	99023-99072	Desativada
	igab	BL	STS-2	99072-01233	
Brasópolis - MG	brsb	BL	STS-2	96174-98291	Desativada
Tres Rios - RJ	trrb	BL	STS-2	95277-98275	Desativado
Valinhos - SP	vaob	PC	S13	94291-94293	Desativada
	vaob	PC	Willmore	94293-95271	
	vabb	BL	STS-2	95271-98086	
	vabb	PC	L4C	98155-98175	
	vabb	BL	STS-2	98293-98296	
Barbacena - MG	barb	BL	STS-2	98097-00181	Desativada
Juiz de Fora - MG	jfob	PC	L4C	98142-98276	Desativada
	jfob	BL	STS-2	98276-00184	
Areado-MG	are-1	PC	L4C	96295-96306	Desativada
	are-1	PC	Willmore	96352-97085	
	areb	BL	STS-2	97085-99229	
Bom Sucesso - MG	bscb	BL	STS-2	97309-98278	Desativada
Natividade - RJ	natb	BL	STS-2	95337-97308	Desativada
Astolfo Dutra - MG	atdb	BL	STS-2	95342-97072	Desativada
Betim - MG	bet1	PC	Willmore	95192-96104	Desativada
Capivara - PR	capb	BL	STS-2	94384-95170	Desativada
Miranda, Uberlândia - MG	mir4	PC	L4C	98187-99019	Desativada

2.2 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

2.2.1 RESÍDUOS RELATIVOS

Muitas técnicas de inversão tomográfica utilizam resíduos de tempo de percurso das ondas sísmicas para imagear estruturas de velocidade no interior da Terra. Basicamente, os resíduos de tempo são as variações no tempo de percurso das ondas telessísmicas 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.

Definimos os resíduos **absolutos** de tempo de percurso como sendo a diferença entre o tempo observado e o tempo calculado (teórico), onde o tempo observado é obtido pela marcação visual das chegadas (*picking*) e o tempo teórico é obtido de tabelas de interpolação de tempo de percurso, em profundidade e distância, conhecidas como modelos de referência da Terra. Assim, de uma fonte j qualquer até um receptor $i = 1, \dots, I_j$, o resíduo **absoluto** de tempo será dado da seguinte forma,

$$r_{ij} = t_{o_{ij}} - t_{c_{ij}} \quad (2.1)$$

onde $t_{o_{ij}}$ é o tempo de percurso observado e $t_{c_{ij}}$ é o tempo de percurso calculado para o modelo médio da Terra, no nosso caso o IASP91 (Kenneth & Engdahl 1991). De acordo com a Equação 2.1, atrasos de tempo da fase observada 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), os quais são chamados de erros de fonte e percurso, respectivamente (Evans & Achauer 1993). Como a distância entre a fonte e o receptor é muito grande, estas contribuições podem ser consideradas aproximadamente constantes no segmento final dos raios sísmicos (próximos do arranjo de receptores), e podem ser removidos pela formulação dos resíduos relativos da forma,

$$rr_{ij} = r_{ij} - r_{ref_j} \quad (2.2)$$

onde r_{ref_j} é a média dos resíduos em todas as estações que registraram o mesmo evento j . Desta maneira, os resíduos **relativos** de tempo de percurso podem ser apresentados da seguinte forma,

$$rr_{ij} = r_{ij} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} r_{ij} \quad (2.3)$$

sendo esta a forma final dos dados que serão utilizados nas inversões tomográficas (ver Capítulo 04).

2.2.2 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS RELATIVOS: MÉTODO MCPCC

Entre os processos envolvidos na edição dos dados, a marcação dos tempos de chegada t_{oij} para a obtenção dos resíduos relativos é o mais importante e crítico. Nem sempre é possível observar claramente as primeiras quebras nos sismogramas devido à presença de ruído no sinal, o que dificulta a marcação das fases e consequentemente diminui a precisão dos resíduos. Isto pode acarretar erros na base final de dados.

Uma forma de diminuir os erros e inconsistências nos tempos de chegada, é a utilização de métodos numéricos de correlação cruzada durante a *pickagem* (Evans & Achauer 1993). O método utilizado neste trabalho é o MCPCC (Multichannel Phase Cross-Correlation) elaborado por Schimmel *et al.* (2003), que incorpora o método PCC (Phase Cross-Correlation) de Schimmel (1999) ao método MCCC de (VanDecar & Crosson 1990).

A principal vantagem do método MCPCC é a não dependência da identificação das primeiras quebras, muitas vezes influenciadas pela presença de ruído no sinal. O método MCPCC determina a similaridade das formas de onda através do maior número de amostras coerentes ao invés de usar a soma de produtos, e sendo assim, permite que não ocorra influência de porções de maior amplitude na janela de correlação.

O método MCPCC utiliza, portanto, a coerência das formas de onda observadas em estações diferentes (no nosso caso, no mínimo 4 estações) relacionadas a um mesmo evento, com ajustes por mínimos quadrados para determinação dos tempos de chegada das fases.

A Figura 2.6 mostra graficamente os passos seguidos para a obtenção dos resíduos relativos. A Figura 2.6A mostra o alinhamento dos traços (não filtrados) pela marca do tempo calculado (t_c), buscando identificar inicialmente as chegadas e principalmente observar *a priori* a existência de coerência entre as fases. Depois é selecionado um filtro passa-banda adequado para realçar o máximo possível o sinal em todos os traços simultaneamente, e logo em seguida é feita visualmente¹ uma marca inicial para o tempo observado. Estas marcas serão ajustadas e refeitas pelo programa de correlação. A Figura 2.6B mostra os traços filtrados e alinhados pelo tempo marcado após a correlação (t_0). Durante o processo de marcação do tempo observado,

¹Utilizamos o programa *Seismic Analyse Code - SAC* - para o procedimento de “*pickagem*”.

FIGURA 2.6 — Exemplo dos passos seguidos para obtenção dos resíduos de tempo de percurso utilizando a correlação MCPCC (Schimmel *et al.* 2003). **A)** Sismogramas originais alinhados pelo tempo teórico do modelo IASP91. **B)** Sismogramas filtrados (0,8 a 1,6 Hz) alinhados pelos *picks* resultantes da correlação cruzada. **C)** Empilhamento dos traços para verificação da qualidade da *pickagem*. Sismo ocorrido no Norte do Peru em 21/04/2002 com magnitude 5,0 m_b .

a correlação muitas vezes é refeita para encontrar um filtro mais adequado. O indicador de qualidade da *pickagem* está mostrado na Figura 2.6C, onde os traços, filtrados e alinhados pelo tempo observado, são empilhados para observar a coerência dos picos relativos.

2.3 SELEÇÃO DOS EVENTOS

2.3.1 FASES UTILIZADAS

Os eventos utilizados são fases de onda P telessísmica. Nós utilizamos a fase P direta e a fase PKP_{df} (PKIKP).

Como a obtenção dos resíduos relativos necessita principalmente de clareza nas chegadas, é necessário que sejam utilizados eventos com grande conteúdo de energia, o que permite a observação de chegadas com maiores amplitudes e consequentemente mais evidentes. Por isso, selecionamos eventos com magnitudes superiores a 4,6 m_b para as fases P e superiores a 5,4 m_b para as fases PKP_{df}.

Para evitar os efeitos relacionados à triplicação e à sobreposição de fases, foram selecionados intervalos de distância angular adequados para cada fase. Para as fases P foram selecionados eventos com distâncias entre 30° e 95° , e para as fases PKP_{df}, as distâncias ficaram entre 158° e 180° .

FIGURA 2.7 — Triplicação de fases causada pelo forte gradiente na velocidade das ondas sísmicas.

A triplicação de fases é resultado do aumento rápido do gradiente de velocidade das ondas sísmicas em algumas profundidades (camadas) no interior da Terra. Isto causa raios sísmicos com diferentes parâmetros de raio chegando em uma mesma estação em tempos aproximadamente iguais. Este efeito é observado nos sismogramas como chegadas muito próximas, ou mesmo sobrepostas, prejudicando a marcação da primeira fase para sismos com estas distâncias. A

Figura 2.7 ilustra o percurso feito pelos raios refratados nas zonas de alto gradiente e dificultando a identificação do percurso correto.

As zonas de aumento do gradiente de velocidade ocorrem a aproximadamente 410 e 650 quilômetros de profundidade, e provavelmente representam transformações nas fases mineralógicas das rochas do manto, influenciando chegadas que ocorrem entre 20 e 30 graus de distância aproximadamente. A Figura 2.8 mostra o gráfico de tempo de percurso pela distância, e o efeito do forte gradiente de velocidade que gera a triplicação de fases.

FIGURA 2.8 — Curva do tempo de percurso, mostrando as triplicações de fase resultantes do abrupto aumento da velocidade das ondas sísmicas nas profundidades de 410 km (de 15° à 17° aproximadamente) e 660 km (de 17° a 27° aproximadamente) - Fonte: Lay & Wallace (1995).

CAPÍTULO 3

DADOS: CONSISTÊNCIA

Para dar uma maior credibilidade aos resultados finais da tomografia sísmica, são necessários testes de consistência na base de dados que gerou estes resultados. Estes testes visam comparar o comportamento (estatístico ou não) dos registros de diversas estações do arranjo.

Neste capítulo serão mostrados os resultados dos testes feitos para a base como um todo, e para cada estação individualmente.

3.1 ESTATÍSTICAS DAS OBSERVAÇÕES

Nossos dados seguem uma distribuição aproximadamente normal, por isso podemos fazer algumas análises comparando esta distribuição a uma função de Gauss correspondente, obtendo estimativas do desvio padrão de toda a base ou de parte dela. Este procedimento foi feito antes da inversão para observar os dados inconsistentes (outliers) que prejudicam a qualidade dos resultados finais, já que na inversão por mínimos quadrados (Capítulo 4) estes recebem maiores pesos. A inversão de dados com erros muito grandes gera instabilidade nas reconstruções tomográficas, e desta maneira, com base nestas análises, a base de dados foi depurada.

A Figura 3.1 mostra o histograma dos resíduos relativos de tempo de percurso das fases P (em roxo) e PKPdf (em rosa) para a base de dados depurada. Antes da depuração o desvio padrão era $\sigma = 5,560s$ e após caiu para $\sigma = 0,418s$. Foram retirados 211 raios, dos quais alguns diretamente devido a inconsistências e outros por consequência da retirada destes (após a retirada de um ou mais raios com erros, para um mesmo evento podem sobrar menos que quatro raios, que é o mínimo para uma boa determinação das chegadas - Capítulo 2).

Foram feitos também histogramas para algumas estações (Figuras 3.2 à 3.19) localizadas em regiões importantes para a interpretação dos resultados. As informações contidas em todos os histogramas apresentados neste capítulo estão reunidas na Tabela 3.1. De uma forma geral o rms para cada estação possui valor em torno de 0,4s (aproximadamente o rms para a base total depurada), com algumas exceções.

FIGURA 3.1 — Histograma e distribuição gaussiana dos resíduos relativos de tempo de percurso para toda a base de dados (incluindo todas as estações).

Nas Figuras 3.2 até 3.9 são mostrados os histogramas para as estações instaladas na região de Iporá em Goiás. Para algumas estações deste grupo (corb, slmb - Figuras 3.3 e 3.9 respectivamente) podemos observar que existe uma tendência dos resíduos relativos serem negativos. Isto sugere que abaixo destas estações, na média, os raios chegam antes do tempo esperado (tempo teórico), ou seja, existem anomalias positivas de velocidade. Para as estações gnsb e pazb (Figuras 3.5 e 3.6) no entanto, as médias são positivas mostrando uma tendência da região abaixo desta estação ser de baixa velocidade (anomalia de Iporá - GO).

Neste mesmo grupo, as estações BDFB e porb (Figuras 3.2 e 3.7) parecem não possuir nenhuma tendência para a média dos resíduos relativos, ficando estes em torno de zero. Consequentemente para estas estações a média das anomalias de velocidade abaixo delas deve ser próxima de zero. Para as estações cv1b e pp1b (Figuras 3.4 e 3.8) não é possível se tirar nenhuma conclusão definitiva devido à pouca quantidade de dados. Estas estações até o momento do processamento possuíam pouco tempo de operação.

