

Metodologias de interpolação espacial aplicada a dados de espessura crustal na Bacia do Paraná.

Cesar Garcia Pavão^{1,2}
Henrique Llacer Roig¹
Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes¹
George Sand Leão Araújo de França²
Ruan Roussenq Alves²

¹ Universidade de Brasília - UNB/IG/LSRAE
Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900
Brasília – DF, Brasil
cesargarciapavao@gmail.com
roig@unb.br
phjunker@unb.br

² Universidade de Brasília - UNB/IG/OBSIS
Campus Universitário Darcy Ribeiro, SG 13, CEP 70910-900
Brasília – DF, Brasil
cesargarciapavao@gmail.com
georgesand@unb.br
ruanroussenqalves@gmail.com

The use of methods of spatial interpolation of data is becoming increasingly common in geophysical analysis, because of that, currently, several software already contain a lot of these methods, allowing more detailed studies. In the present work to evaluate three methods of interpolation data for crustal thickness of the Paraná Basin, with the intention of making a map of the Moho for the region. The methods are IDW, Spline and Kriging. We compiled 39 data that were a database and analyzed using the software ArcGIS 9.3. The results showed a thicker crust in the central part with thinning to the edge. Traditional methods, IDW and Spline in its results generate anomalies not compatible with the 2.0 model crust. The analysis results of geostatistical Kriging are more refined and consistent, showing no abnormalities point, besides showing more consistent compared with the model, except the northwest, where there is a mismatch between the models due to data exclusivity of gravity, which are less precise than the data of receiver function and seismic.

Palavras-chave: espessura crustal, interpolação espacial, Bacia do Paraná.

1. Introdução

A crosta terrestre é a camada mais externa da Terra e sua espessura varia desde cerca de 8-10 km nas áreas oceânicas a 30-40 km nas regiões sísmicamente estáveis mais antigas (crátons), podendo atingir até 60-80 km nas cadeias de montanhas.

Em 1909, Mohorovicic detectou a interface limite entre crosta e manto, denominada de descontinuidade Moho. Esta representa o maior contraste de velocidade sísmica e composição química já identificada (Pacca e McReath 2000). Em particular, a estimativa da Moho é essencial para o detalhamento de estruturas e feições geológicas crustais, além de auxiliar no entendimento da evolução tectônica regional. Sua estimativa atua como um importante vínculo para modelos geotectônicos e geofísicos, assim como corrobora para a confecção de modelos de velocidades de propagação de ondas sísmicas.

Em 1995, Christensen e Mooney, fizeram uma compilação de trabalhos sobre sísmica de refração que tinha como um dos objetivos estimar a espessura crustal a nível mundial. A Tabela 1 resume a compilação obtida por Christensen e Mooney para espessura crustal.

Tabela 1. Compilação dos dados de sísmica de refração feita por Christensen e Mooney 1995.

Referência	Número de Perfis	Região
Tuve <i>et al.</i> 1954	15	América do Norte
Press 1966	30	Global
James e Steinhart 1966	30	América do Norte
McConnell <i>et al.</i> 1966	100	Global
Warren e Healy 1974	40	América do Norte
Giese <i>et al.</i> 1976	80	Europa
Christensen 1982	278	Global
Allenby e Schneizler 1983	200	América do Norte
Soller <i>et al.</i> 1982	297	Global
Prodehl 1984	200	Global
Meissner 1986	150	Global
Meissner <i>et al.</i> 1987	100	Europa
Braile <i>et al.</i> 1989	200	América do Norte
Mooney e Braile 1989	220	América do Norte
Collins 1988	50	Austrália
Mechie e Prodehl 1988	20	África
Belousov <i>et al.</i> 1991	120	USSR
Holbrook <i>et al.</i> 1992	90	Global
Kaila e Krishna 1992	25	Índia
GEON Center 1994	200	USSR
Li e Monney 1995	25	China
Total de perfis	560	Global

No ano de 1998, *Mooney et al.* publicaram um artigo sobre a estrutura da litosfera continental com dados de fonte controlada, obtendo o modelo para espessura crustal mundial, denominado de *Crust 5.1*.

