

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGEM

ANÁLISE DE INCERTEZA ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE  
ONDA SÔNICA EM DEPÓSITOS DE CARVÃO OBTIDA POR PERFILAGEM  
GEOFÍSICA

*Vanessa Cerqueira Koppe*

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS

2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGEM

ANÁLISE DE INCERTEZA ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE  
ONDA SÔNICA EM DEPÓSITOS DE CARVÃO OBTIDA POR PERFILAGEM  
GEOFÍSICA

***Vanessa Cerqueira Koppe***

Engenheira de Minas

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção  
do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre, RS

2005

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

Prof. Dr. André Cezar Zingano

Prof. Dr. Paulo Salvadorette

Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”

Isaac Newton

Aos meus pais,  
pelo apoio e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa pelo tema, orientação e amizade.

Ao Prof. Dr. Jair Carlos Koppe pelo apoio.

Aos professores do DEMIN e do PPGEM.

Aos colegas do LPM, que fazem deste um grande laboratório de pesquisa, pelas sugestões e observações.

A Gary Fallon pelas informações concedidas.

Ao Centro Nacional de Supercomputação pelo auxílio na compilação de programas e disponibilidade dos recursos computacionais.

Ao professor Eros Gavronski por disponibilizar a apostila da disciplina Pesquisa Mineral III na biblioteca da Escola de Engenharia.

A todos que auxiliaram de alguma forma na realização deste trabalho.

A CAPES pela bolsa concedida.

# ÍNDICE ANALÍTICO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xxxi</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xxxii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxxiii</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução	1
1.2 Estado-da-Arte	3
1.3 Meta	4
1.4 Objetivos	4
1.5 Metodologia	6
1.6 Organização da Dissertação	7
<b>CAPÍTULO 2 - Geofísica Aplicada a Determinação de Profundidades de Litologias</b>	<b>10</b>
2.1 Sísmica	10
2.1.1 Ondas	10
2.1.1.1 Geração de Ondas	11
2.1.1.2 Tipos de Ondas	13
2.1.2 Geração de Força	14
2.1.3 Operação dos Receptores	15
2.1.4 Sísmica de Reflexão e Sísmica de Refração	15
	vii

2.1.5	Fontes de Erros com Métodos Sísmicos	17
2.1.6	Inferência da Velocidade com Dados Sísmicos	17
2.2	Perfilagem Geofísica de Furo de Sonda	18
2.2.1	Operação de Perfilagem e Materiais Utilizados	21
2.2.2	Ambiente do Furo Perfilado	23
2.2.3	Perfilagem Nuclear de Furo de Sonda	23
2.2.3.1	Perfilagem de Raios Gama	23
2.2.3.2	Perfilagem Gama-Gama	24
2.2.4	Perfilagem Elétrica de Furo de Sonda	25
2.2.4.1	Perfilagem de Resistividade	25
2.2.5	Perfilagem Utilizando Caliper	26
2.2.6	Perfilagem Acústica de Furo de Sonda	26
2.3	Perfilagem Acústica de Furo de Sonda e Fatores de Influência	27
2.3.1	Sondas de Perfilagem Acústica	28
2.3.1.1	Uma Fonte e Um Receptor	28
2.3.1.2	Uma Fonte e Dois Receptores	29
2.3.2	Fatores de Influência	31
2.3.2.1	Porosidade	31
2.3.2.2	Fraturas	31
2.3.2.3	Anisotropia	32
2.3.2.4	Umidade	32
2.3.3	Densidade e Vagarosidade	32
2.4	Conversão de Tempo em Profundidade	33
2.4.1	Velocidade de Onda Acústica Versus Velocidade de Onda Sísmica	33
2.4.2	Combinação de Velocidades e Tempos	34
2.5	Considerações Finais	35



<b>CAPÍTULO 3 – Transformação de Coordenadas</b>	<b>37</b>	
3.1	Introdução	37
3.2	Transformação de Coordenadas Cartesianas em Coordenadas Estratigráficas	44
3.3	Transformação de Coordenadas Estratigráficas em Coordenadas Cartesianas	48
3.4	Considerações Finais	49
<b>CAPÍTULO 4 – Banco de Dados</b>	<b>50</b>	
4.1	Conceitos	50
4.2	Localização do Depósito	53
4.2.1	Banco de Dados	54
4.3	Estatística Básica	55
4.4	Desagrupamento	56
4.5	Considerações Finais	58
<b>CAPÍTULO 5 - Krigagem</b>	<b>60</b>	
5.1	Variável Regionalizada e Estacionariedade	61
5.2	Continuidade Espacial	62
5.2.1	Funções para Ajuste de Variogramas	66
5.3	Krigagem	69
5.3.1	Krigagem de Bloco	74
5.3.2	Validação Cruzada	76
5.4	Krigagem Ordinária em Três Dimensões (3D)	76
5.4.1	Variogramas de Vagarosidade de Onda Acústica (3D)	77
5.4.2	Validação Cruzada	85
5.4.3	Resultados da Krigagem Ordinária	91