TABELA 3.1 — Informações sobre as estações mostradas nos histogramas. O $n.^0$ max. de raios é o valor do pico do histograma, isto é, número de raios com resíduos próximos de zero

Estações	rms (seg.)	média (seg.)	$n.^0$ raios	$n.^0$ max.raios
BDFB	0,403	0,041	1013	110
CAM3	0,432	0,020	52	09
CAM4	0,496	0,071	56	08
CORB	0,400	-0,215	585	79
CV1B	0,450	0,037	64	10
GNSB	0,352	0,153	260	43
IGPB	0,415	0,011	260	36
ITPB	0,508	-0,038	74	10
MAN1	0,510	0,183	22	05
MAN2	0,615	0,340	78	06
MIR1	0,445	-0,265	148	23
NP4B	0,434	-0,102	324	42
PAZB	0,372	0,105	443	60
PDCB	0,514	-0,235	65	09
PORB	0,394	-0,092	306	40
PP1B	0,515	-0,113	94	12
SLMB	0,413	-0,068	276	41
VAO	0,383	0,069	84	14
Todas	0,418	$-6,7089 \times 10^{-9}$	10732	1187

Em outro agrupamento, os histogramas para as estações MIR1 e NP4B (Figuras 3.11 e 3.12), possuem muitos dados e encontram-se localizadas em regiões próximas. Observamos uma tendência negativa para os resíduos destas estações, principalmente MIR1, indicando abaixo destas estações regiões de maior velocidade. No entanto, a estação IGPB (Figura 3.10) possui média de resíduos positivos, ou seja, está sobre uma região de velocidades negativas, o que poderá ser observado nos resultados finais (ver Capítulo 5). As estações MAN1 e MAN2 (Figuras 3.13 e 3.14) possuem poucos dados, no entanto podemos observar (principalmente para MAN2) uma tendência positiva dos resíduos, indicando que estas estações estão sobre uma região de baixa velocidade. A estação MAN2, tem uma variação muito maior dos dados ($rms = 0,615$) o que pode indicar problemas de tempo na estação. Devido à pouca quantidade de dados nesta região, ainda são necessários mais estudos para obter uma maior confiança nos resultados observados.

As estações cam3, cam4 e vao1 (Figuras 3.15, 3.16 e 3.17) não possuem grandes variações, e as estações itpb e pdcB (Figuras 3.18 e 3.19) não possuem dados suficientes para conclusões significativas, apesar de pdcB possuir uma média muito negativa. As estações MAN1, MAN2, pp1b, pdcB e itpb possuem desvio padrão dos dados acima do desvio de todas as estações (Tabela 3.1). Isto pode indicar problemas de controle de tempo ou então uma maior variabilidade das estruturas abaixo destas estações.

FIGURA 3.2 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação BDFB.

FIGURA 3.3 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação corb.

FIGURA 3.4 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cv1b.

FIGURA 3.5 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação gnsb.

FIGURA 3.6 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pazb.

FIGURA 3.7 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação porb.

FIGURA 3.8 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pp1b.

FIGURA 3.9 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação slmb.

FIGURA 3.10 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação IGPB.

FIGURA 3.11 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MIR1.

FIGURA 3.12 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação NP4B.

FIGURA 3.13 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MAN1.

FIGURA 3.14 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação MAN2.

FIGURA 3.15 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cam3.

FIGURA 3.16 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação cam4.

FIGURA 3.17 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação vao1.

FIGURA 3.18 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação itpb.

FIGURA 3.19 — Histograma para os resíduos de tempo relativos da estação pdcb.

3.2 ANÁLISES COMPARATIVAS

Para duas ou mais estações próximas, espera-se que os tempos de percurso das ondas sísmicas (representados pelos resíduos relativos), vindas de uma mesma direção sejam semelhantes, principalmente se estas estações estiverem operando simultaneamente (Rocha & Assumpção 2003).

A Figura 3.20 mostra a comparação dos resíduos relativos entre as estações IGPB e rifb, localizadas muito próximas e distanciadas de 23 km.

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. Existem algumas diferenças, mas na média o teste demonstra uma boa correlação entre os dados destas estações. Observa-se também que o erro é maior para as fases P do que para as fases PKPdf. Isto pode ser explicado pelo maior intervalo de distância angular em um mesmo azimuth para as fases P, as quais possuem maiores ângulos de incidência, e uma maior variação deste ângulo para sismos vindos de uma mesma direção (Figura 3.21). As fases PKPdf, por sua vez, chegam praticamente na vertical, com uma variação bem menor da incidência.

A distribuição residual mostrada na Figura 3.20 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.

Podemos observar ainda na Figura 3.20 um erro muito maior para as fases P da estação IGPB do que para a estação rifb. A estação IGPB possui diferenças no procedimento de instalação em relação à estação rifb, pois seus sensores não foram enterrados, deixando-a mais sensível a ruídos ambientais. Isto poderia explicar a maior variação média dos resíduos relativos da fase P para a estação IGPB, embora a variação da PKPdf seja pequena.

FIGURA 3.20 — Comparação da média dos resíduos relativos pelo *back azimuth*, entre as estações IGPB (UnB; Igarapava - MG; Lat. -20,0000 e Long. -47,7100) e rifb (BLSP; Rifaina - SP; Lat. -20,0737 e Long. -47,5019).

FIGURA 3.21 — Fases P e PKPdf chegando a uma estação sísmica qualquer, dando uma idéia da diferença entre os ângulos de incidência destas fases em relação à reta normal.

A Figura 3.22 compara os resíduos das estações pacb e popb, distanciadas de 188 km .

Observamos o mesmo comportamento descrito no caso anterior, porém a estação popb possui um ligeiro aumento dos rms médios dos resíduos para as fases PKP, o que pode ser explicado como erros de leitura das chegadas devido a ruídos causados por problemas nesta estação.

Foram feitas comparações dos resíduos para três estações na borda do Cráton do São Francisco. A Figura 3.23 mostra a comparação entre as estações bamb, frmb e furb. Estas estações encontram-se distanciadas entre si da seguinte forma:

Podemos observar uma boa correlação entre os dados destas estações, mesmo a estação bamb não tendo funcionado simultaneamente com as outras duas. Os dados de furb e frmb têm uma distribuição mais coerente. Estas duas estações operaram juntas em 1993. A estação bamb é mais recente e pode estar registrando eventos de distâncias diferentes, o que ajudaria a explicar a correlação inferior com o padrão das outras duas. Esta estação tem uma tendência a ser ruidosa, já que foi instalada próximo a uma estrada. Isto pode ocasionar dificuldades na visualização das chegadas e consequentemente erros nas leituras, explicando o ligeiro aumento dos erros médios para esta estação.

FIGURA 3.22 — Comparação da média dos resíduos relativos pelo *back azimuth*, entre as estações pacb (BLSP; Pacaembú - SP; Lat. -21.6074 e Long. -51.2618) e popb (BLSP; Porto Primavera - PR; Lat. -22,4564 e Long. -52,8367).

Outro teste foi feito para as estações localizadas na região de Iporá, onde foi inferida uma grande anomalia de baixa velocidade por Escalante (2002). A Figura 3.24 mostra a comparação entre os resíduos relativos para as estações gns (gnsa e gnsb), paz (paz4 e pazb) e slmb. Estas estações estão distanciadas da seguinte maneira:

A distribuição dos dados das três estações é diferente, especialmente para a fase P. Para a fase PKP há uma ligeira correlação. Apenas para a direção 270^0 a 330^0 , as três estações mostram resíduos relativos parecidos. Para outras direções os comportamentos são distintos. Os raios vindos das direções entre 270^0 e 330^0 são originados nas regiões andinas, onde existe uma grande quantidade de eventos.

FIGURA 3.23 — Comparação da média dos resíduos relativos pelo *back azimuth*, entre as estações bamb (BLSP; Bambuí- MG; Lat. -20.0398 e Long. -46.0308), frmb (BLSP; Formiga - MG; Lat. -20.4876 e Long. -45.6389) e furb (BLSP; Furnas - MG; Lat. -20.6782 e Long. -46.2779).

FIGURA 3.24 — Comparação da média dos resíduos relativos pelo *back azimuth*, entre as estações gns - gnsa/gnsb (BLSP; Goianésia - GO; Lat. -15.2644 e Long. -15.2644), paz - paz4/pazb (BLSP; Araguapaz - GO; Lat. -15.1369 e Long. -50.8634) e slmb (BLSP; São Luis dos Montes Belos - GO; Lat. -16.5705 e Long. -50.3455).

A Figura 3.25 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 (BDFB-0), com dados processados por Escalante (2002) e neste trabalho.

Na Figura 3.25 observa-se que para as fases PKPdf do período BDFB-0 o desvio padrão médio dos resíduos é muito maior do que para o período BDFB-9, o que pode ser explicado também por problemas durante a leitura das chegadas. Os maiores desvios padrão BDFB-0 sugerem que pode ter ocorrido mais erros de leitura dos sismogramas durante este período do que para BDFB-9. Alternativamente a maior dispersão pode ser devido ao maior número médio de estações no período mais recente. De qualquer maneira o padrão é bastante parecido para os dois períodos. Para a fase P, observa-se média próximo de zero até 180° , negativa para SW e positiva para NW.

Testes desta natureza ajudam não só a observar possíveis problemas com as estações, mas ainda inconsistências na determinação dos tempos relativos.

FIGURA 3.25 — Comparação dos resíduos relativos para dois períodos de operação da estação BDFB (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 2000-2002 .

CAPÍTULO 4

INVERSÃO DOS DADOS

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos sobre a teoria da inversão. Serão mostradas as principais características do método utilizado neste trabalho, como os critérios de minimização da função objetivo e da linearização do problema inverso. Também serão discutidos alguns detalhes acerca da grade do modelo e da técnica utilizada para sua parametrização. Ainda serão mostrados alguns exemplos para ilustrar a evolução da minimização durante a inversão dos dados e as diferenças entre os resultados com diferentes graus de regularização.

4.1 LINEARIZAÇÃO

O tempo de percurso t de raio sísmico entre uma fonte sísmica e um receptor ao longo do caminho L , para um campo contínuo de velocidade $v(x, z)$, é dado por:

$$t = \int_L \frac{1}{v(x, z)} dl \quad (4.1)$$

Esta integral pode ser calculada de forma aproximada computacionalmente e sua forma discreta é:

$$t_i = \sum_{j=1}^m \frac{L_{ij}}{v_j} ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

onde L_{ij} é o percurso do raio i na célula de velocidade v_j . Nota-se que o tempo de percurso na Equação 4.2 é inversamente proporcional à velocidade v , sendo então esta uma relação não-linear.

Para converter a Equação 4.2 para forma linear $\mathbf{d}=\mathbf{Gm}$, podemos definir o modelo de parâmetros como sendo $s_j = 1/v_j$, onde s_j representa a vagarosidade das ondas sísmicas.

Assim a Equação 4.2 é linearizada e toma a seguinte forma:

$$t_i = \sum_{j=1}^m L_{ij} s_j \quad (4.3)$$

Neste caso, o campo de vagarosidade s_j está representado como um conjunto de parâmetros discretos.

4.2 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO

Nosso modelo é feito com uma grade de 36 nós em profundidade, 64 em longitude e 56 em latitude, e vai até uma profundidade máxima de 1600 km, possuindo 129.024 parâmetros (nós). A velocidade varia uniformemente e é interpolada entre os pontos da grade por *splines sob tensão* (Cline 1981), de acordo com o procedimento descrito por Escalante (2002).

Nas Figuras 4.1 e 4.2, estão mostrados os limites do modelo e os espaçamentos dos nós. O volume central marcado pelas linhas amarelas representa a região com maior resolução da malha. Nesta região, o espaçamento entre os nós é de aproximadamente 33,3 km em profundidade e de 1/3 de grau em latitude e longitude. Os diferentes espaçamentos mostrados na Figura 4.1 são utilizados para diminuir a influência de estruturas fora do volume estudado.

FIGURA 4.1 — Limites e espaçamentos horizontais entre os nós do modelo.

FIGURA 4.2 — Parametrização do modelo utilizado na inversão dos dados. Os quadrados brancos representam as estações utilizadas (inclusive as novas estações incluídas neste trabalho - Apêndice A). O volume marcado pelas linhas amarelas é a região com melhor resolução da grade.