Em 1999, *Laske et al.* refinaram esse modelo, obtendo como resultado o modelo *Crust 2.0*. Entretanto, a resolução efetiva desses modelos está abaixo da resolução formal em consequência da deficiência dos dados sísmicos em grandes regiões, como África e América do Sul (Nelsi 2004).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de metodologias geofísicas como, por exemplo, sismologia, gravimetria e sísmica, possibilitou um estudo mais detalhado da estrutura crustal na América do Sul.

No Brasil podemos destacar os seguintes trabalhos: Soares *et al.* (2006), estimou a espessura da crosta através de experimentos de refração sísmica na região central do Brasil; França e Assumpção (2004), estimaram a espessura crustal e razão V_p/V_s para a Bacia do Paraná através da função do receptor; Nelsi (2004), confeccionou um mapa para a Moho utilizando gravimetria; Bianchi (2008), caracterizou a crosta na Plataforma Sul Americana usando função do receptor.

Para o início da complementação das lacunas deixadas por *Laske et al.* (1999) em seu modelo, é necessário escolher o método de interpolação mais adequado aos dados de espessura crustal.

De acordo com a definição clássica, a interpolação é a arte de ler entre valores de uma tabela (Sadosky 1980). Stark (1979) esclarece que a interpolação é o processo de se encontrar valores intermediários entre valores discretos de uma função. Assim, pode-se definir interpolação espacial como o procedimento para se estimar valores de propriedades de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos. A

utilização de métodos de interpolação espacial de dados está se tornando cada vez mais freqüente nas análises geofísicas, em função de que, atualmente, diversos softwares já contêm vários destes métodos, permitindo análises bem mais detalhadas do que há algum tempo atrás.

Dentro deste contexto, o objetivo específico do presente trabalho é o de avaliar comparativamente métodos de interpolação para dados de espessura crustal e confeccionar um mapa da Moho para a região da Bacia do Paraná. A motivação para seu desenvolvimento foi à avaliação da melhor maneira de representar espacialmente valores de espessura crustal obtidas por gravimetria, sísmica e função do receptor na Bacia do Paraná.

1.1 Área de Estudo

Dada a vasta extensão da plataforma Sul-Americana, muitos de seus crátons e faixas Proterozóicas foram cobertos por grandes bacias. Uma das principais bacias, a bacia do Paraná (Figura 1), possui até 7 km de sedimentos, teve seu início de sedimentação no período Ordoviciano (~ 440 Ma) e término no Neocretáceo (~ 60 Ma) (Milani 1997; Milani e Ramos 1998). Além disso, a bacia tem quase que 67% da sua área coberta por lavas de idades Mesozóicas.

Geograficamente, a bacia do Paraná, inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, numa área total que ultrapassa 1.500 km². A bacia exibe forma ovalada com eixo maior em posição submeridiana, e é plena representante do conceito de bacia intracratônica: encontra-se inteiramente contida na placa Sul-Americana e não apresenta relacionamento direto com as margens desta placa.