5.4.3.1	Krigagem Ordinária Utilizando Banco de Dados em Coordenadas Estratigráficas	92
5.4.3.2	Krigagem Ordinária Utilizando Banco de Dados em Coordenadas Cartesianas	97
5.4.4	Comparação Entre Estimativas de Vagarosidade Utilizando Amostras em Coordenadas Estratigráficas e Cartesianas	101
5.5	Krigagem da Cota Capa	110
5.6	Krigagem em Duas Dimensões (2D)	117
5.6.1	Krigagem do Atributo Vagarosidade Média	117
5.6.2	Krigagem do Atributo Velocidade Média	128
5.6.3	Krigagem do Atributo Vagarosidade Versus Krigagem do Atributo Velocidade	138
5.7	Krigagem 2D e 3D para Obtenção de Vagarosidade Média	141
5.8	Considerações Finais	146
<b><i>CAPÍTULO 6 - Simulação</i></b>		<b>148</b>
6.1	Simulação Estocástica	148
6.2	Simulação Seqüencial Gaussiana do Atributo Vagarosidade	150
6.2.1	Teste de Binormalidade	157
6.2.2	Etapas da Simulação Sequencial Gaussiana	158
6.2.3	Resultados da Simulação Seqüencial Gaussiana	161
6.2.3.1	Validação dos Variogramas	169
6.2.4	Pós - Processamento	173
6.3	Estimativa de Vagarosidade Média – Simulação Versus Krigagem	182
6.4	Considerações Finais	187
<b><i>CAPÍTULO 7 - Estimativa Final e Intervalo de Confiança</i></b>		<b>189</b>
7.1	Estimativa Final	189

7.2	Determinação do Intervalo de Confiança	195
7.3	Obtenção dos Valores de Profundidade da Camada GCWS	200
7.4	Considerações Finais	205
<b><i>CAPÍTULO 8 - Conclusão</i></b>		<b>207</b>
8.1	Revisão Geral e Conclusões	207
8.2	Trabalhos Futuros	210
<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b>		<b>212</b>
<b><i>APÊNDICE A – Custos da Geofísica</i></b>		<b>217</b>
<b><i>APÊNDICE B – Processamento Sísmico</i></b>		<b>219</b>
<b><i>APÊNDICE C – Arquivos de Parâmetros</i></b>		<b>236</b>
<b><i>APÊNDICE D – Programas Desenvolvidos</i></b>		<b>246</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Esquema da metodologia utilizada neste estudo.	7
Figura 2.1- Representação de uma onda. Modificado de Robertson (2003).	11
Figura 2.2- Tipos de deformações.	13
Figura 2.3- Esquema da vibração dos elementos devido a propagação da onda de compressão.	14
Figura 2.4- Esquema da vibração dos elementos na presença de uma onda de cisalhamento.	14
Figura 2.5- Descrição da formação de ondas refletidas, refratadas e transmitidas.	16
Figura 2.6- Sonda de perfilagem sendo introduzida no furo. Fonte: Oliveira et al. (2004).	19
Figura 2.7- Sonda de perfilagem descendo ao longo do furo. Fonte: Oliveira et al. (2004).	20
Figura 2.8- Guincho segurando a sonda de perfilagem. Fonte: Oliveira et al. (2004).	20
Figura 2.9- Esquema da configuração da operação de perfilagem.	21
Figura 2.10- Exemplo de parte de um arquivo LAS.	22
Figura 2.11- Contagem de raios-gamma versus densidade. Modificado de Hoffman et al. (1982).	25
Figura 2.12- Esquema do caminho percorrido por uma onda acústica a partir da fonte até o receptor de uma sonda de perfilagem com um receptor. Modificado de Jorden e Campbell (1986).	29