4.3 FORMULAÇÃO DA INVERSÃO

Segundo Menke (1984), o objetivo da teoria da inversão é fazer inferências sobre as propriedades físicas de um modelo a partir de dados observados. Para isso é necessário relacionar os parâmetros do modelo aos dados através de um modelo matemático (modelo teórico).

O uso dos parâmetros físicos e de um modelo teórico, no contexto da teoria da inversão, para a predição de dados é conhecido como problema direto. Já o cômputo dos parâmetros usando as observações e o modelo teórico é chamado de problema inverso. A Figura 4.1 mostra um esquema básico sobre estes dois problemas.

FIGURA 4.3 — Representação esquemática dos tipos de problemas descritos pela teoria da inversão (Menke 1984).

Estes problemas podem ser lineares ou não. Os problemas lineares podem ser representados pela equação abaixo (Menke 1984).

$$\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (4.4)$$

Na Equação 4.4, $\mathbf{d}$ é um vetor de comprimento N que representa as medidas (dados) feitas em um determinado experimento, e o vetor $\mathbf{m}$ tem comprimento M e representa os parâmetros do modelo. A matriz $\mathbf{G}$ é chamada matriz Kernel ou matriz de Sensibilidade, e descreve o mapeamento que relaciona $\mathbf{m}$ e $\mathbf{d}$.

O problema direto consiste em calcular $\mathbf{d}$ quando $\mathbf{m}$ e $\mathbf{G}$ são conhecidos. O problema inverso, por sua vez, consiste em calcular $\mathbf{m}$, dados $\mathbf{G}$ e $\mathbf{d}$.

Considerando que as incertezas dos dados possuam distribuições Gaussianas, o estimador do

modelo mais provável será o que minimize a função objetivo ϕ (Menke 1984).

$$\phi = (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}) \quad (4.5)$$

Utilizando os *mínimos quadrados* (Equação 4.6), podemos realizar a minimização de ϕ (Menke 1984).

$$\mathbf{m}^{\text{est}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (4.6)$$

Como temos 129.024 parâmetros do modelo e apenas 10.732 tempos de percurso, nosso problema é sub-determinado (mal posto), pois existem muito mais parâmetros do que dados. Isto provoca instabilidade na inversão, gerando a não-unicidade dos resultados. Desta forma a inversão deve ser regularizada utilizando vínculos que aumentem a sua estabilidade (Marquardt, 1963 e Lawson & Hanson, 1974), não necessitando de uma sub-parametrização¹.

A inversão Occam, descrita por Constable (1987), representa conceitualmente o vínculo mais importante e mais significativo de nossa regularização. Este princípio busca o modelo com o mínimo de estrutura (mais simples) para explicar os dados, considerando um erro padrão definido. Normalmente na regularização estes vínculos podem ser baseados na Física do problema ou em considerações geológicas (Meju 1994).

Como exemplo, podemos minimizar as diferenças entre os parâmetros adjacentes $(m_1 - m_2)$, $(m_2 - m_3)$, ... , $(m_{p-1} - m_p)$, ou seja, fazer a minimização da 1ª derivada do modelo. Estas diferenças podem ser mostradas da forma $\mathbf{D}\mathbf{m} = \mathbf{h}$, ou ainda,

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ & 1 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{p-1} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{D} \quad \mathbf{m} \quad = \quad \mathbf{h}$$

onde $\mathbf{D}$ é o operador diferença conhecido como matrix suavidade, e $\mathbf{D}\mathbf{m}$ é a suavidade de primeira ordem (*flatness*) do vetor solução $\mathbf{m}$. Para medir a suavidade de nossa solução, usamos

¹Diminuição da quantidades de parâmetros de um modelo buscando sua estabilidade

a medida quadrática dada por:

$$\mathbf{h}^T \mathbf{h} = \mathbf{m}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{m} \quad (4.8)$$

E assim adicionando o termo de suavidade na função objetivo (Equação 4.5) temos:

$$\phi = (\mathbf{G} \mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G} \mathbf{m} - \mathbf{d}) + \beta^2 \mathbf{m}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{m} \quad (4.9)$$

onde β define o grau de suavização de primeira ordem do vetor $\mathbf{m}$. Com a adição do termo de regularização, a equação 4.6 torna-se:

$$\mathbf{m}^{\text{est}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \beta^2 \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (4.10)$$

Embora a regularização traga estabilidade ao problema, em contrapartida existirá uma perda de resolução, e nos resultados, apenas estruturas de larga escala serão robustas. Quanto maior β , maior a perda de resolução.

Como o cálculo da matriz inversa da Equação 4.10 é computacionalmente difícil, dado o seu tamanho e esparsidade, é mais eficiente minimizar a função objetivo (Equação 4.9) pelo método dos Gradientes Conjugados (e.g. LSQR - *Reweighted Least Squares* - Paige & Saunders, 1982). Utilizamos o método de gradientes conjugados conforme descrito em Escalante (2002). Neste método as iterações são calculadas recursivamente com armazenamento em memória apenas da última iteração anterior sem a necessidade das outras, o que diminui muito o tempo computacional. Para todas as inversões, foram executadas 2000 iterações do procedimento dos gradientes conjugados.

Para inversão do modelo são usados pesos menores nas equações que têm resíduos maiores que 1,5 vezes o desvio padrão (σ) do ajuste. Isto é feito de forma iterativa, com a inversão sendo recalculada por várias iterações (até 20 ou 30) com pesos dados conforme os resíduos do ajuste anterior, exceto na primeira iteração (Hubert 1981). Assim os resultados foram conduzidos

para soluções com minimização por norma L_2 (média) para os dados com erros menores que $1,5\sigma$, e por norma L_1 (mediana) para dados com desvios maiores (Schimmel *et al.* 2003). Este procedimento é bem descrito em Pulliam *et al.* (1993).

O problema real (VanDecar *et al.* 1995) é mais complexo que o da Equação 4.1, pois inclui regularização pela segunda derivada e correções de estação e epicentro.

4.4 CONSISTÊNCIA DA INVERSÃO

No Capítulo 3, foram mostradas algumas análises estatísticas feitas antes da inversão, buscando observar a consistência na base de dados. Aqui será mostrada a influência da presença de dados com erro (inconsistências), sobre os resultados da inversão.

Observamos que existem oscilações da amplitude das anomalias nos resultados tomográficos, de uma iteração para outra, quando invertemos dados inconsistentes. A Figura 4.4 mostra um exemplo destas oscilações, e ainda a comparação dos resultados entre as inversões da base de dados com erro, e da base de dados depurada (base final). Nas Figuras 4.4a, 4.4c e 4.4e (base com erros) observam-se oscilações na região de Iporá, onde ocorre uma mudança brusca de intensidade (aumento de 28 para 29 e diminuição de 29 para 30) da anomalia de baixa velocidade proposta por Escalante (2002). Observamos ainda oscilações em outras regiões, como na Bacia do Paraná (anomalias de alta e baixa velocidade).

As Figuras 4.4b, 4.4d e 4.4f mostram a sequência de imagens geradas para as iterações 28, 29 e 30 respectivamente, resultantes da inversão da base final. Nesta sequência observamos a suavização gradual da iteração 28 para a 30. Isto se deve ao seguinte processo. Resíduos grandes geralmente produzem anomalias fortes no modelo (mais estrutura). Ao se diminuir o peso dos dados com resíduos altos, a regularização consegue impor uma maior suavidade no modelo (menos estrutura), ou seja a suavização passa a ter importância relativamente maior, uma vez que o ajuste tem peso menor.

A Figura 4.5 mostra as curvas do ajuste do rms pelas iterações para as inversões da base de dados com erros (triângulos azuis) e da base final (triângulos vermelhos). Observamos que o ajuste a partir da iteração 14 não se torna tão significativo, o que significa que as imagens tomográficas, a partir desta iteração, não deveriam possuir grandes diferenças. Acreditamos que os dados inconsistentes, provavelmente gerados por problemas durante o processo de marcação das chegadas (Capítulo 2) ou por problemas na correção de tempo das estações (problemas no GPS) sejam responsáveis pela instabilidade durante a inversão.

Nesta figura observamos ainda que o rms do ajuste diminui muito rapidamente para os dados depurados em relação aos não depurados, mostrando a necessidade das análises feitas no Capítulo 3 para obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

FIGURA 4.4 — Comparação entre as imagens tomográficas geradas pela inversão da base contendo dados com erros (Figuras a, c e e), e da base final depurada (Figuras b, d e f). As iterações referem-se ao processo de diminuição dos pesos para resíduos grandes.

FIGURA 4.5 — Curvas de rms para as iterações com pesos decrescentes (*down-weighting*) da base de dados total (com erros) e da base final (depurada). Foram utilizados os valores de 90000 e 2800 para suavidade e *flatness* respectivamente.

4.5 TESTES DE CONVERGÊNCIA E REGULARIZAÇÃO

Foram feitos alguns testes para observar os efeitos de diferentes valores para os vínculos de regularização. Na Figura 4.6 são mostradas imagens tomográficas resultantes das inversões da base final (depurada) para as iterações 10, 20 e 30 a uma profundidade de 200 km, com dois valores de regularização.

Nas Figuras 4.6b, 4.6d e 4.6f foram utilizados os valores de 90000 para suavidade e 2800 para *flatness*² sugeridos em estudos anteriores. Nas Figuras 4.6a, 4.6c e 4.6e, os valores foram praticamente duplicados (suavidade - 200000 e *flatness* - 5000). As imagens mostram os efeitos da diminuição dos pesos dos resíduos maiores. Com o aumento do número de iterações, os resultados tornaram-se mais suaves, como era esperado.

Podemos observar pela comparação destas imagens que nas regiões onde existe uma maior densidade de estações, não ocorrem diferenças significativas de suavidade entre os resultados, o que sugere que não são necessárias muitas iterações de *down-weighting*. Para regiões com menos estações as diferenças são maiores, no entanto as anomalias mais robustas se mantêm. Nestas regiões, para dar uma maior confiança às estruturas anômalas, seria interessante ter mais estações para uma maior cobertura de dados.

A Figura 4.7 mostra as curvas de minimização para estes dois modelos. Nota-se que o rms do ajuste aumenta sutilmente para o modelo com maior suavidade em relação ao de menor. Esse aumento reflete o maior “esforço” do algoritmo da inversão para suavizar mais o modelo, sob a pena de aumento do desvio padrão do ajuste.

²Suavização de 1ª ordem (planificação)

FIGURA 4.6 — Comparação entre as imagens tomográficas com diferentes valores para os parâmetros de regularização. Para a), c) e e) o valor de suavidade foi 200000 e o de *flatness* 5000. Para b), d) e f) a suavidade foi 90000 e o *flatness* 2800.

Consideramos que as duas curvas possuem o mesmo comportamento, ou seja, os dois modelos podem ser usados para as interpretações dos resultados.

FIGURA 4.7 — Curvas de rms para iterações de *down-weighting* na inversão da base de dados final com dois valores de regularização. Na curva com triângulos vermelhos, os valores de suavidade e *flatness* foram 90000 e 2800 respectivamente, já na curva com triângulos azuis, estes valores dobraram (suavidade - 200000 e *flatness* - 5000)

FIGURA 4.8 — Modelos com diferentes valores para os parâmetros de regularização e com mesmo ajuste (rms) para os dados ($\sigma = 0,035s$). a) Suavidade 90000 e *flatness* 2800. b) Suavidade 200000 e *flatness* 5000.

Na Figura 4.8 estão dois modelos gerados para 200 km de profundidade com valores de regularização diferentes, que explicam os dados com um mesmo ajuste (rms = 0,035 s). Na Figura 4.8a a imagem foi gerada na 14ª iteração com valores de 90000 e 2800 para suavidade e *flatness* respectivamente. A Figura 4.8b foi gerada com suavidade de 200000 e *flatness* de 5000

na iteração 18. As maiores diferenças entre elas se concentram nas regiões com menos estações.

Estas figuras representam um exemplo do comportamento observado nas curvas de ajuste da Figura 4.7, onde inversões com maiores valores de regularização necessitam de mais iterações para diminuição dos pesos (*down-weighting*) para ajustar os dados com mesmo rms. No entanto, as inversões com menores valores de regularização (menos suaves) introduzem mais estruturas para explicar os dados, levando os resultados para soluções mais complexas, contrariando o conceito da Inversão Occam³. Desta forma, as imagens tomográficas que serão utilizadas durante a interpretação (Capítulo 5), terão como valores de regularização 200000 para suavidade e 5000 para *flatness*. Utilizaremos, com base na Figura 4.7, imagens geradas a partir dos resultados da iteração 16.