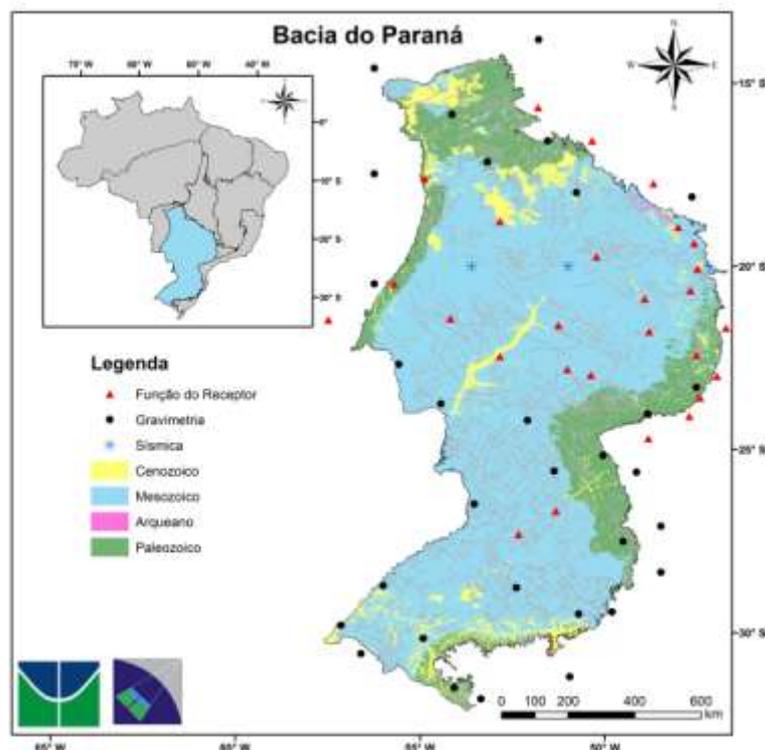


Figura 1. Localização geográfica, cronoestratigrafia e compilação dos métodos para obtenção da espessura crustal da Bacia do Paraná.

2. Metodologia de Trabalho

Para a construção da base de dados de espessura crustal da bacia do Paraná, foi feita uma compilação de diversos trabalhos publicados em revistas, dissertações de mestrado, tese de doutorado entre outros. Foi coletado um total de 39 valores de espessura crustal obtidos

através de três metodologias distintas: sísmica, gravimetria e função do receptor (RF) (Figura 1). A Tabela 2 esquematiza a formação da base de dados.

Tabela 2. Compilação dos dados de espessura crustal obtidos por três metodologias e utilizados neste trabalho.

Referência	Número de pontos	Região	Metodologia
Bianchi 2008	16	América do Sul	RF
França 2003	02	Bacia do Paraná	RF
Mantovani <i>et al.</i> 1991	01	Bacia do Paraná	Sísmica
Assumpção <i>et al.</i> 2002	02	Bacia do Paraná	Sísmica
Nelsi 2004	18	América do Sul	Gravimetria
Total de pontos	39	Bacia do Paraná	Multifontes

Foi feita uma análise estatística dos resultados compilados, a Figura 2 mostra o histograma de frequência para os valores de espessura da crosta. O histograma mostra uma maior frequência no intervalo entre 39-40 km.

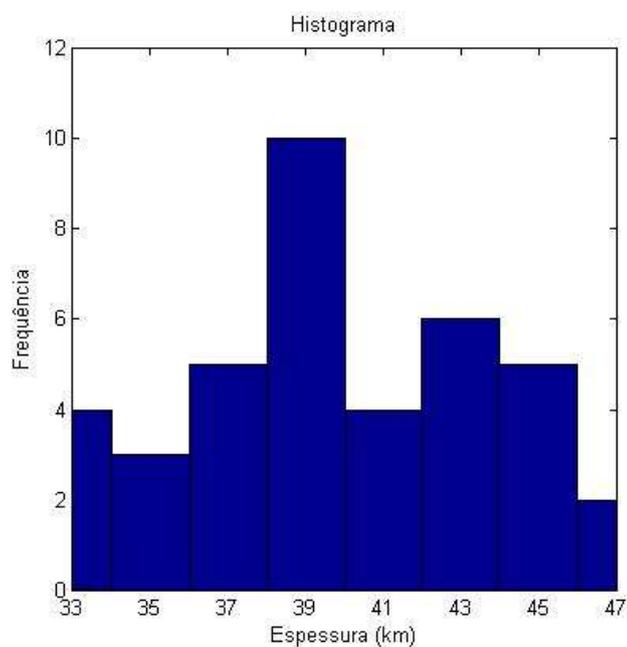


Figura 2. Histograma de distribuição de frequência dos valores de espessura crustal para bacia do Paraná.