Figura 2.13- Esquema do caminho percorrido por uma onda acústica a partir da fonte até os receptores de uma sonda de perfilagem com dois receptores. Modificado de Jorden e Campbell (1986).	30
Figura 3.1- Esquema de um depósito mineral dobrado.	38
Figura 3.2- Esquema de diferentes interpretações geológicas. Modificado de Deutsch (2002).	40
Figura 3.3- Esquema mostrando a transformação das coordenadas cartesianas de uma camada proporcional para coordenadas estratigráficas.	41
Figura 3.4- (a) Representação em perspectiva das capas de camadas de carvão do depósito em estudo (exagero vertical). (b) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (a) com as superfícies atravessadas.	42
Figura 3.5- Valores de espessura da camada GCWS.	44
Figura 3.6- (a) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas cartesianas e de amostras de vagarosidade (pontos pretos). (b) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas cartesianas (exagero vertical). (c) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (sem exagero vertical). (d) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (com exagero vertical).	46
Figura 3.7- (a) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas estratigráficas e de amostras de vagarosidade (pontos pretos). (b) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas estratigráficas (exagero vertical). (c) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (com exagero vertical).	47
Figura 3.8- Esquema de como podem ocorrer erros na determinação da continuidade horizontal de qualquer atributo de camadas fortemente dobradas.	48
Figura 4.1- Mapa de localização da área em estudo.	53

Figura 4.2- Vista superior dos furos perfilados (coordenadas UTM) e limite do polígono do levantamento sísmico.	54
Figura 4.3- Representação em perspectiva da superfície topográfica e das amostras de vagarosidade (representação com exagero vertical).	55
Figura 4.4- Histograma para os valores de vagarosidade de onda acústica.	56
Figura 4.5- Histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas (banco de dados em coordenadas cartesianas).	57
Figura 4.6- Histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas (banco de dados em coordenadas estratigráficas).	58
Figura 5.1- Exemplo de como uma variável regionalizada pode ser distribuída em uma seção do depósito. Os pontos pretos representam valores da variável regionalizada e a linha preta representa o comportamento estruturado da variável regionalizada.	61
Figura 5.2- Esquema de um variograma experimental típico. Modificado de Hartman (1992).	64
Figura 5.3- Representação das funções mais utilizadas para modelar variogramas experimentais. Modificado de Goovaerts (1997).	68
Figura 5.4- Variograma experimental vertical e seu modelo.	78
Figura 5.5- Correlograma experimental vertical.	79
Figura 5.6- Variograma experimental omnidirecional horizontal e seu modelo.	80
Figura 5.7- Esquema de como pares de amostras foram escolhidos (coordenadas cartesianas).	81
Figura 5.8- Variograma experimental na direção 22,5o (direção azimutal) e seu modelo.	82
Figura 5.9- Variograma experimental na direção 45o (direção azimutal) e seu modelo.	82
Figura 5.10- Variograma experimental na direção 67,5o (direção azimutal) e seu modelo.	83
Figura 5.11- Variograma experimental na direção 90o (direção azimutal) e seu modelo.	83

Figura 5.12- Variograma experimental na direção 112,5o (direção azimutal) e seu modelo.	83
Figura 5.13- Variograma experimental na direção 135o (direção azimutal) e seu modelo.	84
Figura 5.14- Variograma experimental na direção 157,5o (direção azimutal) e seu modelo.	84
Figura 5.15- Variograma experimental na direção 180o (direção azimutal) e seu modelo.	84
Figura 5.16- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica (amostras em coordenadas estratigráficas).	86
Figura 5.17- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas estratigráficas).	86
Figura 5.18- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica (amostras em coordenadas cartesianas).	87
Figura 5.19- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas cartesianas).	87
Figura 5.20- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica, utilizando amostras em coordenadas estratigráficas (usando um mínimo de separação entre amostras).	90
Figura 5.21- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas estratigráficas).	90
Figura 5.22- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica, utilizando amostras em coordenadas cartesianas (usando um mínimo de separação entre amostras).	91

Figura 5.23- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas cartesianas).	91
Figura 5.24- Histograma para os blocos krigados.	92
Figura 5.25- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	93
Figura 5.26- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	94
Figura 5.27- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	94
Figura 5.28- Seção vertical (vista do plano XZ) na coordenada 7444850 na direção norte, mostrando a posição aproximada da principal camada de carvão do depósito.	95
Figura 5.29- Histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de grid.	95
Figura 5.30- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	96
Figura 5.31- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	96
Figura 5.32- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos do	



desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	97
Figura 5.33- Histograma para os blocos krigados.	98
Figura 5.34- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	98
Figura 5.35- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	99
Figura 5.36- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	99
Figura 5.37- Histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de grid.	100
Figura 5.38- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	100
Figura 5.39- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	101
Figura 5.40- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.	101
Figura 5.41- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica pertencentes a camada de carvão GCWS.	103