A Figura 4.9 mostra a distribuição dos ângulos de incidência dos raios em função do azimuth da estação ao evento, a uma profundidade de 400 km. Cada ponto indica um raio, onde os círculos pretos indicam fases P e os vermelhos indicam as fases PKPdf. A linha sólida preta mostra o rms dos dados totais antes de se iniciar a modelagem final ($\sigma = 0,412s$), as demais mostram o rms do ajuste para as iterações 02, 03, 16 e 20.

Como na Figura 4.7, observamos na figura 4.9 que a variação do rms durante o ajuste é maior nas primeiras iterações, e pouco significativa durante as últimas iterações. Os modelos explicam em torno de 88,5% da variação dos dados (0,412 para 0,047 na iteração 16).

FIGURA 4.9 — Distribuição dos ângulos de incidência dos raios a 400 km de profundidade como função dos *back azimuths*, e o erro do ajuste para o conjunto de dados de ondas P.

³Inversão Occam - Mínimo de estrutura para explicar os dados (Constable *et al.* 1987)

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os resultados das inversões tomográficas na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, através de seções horizontais para várias profundidades e também por perfis verticais. Serão mostradas também inversões retirando algumas estações localizadas em zonas de anomalias mais pronunciadas, para mostrar a importância de cada estação na determinação das anomalias, bem como observar se estas são robustas.

5.1 RESULTADOS FINAIS

Nossos resultados são reconstruções tomográficas geradas pela inversão com dados de 1992 a 2002, mostrados por seções horizontais para várias profundidades, e perfis verticais dispostos de acordo com as regiões de maior interesse.

A partir de um modelo médio de velocidade (IASP91), como no exemplo da Figura 5.1, as anomalias serão determinadas nas figuras pela diferença de cores (tons tendendo ao azul para zonas de maior velocidade, e tendendo para o vermelho para zonas de menor velocidade com relação ao modelo médio). Nas imagens, regiões com densidades de raio menores que 20 raios por cada milhão de quilômetros cúbicos são mostradas em preto. As anomalias mostradas representam heterogeneidades laterais do modelo.

Para os perfis verticais, devido a pouca resolução¹, os primeiros 50 km foram ocultados. Nas seções horizontais, os quadrados brancos e os círculos amarelos (Figura 5.2 e 5.3) representam, respectivamente, as estações utilizadas e a localização de intrusões alcalinas do magmatismo ocorrido entre 90 e 55 Ma. A Figura 5.1 mostra uma seção horizontal a uma profundidade de 200 km como o resultado da tomografia sísmica para nossa área de estudo, caso esta não possuísse heterogeneidades.

De acordo com os resultados obtidos por Escalante (2002), observa-se para menores profun-

¹pouco cruzamento de raios por nó

didades (150 e 200 km) que existe uma correlação entre a distribuição das anomalias de baixa velocidade na região de estudo e a localização das intrusões alcalinas do Cretáceo Superior. Em nossos resultados (Figuras 5.2 e 5.3), observamos que este mesmo comportamento permanece para as anomalias de baixa velocidade, reafirmando a possibilidade de que estas indicariam anomalias de alta temperatura na região das alcalinas, originadas na litosfera sub-continental mais afinada (Gibson *et al.* 1999).

A anomalia de baixa velocidade sob a Bacia do Paraná, interpretada por VanDecar *et al.* (1995) e Schimmel *et al.* (2003) como sendo o resto fóssil da pluma de Tristan da Cunha, em nossos resultados pode ser notada a partir de aproximadamente 250 km de profundidade (Figura 5.3) chegando a profundidade máxima de 1000 km. Comparados aos resultados de Escalante (2002) podemos observar uma melhor delimitação vertical desta anomalia em nossos resultados.

As imagens de Escalante (2002) relacionadas a esta anomalia mostram uma leve separação desta em duas partes mais intensas. Na Figura 5.13 esta anomalia aparece de forma mais compacta nas partes mais rasas, porém, podemos ver pelas Figuras 5.7, 5.8 e 5.19 que em regiões mais profundas (a partir de 700 km) esta anomalia agrega-se a outra anomalia de baixa velocidade espalhada pela região sudeste da área.

Esta outra anomalia aparece em todos os resultados, principalmente nas profundidades superiores a 300 km (Figuras 5.4 - 5.10). Testes feitos por Escalante (2002) mostraram que esta anomalia é um artifício gerado durante o processo de inversão. Desta maneira, a anomalia de baixa velocidade relacionada à pluma de Tristan da Cunha não pode ser completamente definida em maiores profundidades.

Um dos principais resultados obtidos por Escalante (2002) é a definição de uma anomalia de baixa velocidade muito intensa sob a região de Iporá em Goiás. Segundo ele, esta anomalia estaria se correlacionando muito bem ao impacto inicial da pluma de Trindade como proposto por Gibson *et al.* (1997). Segundo Thompson *et al.* (1998), o impacto desta pluma em ~ 80 Ma teve como centro a atual Província Ígnea de Iporá atingindo uma área com raio de aproximadamente 500 km. Nossos resultados confirmam a presença da anomalia de Iporá em Goiás (Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.11, 5.17 e 5.21), mostrando que esta é robusta.

As Figuras 5.11, 5.17 e 5.21 mostram perfis cortando a anomalia de Iporá. Nos perfis A-A' e D-D' observamos um prolongamento desta anomalia em profundidade para a direção noroeste, causado pela grande quantidade de chegadas vindas do NW da América do Sul e América Central (Figuras 5.12 e 5.18). Comparando estes resultados com os de Escalante (2002), observamos que houve uma diminuição significativa do prolongamento desta anomalia, o que acreditamos ser devido a uma melhor distribuição azimutal dos eventos registrados na rede de estações (principalmente nas estações sobre esta região).

Observamos a oeste da anomalia de Iporá (região sul do Estado de Mato Grosso) uma tendência de baixa velocidade, que sugere que esta região possa ser uma continuidade do processo de magmatismo do Cretáceo Superior, com mais estruturas relacionadas ao efeito inicial da pluma de Trindade em regiões de litosfera mais finas. Estas anomalias se correlacionam muito bem com a localização das intrusões alcalinas da Província Ígnea de Poxoréu, como nas demais regiões com anomalias de baixa velocidade. A Figura 5.21 mostra o perfil F-F' cortando as Províncias Ígneas de Iporá e Poxoréu e as regiões anômalas de baixa velocidade. Para a região da Província de Poxoréu, faltam dados para melhorar a resolução das anomalias. A cobertura de estações nesta região é baixa e as estações existentes (MAN1, MAN2 e pp1b) possuem poucos dados. Não é possível afirmar que exista uma boa robustez das anomalias, sendo observada uma certa instabilidade que discutiremos mais adiante.

Ao norte da anomalia de Iporá (Figura 5.3), observamos uma outra anomalia de baixa velocidade, que aparece espalhada por toda região de Goiás, sem a presença de intrusões alcalinas mapeadas na região. Isto sugere que de um modo geral toda esta região possui uma tendência de baixas velocidade, não necessariamente ligadas às alcalinas. Esta tendência é observada nos testes de inversão discutidos.

Outra anomalia significativa de baixa velocidade (Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.15) encontra-se na região sudeste da Bacia do Paraná. Esta anomalia é correlacionada com as intrusões alcalinas localizadas no Arco de Ponta Grossa mostrando definitivamente a ótima correlação entre as anomalias de baixa velocidade nas regiões mais rasas encontradas nas reconstruções tomográficas e as intrusões alcalinas datadas de 90 a 55 Ma.

Para anomalias de alta velocidade, observamos primeiramente o Cráton do São Francisco na Figura 5.2 muito bem delimitado horizontalmente a uma profundidade de 150 km. Esta anomalia também é observada para profundidade de 200 km (Figura 5.3). Nos perfis mostrados nas Figuras 5.11 e 5.13 (Perfil A-A' e B-B') observamos a raiz do Cráton do São Francisco a uma profundidade de aproximadamente 250 km.

Sob a Bacia do Paraná, diferente dos resultados de Escalante (2002), observamos uma diminuição da intensidade da anomalia de alta velocidade na Figura 5.2 (150 km) presente nesta região. Para uma profundidade maior (300 km) no entanto, a diferença entre os resultados não é tão significativa. Segundo Schimmel *et al.* (2003) e Escalante (2002) esta anomalia poderia ser um indicativo do núcleo cratônico da Bacia do Paraná inferido por Cordani *et al.* (1984) e Brito Neves *et al.* (1984) nesta região. Esta anomalia pode ser observada ainda no perfil B-B' (Figura 5.13) chegando a uma profundidade de 250 km aproximadamente.

Uma outra anomalia de alta velocidade localizada no centro da Bacia do Paraná relacionada

a subducção da Placa de Nazca (Escalante 2002) está mostrada nas Figuras 5.5-5.10 e 5.13. Com base na Figura 5.13 observamos, diferente dos resultados de Escalante (2002), que a anomalia relacionada à litosfera subduzida de Nazca aparece como segmentos separados à esquerda da anomalia relacionada a pluma de Tristan da Cunha. A forma desta anomalia nestes resultados aproxima-se mais à encontrada nos resultados de Schimmel *et al.* (2003). De qualquer maneira esta anomalia é bem representativa da feição esperada para a litosfera subduzida da Placa de Nazca.

As Figuras 5.12, 5.14, 5.16, 5.18, 5.20 e 5.22 mostram a densidade de raios por células indicando as regiões com a maior quantidade de raios e principalmente onde ocorrem maior número de cruzamentos destes raios. Alguns autores (Spakman, 1988; Spakman & Nolet, 1988; Sambridge, 1990) usam a densidade de raios para estimar as regiões de maior resolução.

Temos que, quanto menos uniforme for a distribuição da densidade de raios, menos resolvidas serão as estruturas de velocidade. Assim, com base nestas figuras, verificamos que nossa distribuição de raios é muito variada, e que a região de maior resolução (maior número de raios cruzados) se mostra normalmente no centro do volume estudado (Figura 4.2). Existe uma super amostragem de raios que vêm do noroeste, devido à grande quantidade de eventos desta direção. Entre as principais consequências desta super amostragem, verificamos prolongamentos de algumas anomalias nesta direção (Figura 5.11).

FIGURA 5.1 — Imagem tomográfica a uma profundidade de 200 km para um modelo de Terra, homogêneo e isotrópico.

FIGURA 5.2 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 150 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades. Os círculos amarelos representam as intrusões alcalinas do Cretáceo Superior, os quadrados brancos são estações da rede e as linhas brancas perfis verticais.

FIGURA 5.3 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 200 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.4 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 300 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades. Os quadrados brancos são estações da rede e as linhas brancas perfis verticais.

FIGURA 5.5 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 400 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.6 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 500 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.7 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 700 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.8 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 900 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.9 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 1100 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.10 — Imagem tomográfica horizontal a uma profundidade de 1300 km, mostrando anomalias de alta e baixa velocidade em relação ao modelo médio de velocidades.

FIGURA 5.11 — Perfil vertical A-A' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente a anomalia de baixa velocidade de Iporá.

FIGURA 5.12 — Perfil vertical A-A' mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

FIGURA 5.13 — Perfil vertical B-B' destacando no centro a anomalia de baixa velocidade atribuída à pluma de Tristan da Cunha de acordo com Schimmel *et al.* (2003) e VanDecar *et al.* (1995). A placa de Nazca aparece a esquerda da anomalia de Tristan da Cunha como segmentos de alta velocidade separados.

FIGURA 5.14 — Perfil vertical B-B' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

FIGURA 5.15 — Perfil vertical C-C' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente anomalias de baixa velocidade relacionadas a intrusões alcalinas datadas de 90-55 Ma.

FIGURA 5.16 — Perfil vertical C-C' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

FIGURA 5.17 — Perfil vertical D-D' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente as anomalias de baixa velocidade de Iporá e de alta velocidade relacionada à parte sul da Faixa Brasília (Escalante 2002).