Foram compilados um total de 39 pontos de espessura crustal, tendo 33,02 km como valor mínimo e 47,18 km como valor máximo. A média dos valores foi de 39,92 km com um desvio padrão de 3,93.

2.1 Métodos de Interpolação

A classificação dos métodos de interpolação encontrados na literatura é subjetiva, entretanto Hartkamp *et al.* (1999), classifica os interpoladores em globais, locais ou estocásticos. Os interpoladores globais consideram todos os pontos da região amostrada,

permitindo assim interpolar valores da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais, ou seja, a remoção ou adição de pontos afetará todo o mapa. Já com relação aos interpoladores locais, cada ponto da superfície é estimado baseando-se nos valores das amostras mais próximas. Assim a alteração de um valor afeta localmente os pontos próximos ao mesmo. Vale salientar que tanto os interpoladores globais como os locais não levantam qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial.

Os modelos estocásticos levam em consideração que cada ponto da superfície é estimado apenas tendo como fundamento a interpolação dos valores das amostras mais próximas, utilizando um estimador estatístico. Assim os erros são definidos através das auto-correlações e correlações espaciais dos atributos (Lourenço 1998).

O presente trabalho não visa discutir os algoritmos matemáticos dos métodos, mas sim sua idéia, função e aplicação prática. Os métodos foram escolhidos abrangendo dois interpoladores determinísticos (Global ou Local) e um estocástico. Decidiu-se trabalhar apenas com um programa, o ArcGis versão 9.3 (ESRI), e também adotar suas nomenclaturas para os métodos de interpolação. Os métodos utilizados são apresentados detalhadamente segundo ESRI, e sucintamente podem ser descritos como:

- a) *IDW* – Inverso de distância ponderada: É considerado o método mais simples de interpolação, que atribui o peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo esse peso com o aumento da distância, ou seja, quanto maior for o peso, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó. O método tem como característica a geração do chamado efeito de mira ao redor dos pontos observados.
- b) *Spline*: O método não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo conjunto de dados, mas divide a série de dados em subconjuntos e utiliza diversos polinômios de menor grau para cada subconjunto. A *spline* cúbica é a mais utilizada (Emery e Thompson 1997). O método é classificado como suavizador e ao mesmo tempo tenta honrar ao máximo os dados.
- c) *Kriging* – Krigagem: A Krigagem assume que os dados amostrados de uma população se encontram correlacionados no espaço até uma distância “D”. A partir da distância “D” a correlação espacial pode deixar de existir. A interpolação gera valores que coincidem com os valores dos pontos amostrados, assim é possível identificar as regiões que precisam ser melhoradas (Barcelos *et al.* 2004). A técnica de interpolação apresenta vários métodos, os quais não apenas criam superfícies de predição e erros, mas também produzem mapas de probabilidade. Esses métodos podem ser divididos em duas modelagens: utilização do variograma para ajustar o modelo de dependência espacial dos dados e fazer uma predição para os valores desconhecidos de uma localização específica, fazendo uso de um modelo de ajuste do variograma, da configuração dos dados espaciais e dos valores dos pontos amostrados no entorno da localização (Cunha e Hartmann 2009).

3. Resultado e Discussão

Para os métodos *IDW* e krigagem utilizou-se um raio de ação de 9° graus, esse equivale à média das distâncias entre todos os pontos interpolados. Já no método *spline* o raio de ação foi definido como os 12 vizinhos mais próximos, visto que o software utilizado não dispõe o raio de ação em distância para esse método.

Não há uma regra estabelecida para definir o tamanho do pixel de saída para o modelo, a priori utilizou-se o valor sugerido pelo software, o qual leva em consideração a menor distância entre os pontos dividido por um fator. Assim o modelo final de espessura crustal da bacia do Paraná tem um pixel de comprimento 0,05° graus, ou seja, aproximadamente 5,5 km.