Figura 5.42- Histograma para as amostras desagrupadas de vagarosidade de onda acústica pertencentes a camada GCWS.	103
Figura 5.43- Vista em perspectiva do modelo geológico da camada GCWS, em coordenadas estratigráficas, formando um envelope ao redor dos blocos krigados (exagero vertical). A legenda representa valores de vagarosidade de onda acústica.	104
Figura 5.44- Vista em perspectiva do modelo geológico da camada GCWS, em coordenadas cartesianas, formando um envelope ao redor dos blocos krigados (exagero vertical). A legenda representa valores de vagarosidade de onda acústica.	105
Figura 5.45- Histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenada estratigráficas pertencentes a camada GCWS.	105
Figura 5.46- Histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas pertencentes a camada GCWS.	106
Figura 5.47- (a) Histogramas para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas estratigráficas. (b) Histograma para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas cartesianas.	107
Figura 5.48- (a) Seção vertical (vista do plano XZ), do modelo de vagarosidade de onda acústica em coordenadas retro-transformadas, na coordenada Y igual a 7444850. (b) Seção vertical (vista do plano XZ), do modelo de vagarosidade de onda acústica em coordenadas cartesianas, na coordenada Y igual a 7444850.	109
Figura 5.49- Mapa de localização das amostras de valores de cota da capa da camada GCWS. A escala de cores representa valores de elevação da capa da camada de carvão.	110
Figura 5.50- Histograma para as amostras de valores de cota da capa da camada de carvão.	111
Figura 5.51- Histograma para as amostras desagrupadas de valores de cota da capa da camada de carvão.	111

Figura 5.52- Variograma superficial construído com as amostras de cota da capa.	112
Figura 5.53- Variogramas experimental construído com as amostras de cota da capa na direção azimutal de 112,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	112
Figura 5.54- Variogramas experimental construído com as amostras de cota da capa na direção azimutal de 22,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	112
Figura 5.55- Validação cruzada do atributo cota da capa da camada GCWS.	114
Figura 5.56- Mapa de correlação entre valores de cota da capa e suas estimativas.	114
Figura 5.57- Histograma para as estimativas de valores de cota da capa.	115
Figura 5.58- Mapa das estimativas de cota da capa obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de elevação da capa da camada GCWS.	116
Figura 5.59- Vista em perspectiva da capa da camada de carvão com os valores de elevação krigados.	116
Figura 5.60- Valores de vagarosidade média até a camada GCWS.	118
Figura 5.61- Histograma para as amostras de valores de vagarosidade média até a camada GCWS.	119
Figura 5.62- Histograma para as amostras desagrupadas de valores de vagarosidade média até a camada GCWS.	119
Figura 5.63- Variograma superficial construído com as amostras de vagarosidade média.	120
Figura 5.64- Variograma omnidirecional construído com as amostras de vagarosidade média e o modelo ajustado a esse variograma.	120
Figura 5.65- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 22,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	120

Figura 5.66- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média direção azimutal de 45o e o modelo ajustado a esse variograma.	121
Figura 5.67- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 67,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	121
Figura 5.68- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 90o e o modelo ajustado a esse variograma.	121
Figura 5.69- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 112,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	122
Figura 5.70- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 135o e o modelo ajustado a esse variograma.	122
Figura 5.71- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 157,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	122
Figura 5.72- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 180o e o modelo ajustado a esse variograma.	123
Figura 5.73- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade média.	124
Figura 5.74- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade média e suas estimativas.	124
Figura 5.75- Histograma para as estimativas de valores de vagarosidade média.	126
Figura 5.76- Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de vagarosidade média até a capa da camada GCWS.	126

Figura 5.77- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.	127
Figura 5.78- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.	127
Figura 5.79- Valores de velocidade média até a camada GCWS.	128
Figura 5.80- Histograma para as amostras de valores de velocidade média até a camada GCWS.	129
Figura 5.81- Histograma para as amostras desagrupadas de valores de velocidade média até a camada GCWS.	129
Figura 5.82- Variograma superficial construído com as amostras de velocidade média.	130
Figura 5.83- Variograma omnidirecional construído com as amostras de velocidade média e o modelo ajustado a esse variograma.	130
Figura 5.84- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 22,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	131
Figura 5.85- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média direção azimutal de 45o e o modelo ajustado a esse variograma.	131
Figura 5.86- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 67,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	131
Figura 5.87- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 90o e o modelo ajustado a esse variograma.	132
Figura 5.88- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 112,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	132
Figura 5.89- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 135o e o modelo ajustado a esse variograma.	132