FIGURA 5.18 — Perfil vertical D-D' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

FIGURA 5.19 — Perfil vertical E-E' até uma profundidade de 1400 km mostrando principalmente a junção da anomalia de baixa velocidade atribuída à pluma de Tristan da Cunha com uma anomalia (baixa velocidade) espúria (Escalante 2002) a partir dos 500 km.

FIGURA 5.20 — Perfil vertical E-E' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

FIGURA 5.21 — Perfil vertical F-F' até uma profundidade de 1400 km destacando principalmente a anomalia de baixa velocidade de Iporá e a tendência de baixa velocidade da região da Província Ígnea de Poxoréu em Mato Grosso.

FIGURA 5.22 — Perfil vertical F-F' até uma profundidade de 1400 km mostrando a distribuição da densidade dos raios (em log10) por célula.

5.2 RESULTADOS RETIRANDO ESTAÇÕES

A retirada sistemática dos dados de uma ou mais estações localizadas em regiões específicas, permite a observação da dependência das anomalias presentes, em relação às estações retiradas. Alguns testes foram feitos para estimar este tipo de dependência em algumas regiões de interesse.

A Figura 5.23 (e a Figura 5.24d) mostra a imagem de uma inversão (smoothness 90000 e flatness 2800) realizada para todos os dados (Figura 5.23a) e ainda inversões com retirada das estações localizadas nas Províncias Ígneas de Iporá e Poxoréu (Figuras 5.23a, 5.23b, 5.23c, 5.23d, 5.23e e 5.23f). As Figuras 5.23 e 5.24 mostram seções horizontais a profundidades de 200 km.

As Figuras 5.23b, 5.23d, 5.23f mostram as inversões retirando as estações argb, pazb² e slmb. Estas estações localizam-se sobre a anomalia de baixa velocidade da Província Ígnea de Iporá em Goiás. Observamos que esta anomalia sofreu uma mudança de intensidade muito grande com a retirada da estação slmb (Figura 5.23f). Acreditamos que isso se deve à grande influência dos raios vindos de noroeste da rede, já que a estação slmb localiza-se no lado oposto ao das estações argb e pazb na direção NW-SE com relação a anomalia. De uma forma geral, mesmo com a retirada da estação slmb, a região da anomalia apresenta uma tendência (menos intensa) para baixas velocidades.

A anomalia de alta velocidade localizada ao sul de Goiás perde intensidade quando se retira slmb (Figura 5.23a). No entanto não existe uma mudança significativa em sua forma. Esta anomalia é robusta, pois com a retirada de outras estações não ocorrem grandes mudanças de sua forma e feição. Ainda não existe uma explicação geológica para ela.

Nas Figuras 5.23c, 5.23e e 5.24d, observa-se as imagens tomográficas para as inversões retirando as estações de Manso (MAN1 e MAN2), a estação pp1b, e retirando somente a estação MAN2 respectivamente, as quais estão localizadas na Província Ígnea de Poxoréu (PIP). É evidente nestas figuras que a maior intensidade da anomalia de baixa velocidade desta região se deve à estação MAN2 (Figura 5.24d). Sem esta estação esta anomalia fica pouco expressiva. A estação MAN2 possui um rms dos dados muito alto (Capítulo 3), de aproximadamente 1,5 vezes maior que o desvio da base total. Desta forma, para uma melhor definição e confiança na anomalia de baixa velocidade em PIP, seriam necessários mais dados, ou ainda uma maior cobertura de estações. As outras anomalias próximas das regiões de Iporá e Poxoréu não sofrem grandes alterações.

A Figura 5.24 mostra os resultados das inversões retirando as estações UnB (Figura 5.24b), estações RESUSP e RSBC (Figura 5.24f), estações rsta e rstb³ localizadas no Arco de Ponta Grossa (Figura 5.23) e canb, localizada na região sudeste da Bacia do Paraná (Figura 5.24c).

²A estação pazb (banda larga) está na mesma posição onde operou estação paz4 (período curto).

³As estações rstb (banda larga) e rsta (período curto) operaram na mesma posição.

FIGURA 5.23 — Comparação entre as imagens tomográficas geradas para a) todos os dados, b) retirando argb, c) retirando as estações de Manso (1 e 2), d) retirando paz4 e pazb (mesma posição), e) retirando pp1b e f) retirando slmb.

FIGURA 5.24 — Comparação entre as imagens tomográficas geradas para a) todos os dados, b) retirando estações UnB, c) retirando canb, d) retirando MAN2, e) retirando rsta e rstb (mesma posição) e f) retirando estações RESUSP e RSBC.

Na Figura 5.24b observamos, com a retirada das estações da UnB (além do que já foi discutido para as estações MAN1, MAN2 e argb), apenas uma diminuição da intensidade e forma da anomalia de baixa velocidade da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP), sugerindo de uma forma geral, que em regiões com muitas estações próximas (muitos raios), a retirada de algumas não afeta de forma expressiva a anomalia. Para o caso da Figura 5.24b, a retirada das estações MIR1, NP4B e IGPB da região de APIP alteram sutilmente a forma e a magnitude das anomalias. Como existem mais estações nesta região, podemos considerar que as anomalias de baixa velocidade APIP possuem um caráter robusto.

A Figura 5.24c e 5.24e mostram a retirada, durante a inversão, das estações canb e rstb respectivamente. Observamos que a retirada de ambas estações diminuem a intensidade da anomalia de baixa velocidade próxima das intrusões alcalinas do Arco de Ponta Grossa. A retirada da estação rstb influencia muito mais esta anomalia, porém permanecendo a tendência de baixa velocidade na região. Acreditamos que a maior influência de rstb se deve à posição da estação em relação à anomalia. Esta estação encontra-se do lado oposto aos Andes tomando como referência o eixo norte-sul da anomalia. Isto reflete a influência da grande quantidade de eventos ocorridos nesta região. Como no caso de slmb, seria interessante a presença de mais estações próximas e na mesma situação de rstb.

A retirada das estações da rede RESUSP e da rede RSBC (Figura 5.24f) não influenciaram significativamente as anomalias na região onde estas estações estão localizadas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com o aumento da quantidade de raios e estações, foi possível melhorar a resolução das anomalias indicadas nos trabalhos anteriores na região de estudo. Também foi possível imagear novas regiões anômalas.

Com relação aos trabalhos anteriores, nossos resultados confirmaram todas as anomalias anteriormente reveladas. A anomalia de baixa velocidade sob a Bacia do Paraná, interpretada por VanDecar *et al.* (1995) como resto fóssil da pluma de Tristan da Cunha, foi observada a partir dos 250 km de profundidade, chegando até 1000 km. Na parte mais profunda (de 700 a 1000 km) não foi possível delimitar esta anomalia com precisão, mostrando desta forma, de acordo com Escalante (2002), que apenas em partes mais rasas ela pode ser bem definida. Em nossos resultados esta anomalia apareceu de forma mais compacta comparada com os resultados de Escalante (2002).

A correlação entre as intrusões alcalinas do Cretáceo Superior e as anomalias de baixa velocidade observadas anteriormente por Schimmel *et al.* (2003) e Escalante (2002) também foi observada, reafirmando que estas anomalias estariam relacionadas a regiões de alta temperatura e que as intrusões alcalinas teriam sua origem na parte inferior da litosfera.

O Cráton do São Francisco aparece bem delimitado para profundidades mais rasas (150 km), com suas raízes chegando até 250 km.

A anomalia de baixa velocidade sob a região de Iporá em Goiás (Escalante 2002), também apareceu em nossas imagens. A persistência desta anomalia indica-lhe um caráter robusto. No entanto, testes retirando estações nesta região mostraram a grande influência da estação slmb (São Luis de Montes Belos - GO) sobre sua intensidade. Concluímos que isso se deve à posição desta estação, que fica a sudeste da anomalia. Isto faz com que a estação registre a maior parte dos eventos que vêm do noroeste (Andes) e que atravessam a região anômala. De qualquer maneira mesmo sem a estação slmb, a região possui uma tendência para baixas velocidades.

Da mesma forma para a anomalia de baixa velocidade próxima das intrusões alcalinas do Arco de Ponta Grossa, observamos uma diminuição de intensidade com a retirada da estação

rstb (Adianópolis - PR). Acreditamos que isso ocorre pelo mesmo motivo descrito para slmb, já que a estação rstb está localizada a leste da anomalia. Para estudos tomográficos futuros, sugerimos a instalação de novas estações nestas duas regiões.

A anomalia de alta velocidade sob a Bacia do Paraná (profundidades rasas) interpretada inicialmente por Schimmel *et al.* (2003) como possível núcleo cratônico desta Bacia (Cordani *et al.* 1984) foi também observada. Em nossos resultados não foi observada nenhuma diferença significativa para esta anomalia em relação aos resultados anteriores.

Sob a Bacia do Paraná a profundidades maiores, interpretamos uma anomalia de alta velocidade como a litosfera subduzida da Placa de Nazca. Esta anomalia pode ser inferida até os 1300 km aproximadamente.

Com a inclusão dos dados das novas estações na parte sul do estado de Mato Grosso (MAN1, MAN2 e pp1b), foi observada uma nova anomalia de baixa velocidade. Devido à proximidade desta anomalia com as intrusões alcalinas da província ígnea de Poxoréu em Mato Grosso, ela pode ser explicada como uma continuidade do processo de magmatismo do Cretáceo Superior relacionado ao afinamento litosférico. Isto indica que nesta região podem existir mais estruturas relacionadas ao efeito inicial da pluma de Trindade. Porém a cobertura de estações é baixa, tendo as estações presentes poucos dados e um desvio padrão relativamente alto. Desta forma há a necessidade de instalação de mais estações nesta região para confirmar estas anomalias.

APÊNDICE A

NOVAS ESTAÇÕES

TABELA A.1 — Localização das novas estações incluídas na rede utilizada.

Estação Nome	Latitude Sul	Longitude Oeste	Elevação (Metros)	Localidade	Projeto
bamb	-20.0398	-46.0308	705	BambuÍ- SP	BLSP
cv1b	-13.8142	-47.3767	801	Cavalcante - GO	BLSP
itab	-27.3082	-52.3411	459	Ita-1 - RS	ETH/BLSP02
itpb	-15.9887	-39.6282	307	Itapebi - BA	ETH/BLSP02
MAN1	-14.8872	-55.8168	320	Hidroel. do Rio Manso - MT	UnB
MAN2	-15.0672	-55.6815	360	Hidroel. do Rio Manso - MT	UnB
novb	-28.6105	-49.5582	135	Nova Vaneza - SC	BLSP
pacb	-21.6074	-51.2618	341	Pacaembu - SP	BLSP
pdcb	-12.5306	-39.1238	220	Pedra do Cavalo - BA	ETH/BLSP
pp1b	-17.6009	-54.8797	370	Sonora - MS	BLSP
rcla	-22.4191	-47.5310	660	Rio Claro - SP	BLSP

APÊNDICE B

EVENTOS UTILIZADOS - 2002

TABELA B.1 — Novos eventos incluídos durante este trabalho na base de dados total.