Os modelos IDW, spline e krigagem são apresentados nas Figuras 3.1 a 3.3 respectivamente. À esquerda o modelo de espessura em quilômetros e a direita o mapa do erro associado.

Os diagramas de espessura crustal gerados pelos métodos i) IDW, ii) Spline e iii) Krigagem, indicaram uma maior espessura na parte central da bacia do Paraná, com um determinado afinamento nas bordas da bacia. Os modelos gerados pelo método IDW e spline apresentam anomalias marcantes, como por exemplo, uma camada menos espessa da crosta, na região nordeste da bacia. Tal fato se comprova com a observação do efeito mira nessa região para o método IDW, já no spline a anomalia se comporta de forma suave. Outra anomalia é observada na região sudoeste da bacia, devido ao método de obtenção do dado, visto que os dados obtidos por sísmica e RF são mais precisos que os dados de gravimetria. O modelo gerado pelo método da Krigagem não apresenta anomalias. Mostra a diminuição gradativa da espessura crustal do centro para as bordas da bacia.

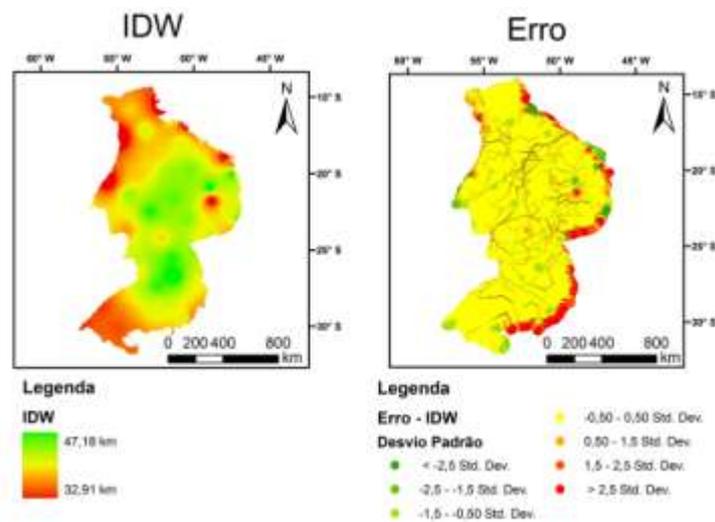


Figura 3.1 Resultado de interpolação usando IDW para dados de espessura crustal na Bacia do Paraná.

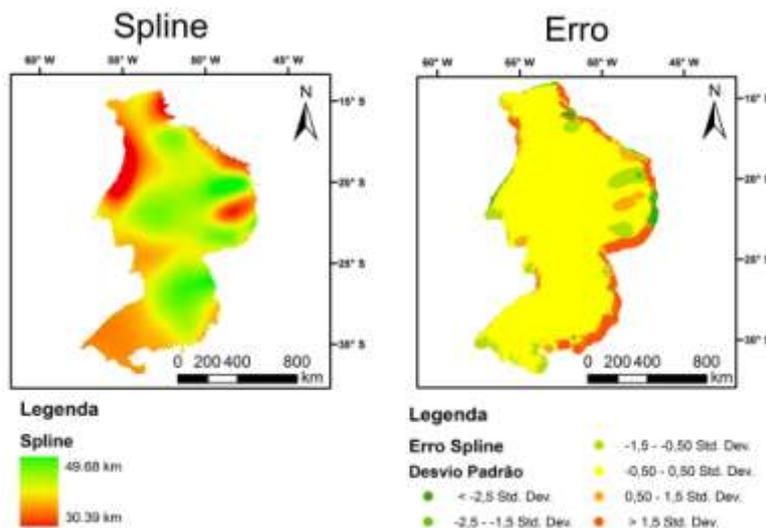


Figura 3.2 Resultado de interpolação usando spline para dados de espessura crustal na Bacia do Paraná.