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
01/01/2002	(001)	11:29:22.700	6.303	125.65	138	5.9	PKP
06/01/2002	(006)	18:49:22.700	12.538	-87.672	059	5.2	P
07/01/2002	(007)	13:26:26.400	18.957	144.96	599	5.7	PKP
12/01/2002	(012)	08:26:52.900	28.279	-69.566	010	5.7	P
14/01/2002	(014)	06:21:23.100	-0.994	-77.957	010	4.6	P
14/01/2002	(014)	11:05:53.801	-30.14	-111.85	010	5.0	P
14/01/2002	(014)	15:26:38.801	-55.547	-25.91	033	4.7	P
15/01/2002	(015)	14:41:28.101	11.67	-86.147	120	5.0	P
18/01/2002	(018)	22:43:33.700	11.296	-87.781	033	4.8	P
20/01/2002	(020)	10:17:19.600	-55.638	-30.061	033	4.7	P
20/01/2002	(020)	13:07:11.400	-45.923	34.891	010	5.2	P
21/01/2002	(021)	04:39:21.599	-1.776	29.041	010	4.9	P
21/01/2002	(021)	07:52:29.400	-41.465	-85.638	010	5.2	P
22/01/2002	(022)	04:53:52.600	35.79	26.617	088	6.1	P
22/01/2002	(022)	19:29:48.600	-5.572	-11.391	010	4.7	P
26/01/2002	(026)	22:03:27.300	-59.803	-26.42	033	4.8	P
28/01/2002	(028)	02:49:16.600	10.724	-85.052	010	5.3	P
03/02/2002	(034)	02:15:13.500	-0.045	-17.277	010	4.6	P
03/02/2002	(034)	07:11:28.400	38.573	31.271	005	5.7	P
03/02/2002	(034)	09:26:43.301	38.632	30.902	010	5.8	P
10/02/2002	(041)	01:47:06.200	-55.912	-29.004	193	5.6	P
11/02/2002	(042)	12:27:33.199	8.105	-39.153	010	4.9	P
12/02/2002	(043)	16:35:29.900	-59.778	-26.243	033	5.2	P
13/02/2002	(044)	18:16:57.600	-55.333	-29.254	033	4.8	P
14/02/2002	(045)	23:23:13.400	14.995	-92.638	075	5.3	P
15/02/2002	(046)	09:13:39.800	-60.541	-28.551	033	4.8	P
18/02/2002	(049)	07:14:11.999	51.608	16.148	005	5.2	P
19/02/2002	(050)	12:33:24.100	-56.741	-25.436	033	5.4	P
20/02/2002	(051)	15:53:23.900	-52.125	15.721	010	5.0	P
20/02/2002	(051)	19:07:17.100	-7.679	31.895	038	5.6	P
22/02/2002	(053)	19:32:41.699	32.319	-115.32	007	5.3	P
26/02/2002	(057)	11:54:27.601	16.471	-93.987	103	4.7	P
03/03/2002	(062)	07:16:15.600	-45.837	-76.119	010	5.3	P
03/03/2002	(062)	11:57:10.900	-45.718	-75.682	010	5.2	P
04/03/2002	(063)	20:21:22.801	28.446	143.27	045	5.5	PKP
05/03/2002	(064)	05:23:43.801	40.664	25.622	019	4.8	P
05/03/2002	(064)	17:07:42.301	-11.779	24.762	010	5.2	P
05/03/2002	(064)	21:16:09.101	6.033	124.25	031	6.3	PKP
05/03/2002	(064)	21:48:26.901	6.192	124.09	033	5.4	PKP

Tabela B.1 (Continuação)

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
07/03/2002	(066)	04:25:51.801	12.261	-88.225	071	4.6	P
07/03/2002	(066)	05:07:15.201	14.634	-91.411	118	4.7	P
07/03/2002	(066)	07:10:13.501	-1.319	-24.481	010	5.0	P
08/03/2002	(067)	18:27:53.100	5.871	124.27	023	5.6	PKP
09/03/2002	(068)	12:27:11.200	-56.019	-27.332	118	5.6	P
11/03/2002	(070)	01:46:20.601	30.599	141.57	033	5.9	PKP
11/03/2002	(070)	14:24:07.900	19.475	-64.355	033	4.8	P
11/03/2002	(070)	23:45:14.701	-44.536	-79.7	033	5.1	P
16/03/2002	(075)	21:52:30.301	9.025	-78.955	033	4.8	P
17/03/2002	(076)	09:00:59.600	12.567	-87.884	068	5.0	P
17/03/2002	(076)	12:09:30.601	2.669	-79.741	010	4.8	P
17/03/2002	(076)	19:33:33.701	-45.221	35.105	010	5.5	P
17/03/2002	(076)	20:22:09.601	-3.048	-79.671	069	5.2	P
18/03/2002	(077)	02:01:58.101	-8.616	-79.979	048	5.2	P
19/03/2002	(078)	22:08:46.700	-60.235	-28.346	161	5.0	P
20/03/2002	(079)	04:00:18.600	30.512	141.96	010	5.5	PKP
22/03/2002	(081)	17:36:59.201	4.585	126.32	076	5.4	PKP
23/03/2002	(082)	05:15:51.300	1.395	128.11	115	5.4	PKP
24/03/2002	(083)	12:11:48.301	-43.032	-82.697	010	5.1	P
24/03/2002	(083)	14:35:56.100	24.362	-46.355	010	5.1	P
26/03/2002	(085)	03:45:48.700	23.346	124.09	033	5.9	PKP
26/03/2002	(085)	04:22:10.501	-36.068	-102.87	010	4.9	P
27/03/2002	(086)	21:46:26.901	-35.673	-103.82	010	4.6	P
28/03/2002	(087)	05:48:25.900	22.638	-45.15	010	5.4	P
28/03/2002	(087)	05:50:38.100	22.603	-45.164	010	5.2	P
28/03/2002	(087)	16:38:42.901	14.769	-91.142	169	4.6	P
31/03/2002	(090)	06:52:50.401	24.279	122.18	032	6.3	PKP
31/03/2002	(090)	19:07:45.901	53.87	-35.374	010	5.0	P
31/03/2002	(090)	22:49:09.500	53.876	-35.366	010	5.1	P
31/03/2002	(090)	23:09:56.800	14.355	-92.593	062	5.1	P
01/04/2002	(091)	00:29:37.501	53.753	-35.353	010	4.8	P
01/04/2002	(091)	19:20:25.400	-58.652	-25.087	033	5.0	P
02/04/2002	(092)	17:09:58.101	-49.531	-116.07	010	5.0	P
03/04/2002	(093)	11:45:46.901	-7.108	-80.613	025	4.6	P
03/04/2002	(093)	14:08:57.601	-7.1	-80.553	028	4.8	P
07/04/2002	(097)	07:41:38.400	-1.352	-15.344	010	4.7	P
07/04/2002	(097)	18:17:36.701	19.614	-109.21	010	4.7	P
07/04/2002	(097)	18:34:37.801	19.687	-109.27	010	4.9	P
07/04/2002	(097)	20:19:23.000	19.704	-109.16	010	4.6	P
08/04/2002	(098)	05:08:27.601	19.539	-109.27	010	4.7	P
10/04/2002	(100)	00:13:43.200	-44.132	-15.993	010	5.2	P
10/04/2002	(100)	10:04:50.600	-44.176	-15.86	010	5.2	P
10/04/2002	(100)	12:17:33.100	-56.064	-27.489	103	4.7	P
10/04/2002	(100)	16:24:53.400	-44.152	-15.898	010	4.8	P
11/04/2002	(101)	02:19:14.101	19.299	-66.711	047	4.6	P
12/04/2002	(102)	18:09:44.901	-30.819	59.535	010	4.9	P
14/04/2002	(104)	04:05:23.901	7.316	126.66	033	5.4	PKP
14/04/2002	(104)	06:35:42.901	14.936	-45.134	010	4.8	P
15/04/2002	(105)	03:52:06.201	13.079	143.79	116	5.5	PKP
15/04/2002	(105)	05:08:56.000	-10.086	-79.761	033	4.8	P
15/04/2002	(105)	07:11:26.990	-60.009	-26.471	033	4.9	P
17/04/2002	(107)	06:42:54.301	39.7	16.843	005	4.8	P
18/04/2002	(108)	05:02:46.101	16.985	-100.86	024	5.4	P
18/04/2002	(108)	14:17:23.901	-60.657	-25.843	010	5.4	P
18/04/2002	(108)	17:57:27.701	17.233	-101.25	033	4.9	P
18/04/2002	(108)	18:00:40.700	17.037	-101.32	033	4.8	P
20/04/2002	(110)	10:50:47.500	44.513	-73.699	011	5.1	P
20/04/2002	(110)	18:50:44.200	-57.709	-25.325	033	4.6	P
21/04/2002	(111)	19:50:51.800	13.909	-92.041	055	4.6	P

Tabela B.1 (Continuação)

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
21/04/2002	(111)	22:24:07.990	-5.784	-81.033	033	5.0	P
24/04/2002	(114)	10:51:50.900	42.436	21.466	010	5.6	P
24/04/2002	(114)	11:00:00.800	-56.135	-122.31	010	5.6	P
24/04/2002	(114)	15:08:18.400	-56.199	-26.506	033	4.6	P
26/04/2002	(116)	01:36:25.500	6.639	-73.61	033	5.1	P
26/04/2002	(116)	16:06:07.000	13.088	144.62	085	6.6	PKP
27/04/2002	(117)	03:41:35.400	1.099	-79.565	023	4.6	P
28/04/2002	(118)	08:03:20.101	-23.507	-115.06	010	4.6	P
28/04/2002	(118)	19:56:42.601	17.206	-100.97	025	4.7	P
28/04/2002	(118)	20:16:59.301	1.793	-102.07	010	4.9	P
29/04/2002	(119)	02:43:14.800	7.205	-79.698	033	4.7	P
30/04/2002	(120)	14:56:29.101	-23.535	-115.49	010	4.8	P
30/04/2002	(120)	18:55:57.901	12.461	-88.08	033	4.6	P
05/05/2002	(125)	11:35:06.300	-1.04	-78.292	010	4.7	P
06/05/2002	(126)	04:05:02.000	-55.287	-28.266	033	4.7	P
07/05/2002	(127)	09:19:54.100	12.151	-88.26	061	4.6	P
08/05/2002	(128)	14:59:53.500	-56.129	-26.625	033	4.7	P
09/05/2002	(129)	23:41:30.801	2.646	128.3	173	5.6	PKP
11/05/2002	(131)	10:43:07.800	-10.424	-78.506	046	5.7	P
12/05/2002	(132)	11:00:12.499	-17.819	-13.992	010	4.6	P
13/05/2002	(133)	13:20:48.400	-12.499	-14.717	010	4.9	P
13/05/2002	(133)	19:54:43.990	19.141	121.24	033	5.4	PKP
13/05/2002	(133)	19:57:22.899	19.132	121.24	033	5.5	PKP
15/05/2002	(135)	03:46:05.700	24.636	121.92	010	5.5	PKP
17/05/2002	(137)	07:14:21.990	9.63	-99.776	033	4.7	P
17/05/2002	(137)	10:40:10.699	48.168	-27.808	010	5.6	P
20/05/2002	(140)	20:32:23.400	-32.735	57.175	010	4.9	P
21/05/2002	(141)	06:02:59.900	17.779	-81.911	010	5.3	P
21/05/2002	(141)	20:53:29.700	36.627	24.274	097	5.4	P
22/05/2002	(142)	18:57:19.400	-36.344	-97.908	010	5.3	P
26/05/2002	(146)	00:10:21.000	1.832	127.24	109	5.8	PKP
26/05/2002	(146)	19:18:55.399	14.618	-90.977	160	4.9	P
27/05/2002	(147)	00:55:56.500	-29.464	-111.75	010	4.6	P
27/05/2002	(147)	16:22:36.399	-26.962	26.715	005	4.9	P
28/05/2002	(148)	16:45:17.100	24.069	122.26	033	5.8	PKP
28/05/2002	(148)	16:56:41.799	-56.031	-27.71	133	4.9	P
28/05/2002	(148)	21:33:55.100	16.438	-99.359	009	5.1	P
29/05/2002	(149)	11:11:28.799	-3.08	33.902	010	4.9	P
02/06/2002	(153)	12:52:25.200	9.279	-83.681	039	4.7	P
05/06/2002	(156)	12:45:17.300	35.472	-36.291	010	5.5	P
06/06/2002	(157)	22:35:41.901	35.648	26.183	087	5.1	P
07/06/2002	(158)	00:05:48.990	8.715	-77.621	085	5.1	P
07/06/2002	(158)	16:02:57.399	16.076	-96.698	033	4.7	P
07/06/2002	(158)	17:00:51.499	16.107	-96.749	033	5.5	P
10/06/2002	(161)	20:53:07.500	11.282	-87.191	033	5.1	P
10/06/2002	(161)	20:55:48.199	11.279	-87.229	033	5.2	P
10/06/2002	(161)	22:48:36.200	10.985	140.69	033	5.9	PKP
11/06/2002	(162)	02:32:31.899	17.612	-94.52	154	4.9	P
11/06/2002	(162)	13:26:15.499	11.411	-86.981	071	4.6	P
11/06/2002	(162)	17:58:01.600	-40.511	-16.682	010	5.0	P
12/06/2002	(163)	19:52:47.300	-0.676	-20.722	010	5.4	P
13/06/2002	(164)	00:59:14.600	5.14	-82.219	010	4.6	P
13/06/2002	(164)	05:20:19.401	8.818	-83.916	043	4.6	P
14/06/2002	(165)	02:11:36.999	7.593	124.02	033	5.4	PKP
14/06/2002	(165)	15:24:09.500	22.542	-45.136	010	5.2	P
14/06/2002	(165)	16:15:22.899	22.56	-45.111	010	5.1	P
15/06/2002	(166)	13:23:08.199	-53.222	23.571	010	4.9	P
16/06/2002	(167)	02:46:14.000	8.784	-83.992	035	5.4	P
16/06/2002	(167)	17:59:20.499	-53.34	23.685	010	5.1	P

Tabela B.1 (Continuação)

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
16/06/2002	(167)	22:43:04.600	8.992	-84.078	041	4.6	P
17/06/2002	(168)	08:38:38.100	-55.058	-129.71	010	4.8	P
17/06/2002	(168)	13:13:06.799	-5.699	-105.15	010	4.7	P
17/06/2002	(168)	13:18:01.700	-4.628	-105.15	010	5.1	P
17/06/2002	(168)	13:25:56.300	-4.651	-105.38	010	5.2	P
19/06/2002	(170)	21:50:10.500	16.595	-97.822	033	5.2	P
21/06/2002	(172)	19:35:41.800	11.062	-60.194	033	4.6	P
23/06/2002	(174)	13:55:08.000	-60.192	-32.977	010	4.6	P
24/06/2002	(175)	01:20:35.600	35.767	9.87	010	5.0	P
25/06/2002	(176)	04:06:44.500	3.972	-82.442	010	5.0	P
25/06/2002	(176)	19:55:58.799	-4.8	-12.294	010	4.8	P
25/06/2002	(176)	20:15:57.799	-5.007	-12.33	010	5.1	P
25/06/2002	(176)	20:50:43.499	-4.873	-12.404	010	4.7	P
25/06/2002	(176)	21:47:23.200	-4.975	-12.332	010	5.2	P
25/06/2002	(176)	22:59:11.700	-4.927	-12.407	010	5.0	P
25/06/2002	(176)	23:28:24.400	-4.377	-12.152	010	4.7	P
26/06/2002	(177)	01:00:11.000	-4.717	-12.341	010	4.8	P
26/06/2002	(177)	01:25:27.399	-4.934	-12.321	010	4.8	P
26/06/2002	(177)	03:24:50.200	-4.916	-12.327	010	4.6	P
27/06/2002	(178)	17:13:42.990	19.856	-71.549	033	4.8	P
27/06/2002	(178)	22:41:06.800	38.48	22.82	004	5.2	P
28/06/2002	(179)	17:19:30.300	43.747	130.7	566	6.8	PKP
29/06/2002	(180)	11:50:53.500	7.394	-36.33	010	4.8	P
30/06/2002	(181)	06:23:48.990	-5.568	-76.918	033	4.7	P
30/06/2002	(181)	20:24:20.600	14.545	-91.544	070	4.6	P
01/07/2002	(182)	13:41:51.900	13.382	-90.063	067	4.8	P
01/07/2002	(182)	20:23:01.301	-55.892	-26.969	033	4.7	P
02/07/2002	(183)	10:15:59.200	-29.85	-112.4	010	5.2	P
02/07/2002	(183)	16:24:29.100	5.017	-77.405	010	5.5	P
05/07/2002	(186)	13:41:44.700	-40.007	-155.7	010	4.9	P
06/07/2002	(187)	05:42:28.600	25.539	-45.285	010	5.0	P
11/07/2002	(192)	02:56:28.900	21.584	142.94	317	5.4	PKP
11/07/2002	(192)	07:36:25.999	24.075	122.29	043	5.5	PKP
11/07/2002	(192)	09:22:22.300	-30.061	-111.98	010	5.1	P
11/07/2002	(192)	12:42:17.501	-1.635	-12.928	010	4.6	P
11/07/2002	(192)	14:17:24.999	14.143	-90.097	147	4.7	P
12/07/2002	(193)	18:07:59.700	6.733	-73.021	155	4.8	P
15/07/2002	(196)	15:02:06.999	-43.901	-15.996	010	5.0	P
16/07/2002	(197)	03:04:55.400	-55.793	-27.849	100	4.9	P
16/07/2002	(197)	14:50:14.399	-11.65	41.071	010	5.2	P
18/07/2002	(199)	14:26:51.600	-58.688	-25.275	033	4.9	P
18/07/2002	(199)	21:53:12.799	-44.715	-79.754	010	5.2	P
19/07/2002	(200)	08:25:44.999	-56.693	-141.18	010	4.8	P
22/07/2002	(203)	05:45:03.000	50.889	6.103	017	4.9	P
23/07/2002	(204)	20:05:31.800	37.251	142.22	033	5.5	PKP
25/07/2002	(206)	15:58:48.700	9.942	125.67	104	5.4	PKP
26/07/2002	(207)	22:33:23.301	8.369	-82.905	033	4.6	P
29/07/2002	(210)	07:26:09.700	-55.741	-26.871	033	5.5	P
30/07/2002	(211)	06:55:07.700	-57.889	-23.242	033	5.7	P
30/07/2002	(211)	17:02:49.301	-55.788	-26.844	033	4.9	P
31/07/2002	(212)	04:45:14.200	7.909	-82.786	010	5.3	P
02/08/2002	(214)	23:11:39.101	29.28	138.97	426	5.7	PKP
03/08/2002	(215)	02:39:01.801	8.264	-82.822	010	5.6	P
03/08/2002	(215)	14:18:13.400	-1.506	-14.374	010	5.3	P
04/08/2002	(216)	09:50:25.201	-45.022	-80.732	010	5.4	P
06/08/2002	(218)	14:26:12.201	-5.355	-76.616	106	5.1	P
07/08/2002	(219)	16:44:43.400	7.017	-104.24	010	5.0	P
08/08/2002	(220)	13:39:58.201	4.98	-77.819	043	5.4	P
11/08/2002	(223)	02:00:36.200	15.982	-98.448	010	4.9	P

Tabela B.1 (Continuação)

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
11/08/2002	(223)	05:06:32.200	-5.576	-71.882	567	4.8	P
11/08/2002	(223)	12:48:54.901	-54.236	-58.006	010	4.9	P
12/08/2002	(224)	12:54:00.500	-59.557	-25.739	033	4.8	P
14/08/2002	(226)	13:12:39.800	7.831	136.88	010	6.1	PKP
20/08/2002	(232)	10:59:32.100	30.986	141.97	009	5.4	PKP
23/08/2002	(235)	13:11:38.701	-20.902	-110.85	010	4.7	P
23/08/2002	(235)	15:43:57.801	5.331	-99.011	010	4.7	P
24/08/2002	(236)	18:40:53.401	43.11	146.12	042	5.9	PKP
26/08/2002	(238)	21:49:56.901	8.365	-82.769	042	4.7	P
27/08/2002	(239)	05:19:14.200	8.251	-82.816	010	4.8	P
27/08/2002	(239)	06:48:13.801	-55.702	-25.933	033	4.9	P
27/08/2002	(239)	17:08:50.301	16.305	-97.319	046	5.0	P
28/08/2002	(240)	17:05:33.801	22.115	121.58	033	5.7	PKP
30/08/2002	(242)	09:55:31.601	57.514	-33.138	010	4.8	P
30/08/2002	(242)	21:11:43.600	16.689	-100.94	016	4.8	P
30/08/2002	(242)	22:39:03.400	-56.008	-26.612	033	4.6	P
31/08/2002	(243)	05:27:18.200	2.709	-84.378	023	5.6	P
01/09/2002	(244)	05:56:24.300	24.056	122.27	039	5.5	PKP
02/09/2002	(245)	09:23:45.101	35.081	26.522	054	5.0	P
03/09/2002	(246)	14:23:48.500	13.558	120.6	033	5.5	PKP
05/09/2002	(248)	14:25:38.000	-36.36	-97.773	010	4.8	P
06/09/2002	(249)	01:21:27.501	38.371	13.698	010	5.8	P
07/09/2002	(250)	18:08:36.901	-57.951	-25.088	033	5.1	P
08/09/2002	(251)	23:03:45.100	-1.292	-14.534	010	5.3	P
15/09/2002	(258)	08:39:31.801	44.858	130.08	577	6.3	PKP
16/09/2002	(259)	18:48:26.700	66.917	-18.5	010	5.5	P
19/09/2002	(262)	11:22:29.700	-36.889	-95.356	010	5.1	P
20/09/2002	(263)	13:33:42.000	-1.58	133.92	010	5.7	PKP
20/09/2002	(263)	15:43:36.400	-1.538	134.35	010	6.0	PKP
25/09/2002	(268)	18:14:48.600	16.963	-99.85	033	5.1	P
26/09/2002	(269)	12:55:29.000	-19.622	-11.899	010	4.9	P
26/09/2002	(269)	13:12:25.100	15.345	-91.933	187	4.9	P
27/09/2002	(270)	06:10:44.201	38.391	13.781	010	4.9	P
27/09/2002	(270)	07:04:55.401	17.275	-100.28	033	5.0	P
28/09/2002	(271)	02:46:45.101	38.25	13.649	010	4.8	P
28/09/2002	(271)	03:53:57.100	-53.251	-117.46	010	5.1	P
29/09/2002	(272)	09:44:28.301	-33.384	-109.39	010	5.1	P
30/09/2002	(273)	13:05:58.101	-35.086	-70.396	096	5.4	P
02/10/2002	(275)	12:27:15.200	11.475	-86.942	033	4.8	P
03/10/2002	(276)	16:08:28.401	23.227	-108.49	010	5.4	P
04/10/2002	(277)	12:37:16.200	-57.296	-26.442	152	4.9	P
04/10/2002	(277)	15:43:46.500	10.322	-62.662	033	5.0	P
05/10/2002	(278)	05:52:17.300	-5.645	-76.488	063	4.9	P
06/10/2002	(279)	01:18:35.801	58.476	-31.797	010	5.2	P
06/10/2002	(279)	04:19:37.700	6.43	-71.452	031	4.7	P
07/10/2002	(280)	17:32:19.200	2.456	126.72	033	5.4	PKP
07/10/2002	(280)	20:03:54.100	58.275	-31.87	010	4.9	P
08/10/2002	(281)	12:40:43.000	9.061	-84.048	012	4.8	P
10/10/2002	(283)	10:50:19.900	-1.684	134.15	010	6.5	PKP
10/10/2002	(283)	12:27:52.100	-1.441	134.13	010	5.5	PKP
10/10/2002	(283)	12:28:25.700	-1.507	133.99	010	6.1	PKP
10/10/2002	(283)	12:29:35.600	-1.299	133.91	010	6.0	PKP
10/10/2002	(283)	18:33:37.201	-1.42	134.08	010	5.4	PKP
10/10/2002	(283)	21:19:58.500	-1.437	134.07	010	5.7	PKP
11/10/2002	(284)	14:41:24.100	15.555	-95.603	033	5.2	P
12/10/2002	(285)	05:58:50.100	34.77	26.377	010	5.0	P
12/10/2002	(285)	10:59:33.801	37.771	142.6	030	5.4	PKP
12/10/2002	(285)	14:48:36.101	-58.861	-14.283	033	4.9	P
12/10/2002	(285)	20:09:11.200	-8.27	-71.695	532	6.5	P

Tabela B.1 (Continuação)