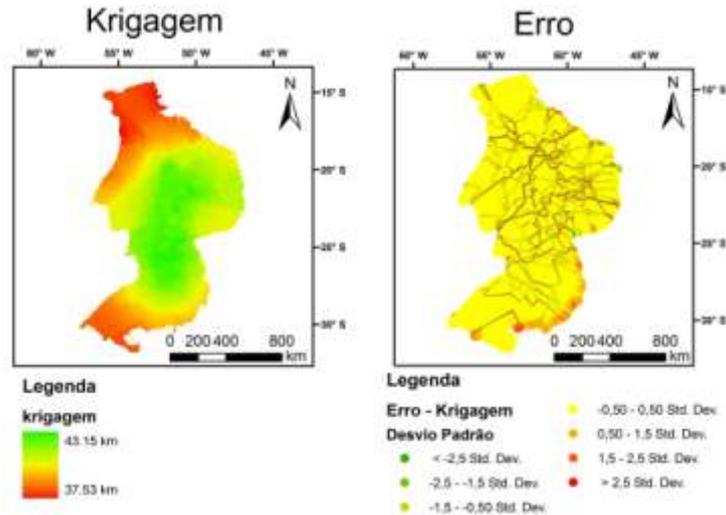


Figura 3.3 Resultado de interpolação usando krigagem para dados de espessura crustal na Bacia do Paraná.

Para comparação entre os modelos, utilizaram-se valores de espessura crustal obtidos através do modelo *Crust 2.0*. Coletou-se 20 pontos de espessuras que foram plotados nos modelos obtidos pelos três métodos de interpolação e feita dessa forma à análise visual. A Figura 3.4 mostra os modelos IDW, spline e krigagem com os pontos do modelo *Crust 2.0*.

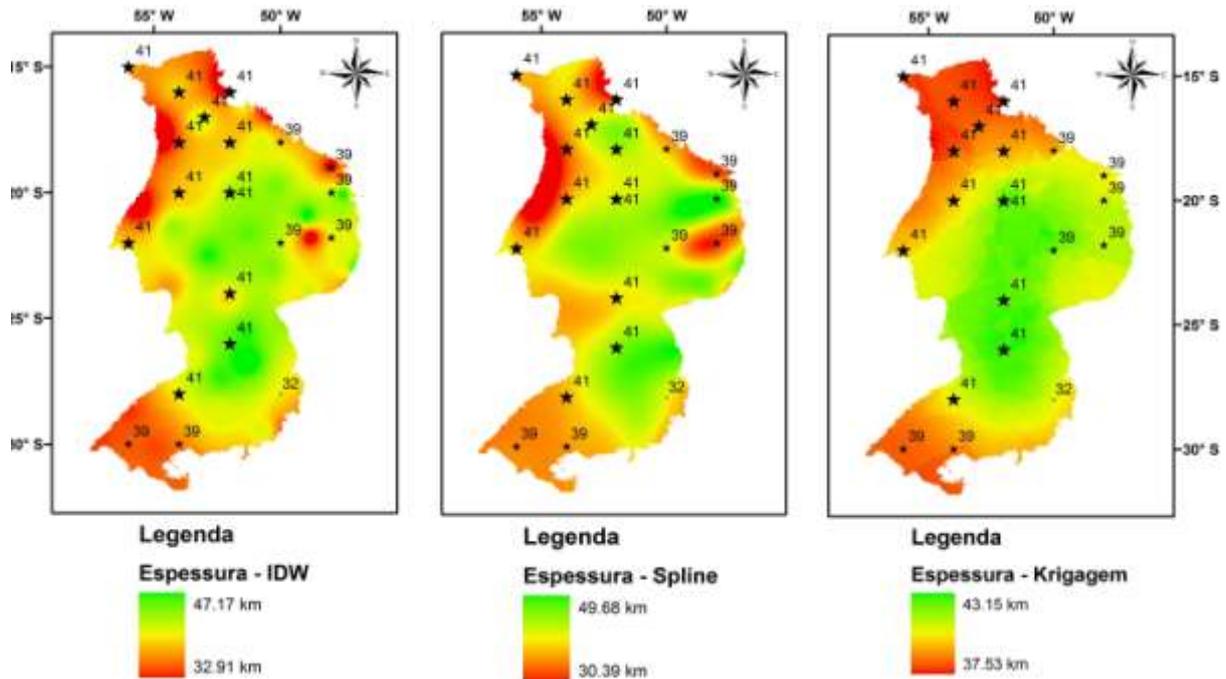


Figura 3.4 Resultado de interpolação usando os três métodos testados para dados de espessura crustal na Bacia do Paraná comparado com o modelo *Crust 2.0*.

Como o modelo *Crust 2.0* é composto de uma malha $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ graus, os valores amostrados foram de 32 km, 39 km e 41 km. Em todos os modelos interpolados, na região noroeste, ocorre uma incompatibilidade entre os valores calculados e os valores do modelo *Crust 2.0*. Tal fato pode ser explicado pela ausência de dados de RF e sísmica na região. Observa-se nas anomalias da região nordeste nos modelos IDW e spline não estão de acordo com o valor de

39 km obtido pelo modelo de Laske *et al.* 1999. Na região central da bacia, observou-se nos modelos IDW e spline uma incoerência nos valores de espessura, Laske *et al.* 1999 estimou valores próximos a 41 km enquanto os modelos IDW e spline apresentam valores próximos 45 km e 47 km respectivamente.

4. Conclusão

Os mapas gerados através do geoprocessamento com as técnicas de interpolação, IDW, spline e krigagem permitem uma melhor interpretação, facilitando sua discussão e permitindo a geração de novas informações de forma rápida e precisa.

Com exceção da porção nordeste da bacia do Paraná, os dados foram eficiente para representação espacial da espessura crustal na região estudada. Tal déficit pode ser suprido com a inclusão de RF e sísmica na região. Os modelos gerados pelos métodos IDW e spline se mostraram inconsistentes se comparando com o modelo mundial crustal de Laske *et al.* 1999, fato marcante na região central. Dentre os métodos avaliados para representação espacial da espessura da crosta, o método da krigagem, foi o que melhor o fez, mostrando a diminuição da espessura gradativamente do centro para as bordas da bacia.

Referências Bibliográficas

- Pacca, I. G. ; McReath, I.A. 2000. A Composição e o Calor da Terra. *In*: Teixeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T.R.; Taioli, F.. (Org.). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, p. 83-96.
- Mooney W.D., Laske, G. & Masters, G.T., 1998. Crust 5.1: A global crust model at 5° x 5°. *Journal of Geophysical Research*, 103, B1, 727-747.
- Laske, G, 1999 Crust 2.0: A global crust model at 2° x 2°. Disponível em:<<http://igpp.ucsd.edu/~gabi/crust2>>.
- França, G.S. & Assumpção, M., 2004. Crustal structure of the Ribeira fold belt, SE Brazil, derived from receiver function. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 743-758.
- Milani, E. J.; Ramos, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do gondwanae os ciclos de subsidência da bacia do paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 4, p.473-484, 1998.
- Hartkamp, A.D.; De Beurs, K.; Stein, A. & White, J.W.1999. *Interpolation Techniques for Climate Variables*. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F.: CIMMYT, 34p.
- Emery, W. & Thomson, R. 1997. *Data Analysis in Physical Oceanography*. Pergamon Press, New York, 634p.
- Barcelos, C.; Gruber, N.H.; Quintas, M. & Fernanddes, L. 2004. Complexo Estuarino de Paranaguá: Estudo das Características Ambientais com Auxílio de um Sistema de Informação Geográfica. *Anais... III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*. UFP. p. 20.