Data dd/mm/aaaa	Dia Jul. jjj	Hora (UTC)	Localização		Prof. (km)	Magnitude m_b	Fase Tipo
14/10/2002	(287)	14:12:42.801	41.201	142.25	053	5.8	PKP
15/10/2002	(288)	23:50:28.500	-14.214	-72.79	085	5.0	P
16/10/2002	(289)	08:36:59.501	3.694	126.57	033	5.4	PKP
17/10/2002	(290)	17:52:43.801	-3.593	140.1	033	5.6	PKP
18/10/2002	(291)	11:16:48.300	-57.087	-142.43	010	5.1	P
18/10/2002	(291)	11:33:51.000	-39.063	-92.22	010	4.9	P
18/10/2002	(291)	12:04:41.000	19.397	-64.142	033	4.7	P
19/10/2002	(292)	15:31:23.000	2.961	-84.203	010	4.7	P
19/10/2002	(292)	21:08:01.100	-9.074	-78.957	049	4.6	P
20/10/2002	(293)	16:06:00.500	36.406	141.07	039	5.4	PKP
22/10/2002	(295)	06:38:47.301	-43.886	38.891	010	5.3	P
23/10/2002	(296)	07:37:30.900	-32.178	-109.53	010	5.1	P
24/10/2002	(297)	04:35:16.400	25.154	123.49	033	5.5	PKP
24/10/2002	(297)	06:07:04.300	25.12	123.73	010	5.5	PKP
24/10/2002	(297)	06:08:37.700	-1.899	28.904	011	5.8	P
24/10/2002	(297)	07:12:17.301	-1.988	28.875	010	5.3	P
27/10/2002	(300)	21:08:52.100	17.104	-101.31	033	4.7	P
28/10/2002	(301)	14:40:53.000	-57.893	-25.67	033	4.8	P
31/10/2002	(304)	10:32:58.700	41.777	14.905	010	5.3	P
31/10/2002	(304)	16:09:30.500	18.581	146.13	033	5.4	PKP
31/10/2002	(304)	20:36:54.100	-40.157	-74.72	033	5.3	P
01/11/2002	(305)	15:09:01.401	41.784	14.871	010	5.5	P
03/11/2002	(307)	03:37:43.200	38.868	141.98	049	5.7	PKP
04/11/2002	(308)	03:19:17.701	-5.592	35.927	010	5.6	P
04/11/2002	(308)	04:35:57.601	32.369	131.52	033	5.5	PKP
04/11/2002	(308)	08:25:53.301	-5.947	36.18	010	4.9	P
04/11/2002	(308)	10:00:47.500	17.571	-101.28	033	5.1	P
05/11/2002	(309)	14:05:19.900	19.613	-104.56	102	5.0	P
06/11/2002	(310)	09:12:44.800	37.829	20.914	010	5.0	P
06/11/2002	(310)	16:02:37.900	16.562	-98.855	033	4.8	P
08/11/2002	(312)	23:20:43.500	16.454	-97.815	033	5.1	P
09/11/2002	(313)	00:14:19.600	13.928	-91.211	033	5.5	P
09/11/2002	(313)	06:05:58.300	-48.102	-75.358	033	5.1	P
11/11/2002	(315)	01:27:13.600	-31.717	-71.709	033	4.8	P
11/11/2002	(315)	23:53:11.100	-2.357	-79.893	033	5.2	P
12/11/2002	(316)	01:46:48.701	-56.555	-27.747	113	6.0	P
12/11/2002	(316)	03:54:00.000	1.401	-90.967	010	4.8	P
13/11/2002	(317)	03:19:01.601	-4.638	-77.88	033	4.7	P
13/11/2002	(317)	20:26:52.800	18.734	-64.096	038	5.0	P
14/11/2002	(318)	15:30:32.600	-55.655	-35.667	033	5.2	P
14/11/2002	(318)	15:53:33.401	16.325	-91.001	033	4.7	P
15/11/2002	(319)	13:05:40.301	-55.647	-35.662	033	5.9	P
15/11/2002	(319)	19:58:33.900	-55.934	-35.901	033	6.0	P
16/11/2002	(320)	10:16:30.200	-55.82	-35.309	033	5.4	P
17/11/2002	(321)	10:01:57.300	8.918	-83.848	001	4.9	P
18/11/2002	(322)	00:31:30.500	28.985	-43.461	010	5.0	P
19/11/2002	(323)	18:24:06.701	12.707	-88.89	033	4.8	P
20/11/2002	(324)	18:19:43.600	12.686	-88.209	114	5.1	P
21/11/2002	(325)	02:53:18.601	12.315	-82.284	033	5.3	P
22/11/2002	(326)	18:34:30.301	12.214	-87.045	074	4.8	P
24/11/2002	(328)	12:47:56.101	-55.633	-35.534	033	4.6	P
24/11/2002	(328)	15:09:33.100	10.862	-62.672	112	4.8	P
25/11/2002	(329)	11:41:59.501	0.735	-25.174	010	4.7	P
26/11/2002	(330)	08:17:21.900	15.154	-93.623	033	4.6	P
29/11/2002	(333)	11:49:28.301	23.464	-44.991	010	5.0	P
01/12/2002	(335)	02:46:54.101	-10.684	-78.876	027	5.2	P
01/12/2002	(335)	09:56:59.699	42.649	143.94	094	5.4	PKP
02/12/2002	(336)	02:18:33.301	11.111	-86.326	033	4.8	P
02/12/2002	(336)	04:58:55.101	37.747	21.087	010	5.2	P

Tabela B.1 (Continuação)

Data	Dia Jul.	Hora	Localização		Prof.	Magnitude	Fase
dd/mm/aaaa	jjj	(UTC)	Latitude	Longitude	(km)	m_b	Tipo
02/12/2002	(336)	06:19:57.100	13.278	-89.063	125	4.8	P
02/12/2002	(336)	13:42:10.300	1.511	126.39	010	5.7	PKP
09/12/2002	(343)	09:35:04.800	37.869	19.973	010	5.0	P
10/12/2002	(344)	01:28:33.601	-50.028	-114.12	010	5.3	P
10/12/2002	(344)	03:09:40.101	17.884	-100.91	085	5.1	P
10/12/2002	(344)	13:51:26.701	36.195	-7.472	010	5.1	P
11/12/2002	(345)	03:49:40.100	-3.81	135.12	010	5.9	PKP
11/12/2002	(345)	10:00:31.101	-3.737	135.23	010	5.6	PKP
12/12/2002	(346)	04:16:02.100	-57.97	-25.187	033	5.0	P
12/12/2002	(346)	22:44:05.300	-41.852	-83.564	010	5.6	P
15/12/2002	(349)	07:23:54.900	6.985	-72.814	202	4.7	P
16/12/2002	(350)	09:46:32.101	-26.784	-107.21	010	5.0	P
17/12/2002	(351)	04:32:53.100	-56.952	-24.825	010	5.5	P
18/12/2002	(352)	01:47:07.000	-56.996	-25.205	010	5.1	P
18/12/2002	(352)	14:12:21.700	-57.092	-24.981	010	5.7	P
19/12/2002	(353)	03:42:45.800	0.911	126.27	033	5.4	PKP
19/12/2002	(353)	03:48:48.700	-57.014	-24.905	010	4.8	P
20/12/2002	(354)	14:14:42.000	-3.076	147.94	033	5.8	PKP
21/12/2002	(355)	00:46:07.500	3.711	-79.001	010	5.4	P
21/12/2002	(355)	17:41:13.501	4.983	123.16	602	5.4	PKP
21/12/2002	(355)	18:50:54.701	18.357	-62.38	052	4.9	P
23/12/2002	(357)	02:50:38.200	-1.724	34.971	010	5.0	P
23/12/2002	(357)	13:46:11.300	16.957	-85.578	033	5.6	P
25/12/2002	(359)	05:09:00.400	-54.742	-118.61	010	4.9	P
29/12/2002	(363)	07:31:46.100	17.595	-95.188	131	4.8	P

BIBLIOGRAFIA

- Brito Neves, B. B., R. Fuck, U. G. Cordani & A. Thomaz. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: A case of tectonic heritage. *J. Geodyn.*, 1, 459-510, 1984.
- Brito Neves, B. B., & U. G. Cordani. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Res.*, 53, 23-40, 1991.
- Cline, A. K., FITPACK - Software package for curve and surface fitting employing splines under tension, Department of Computer Sciences, University of Texas, Austin, 1981.
- Constable, S. C., R. L. Parker & C. G. Constable. Occam's inversion: A practical algorithm for generation smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300, 1987.
- Cordani, U. G., B. B. Brito Neves, R. A. Fuck, R. Porto, A. T. Filho, & F. M. Bezerra da Cunha. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Revista Ciência Técnica Petróleo*, Rep. 15, 70 pp., Petrobrás, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Maguez de Mello (CENPES), Rio de Janeiro, Brasil, 1984.
- Escalante, Christian. Tomografia sísmica do manto superior sob o sudeste e centro oeste do Brasil. *Dissertação de Mestrado, IAG - USP*, pp. 74, 2002.
- Evans, J. R., & U. Achauer. Teleseismic velocity using the ACH method: theory and application to continental-scale studies, in H. M. Iyer and K. Hirahara (Editores). *Seismic Tomography: Theory and Practice*, Chapman and Hall, London, pp. 319-360, 1993.
- Gibson, S. A., R. N. Thompson, R. K. Weska, A. P. Dickin & O. H. Leonards. Late Cretaceous rift-related upwellings and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. *Contrib. Mineral Petrol*, 126, 303-314, 1997.
- Gibson, S. A., R. N. Thompson, O. H. Leonards, A. P. Dickin & J. G. Mitchell. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: Geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contrib. Mineral Petrol*, 137, 147-169, 1999.
- Heintz, M., E. Debayle, A. Vauchez & M. Assumpção. Seismic anisotropy and surface wave tomography of South America. *AGU fall meeting*, S52B-22, 2000.
- Hubert, P. J., Robust statistics. *Wiley*, New York, 1981.
- Kenneth, B. L. N., and E. R. Engdahl. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465, 1991.
- Lay, T. & T. C. Wallace. Modern Global Seismology. *Academic Press*, (International geophysics series: v. 58), 1995.
- Lawson, C. L. and R. J. Hanson. Solving least squares problems. *Prentice-Hall*, New Jersey, 340 pp., 1974.
- Marquardt, D. W., An algorithm for least-squares estimations of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11, 431-441, 1963.

- Meju, W. Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice, in S. N. Domenico, Editor. *Courses notes series, vol 06, SEG*, 1994.
- Menke, W. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, Orlando, 260 pp., 1984.
- Paige, C. C. & M. A. Saunders. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Trans. Math. Software*, 8, 43-71, 1982.
- Pulliam, R. J., D. W. Vasco, & L. R. Johnson. Tomografic Inversions for Mantle P Wave Velocity Structure Based on the Minimization of l^1 and l^2 Norms of International Seismological Centre Travel Times Residuals. *J. Geophys. Res.*, 98, 699-734, 1993.
- Rocha, M. P. & M. Assumpção. Tomografia sísmica do manto superior no SE do Brasil utilizando ondas P. 8º *Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, in press, Rio de Janeiro, 2003.
- Sambridge, M. S., Non-linear arrival time inversion: constraining velocity anomalies by seeking smooth models in 3-D. *Geophys. J. Int.*, 102, 653-677, 1990.
- Schimmel, M. Phase Cross-Correlation: Design, Comparison, and Application. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 1366-1378, 1999.
- Schimmel, M., M. Assumpção, & J. C. VanDecar. Seismic velocity anomalies beneath SE Brazil from P and S wave travel time inversions. *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2001JB000187, 2003.
- Silveira, G., E. Stutzmann, D. A. Griot, J. P. Montagner & L. M. Victor. Anisotropic tomography of the Atlantic Ocean from Rayleigh surface waves. *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 106, 257-273, 1998.
- Spakman, W., Upper mantle delay time tomography. Ph. D. thesis. *University of Utrecht*, Utrecht, The Netherlands, 200 pp., 1988.
- Spakman, W. & G. Nolet. Imaging algorithms, accuracy and resolution in delay time tomography. *Mathematical Geophysics*, edited by N. J. Vlaar, G. Nolet, M. J. R. Wortel & S. A. P. L. Cloetingh, D. Riedel Publ. Co., Dordrech, The Netherlands, 155-187, 1988.
- Thompson, R. N., S. A. Gibson, J. G. Mitchel, A. P. Dickin, O. H. Leonards, J. A. Broad & J. C. Greenwood. Migrating Cretaceous-Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from Deflected Trindade Mantle Plume?. *Jornal of Petrology*, 39, 1493-1526, 1998.
- VanDecar, J. C., & R. S. Crosson. Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 150-169, 1990.
- VanDecar, J. C., D. E. James., M. Assumpção. Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces. *Nature*, 378, 25-31, 1995.
- Van der Lee, S., D. James & P. Silver. Upper mantle S-velocity structure of central and western South America. *J. Geophys. Res.*, 106, 30821-30834, 2001.
- Vdovin, O., J. A. Levshin & M. H. Ritzwoller. Group-velocity structure of South America and the surrounding oceans. *Geophys. J. Int.*, 136, 324-340, 1999.