Figura 5.90- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 157,5o e o modelo ajustado a esse variograma.	133
Figura 5.91- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 180o e o modelo ajustado a esse variograma.	133
Figura 5.92- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo velocidade média.	134
Figura 5.93- Mapa de correlação entre valores de velocidade média e suas estimativas.	134
Figura 5.94- Histograma para as estimativas de valores de velocidade média.	136
Figura 5.95- Mapa das estimativas de velocidade média obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de velocidade média até a capa da camada GCWS.	136
Figura 5.96- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.	137
Figura 5.97- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.	137
Figura 5.98- (a) Histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo vagarosidade média. (b) Histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo velocidade média.	138
Figura 5.99- Correlação entre valores de velocidade média obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média.	139
Figura 5.100- Correlação dos valores de desvio padrão (em m/s) obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média.	140
Figura 5.101- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.	142
Figura 5.102- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.	142

Figura 5.103- (a) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 2D. (b) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.	143
Figura 5.104- (a) Histograma das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 2D. (b) Histograma das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.	143
Figura 5.105- Correlação entre os valores obtidos por krigagem 2D e 3D em cada nó de grid interpolado.	143
Figura 5.106- Correlação entre os valores obtidos por krigagem 2D e 3D em cada nó de grid interpolado (valores acima da superfície topográfica foram desconsiderados).	144
Figura 5.107- Histograma dos valores de erro das estimativas de vagarosidade média encontradas por krigagem tridimensional.	145
Figura 6.1- Exemplos de variogramas gerados por krigagem ordinária e por simulação seqüencial Gaussiana para o atributo vagarosidade de onda acústica.	149
Figura 6.2- Procedimento gráfico para transformar a distribuição acumulada dos dados originais em uma distribuição normal padrão.	151
Figura 6.3- Histograma dos dados de vagarosidade de onda acústica normalizados.	151
Figura 6.4- Histograma acumulado dos dados de vagarosidade de onda acústica normalizados.	152
Figura 6.5- Variograma experimental vertical (dados normalizados) e seu modelo.	153
Figura 6.6- Variograma experimental omnidirecional (dados normalizados) e seu modelo.	153
Figura 6.7- Variograma experimental dos dados normalizados a 22,5° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	154
Figura 6.8- Variograma experimental dos dados normalizados a 45° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	154

Figura 6.9- Variograma experimental dos dados normalizados a 67,5° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	154
Figura 6.10- Variograma experimental dos dados normalizados a 90° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	155
Figura 6.11- Variograma experimental dos dados normalizados a 112,5° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	155
Figura 6.12- Variograma experimental dos dados normalizados a 135° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	155
Figura 6.13- Variograma experimental dos dados normalizados a 157,5° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	156
Figura 6.14- Variograma experimental dos dados normalizados a 180° (direção azimutal), mergulho 0o e seu modelo.	156
Figura 6.15- Variância das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).	163
Figura 6.16- Média das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).	163
Figura 6.17- Histograma dos valores das médias das 50 realizações (espaço normal).	164
Figura 6.18- Histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.	164
Figura 6.19- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a menor média.	165
Figura 6.20- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a maior média.	165
Figura 6.21- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a média igual a mediana das médias.	165
Figura 6.22- Seção horizontal (vista do plano XY) em várias elevações do grid resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.	166



- Figura 6.23- Seção vertical (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do grid resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 167
- Figura 6.24- Seção vertical (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do grid resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 167
- Figura 6.25- Seção horizontal (vista do plano XY) em várias elevações do grid resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 168
- Figura 6.26- Seção vertical (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do grid resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 168
- Figura 6.27- Seção vertical (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do grid resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 169
- Figura 6.28- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção vertical. 169
- Figura 6.29- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 45°. 170
- Figura 6.30- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 90°. 170
- Figura 6.31- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 135°. 170

- Figura 6.32- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 180°. 171
- Figura 6.33- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção vertical. Dados normalizados. 171
- Figura 6.34- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 45°. Dados normalizados. 171
- Figura 6.35- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 90°. Dados normalizados. 172
- Figura 6.36- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 135°. Dados normalizados. 172
- Figura 6.37- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 180°. Dados normalizados. 172
- Figura 6.38- Histograma para os valores E-type de todos nós simulados. 173
- Figura 6.39- (a) Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 174
- Figura 6.40- (a) Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) de várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas

estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 175

Figura 6.41- (a) Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica. 176

Figura 6.42- Histograma para os valores de desvio padrão obtidos a partir dos resultados gerados pelas simulações em cada um dos nós simulados. 177

Figura 6.43- Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do grid dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão. 178

Figura 6.44- Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do grid dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão. 179

Figura 6.45- Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do grid dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão. 179

Figura 6.46- (a) Seção vertical (vista do plano XZ), na coordenada Y igual a 7443850 m, do modelo de blocos de valores de vagarosidade de onda acústica obtidos por krigagem (coordenadas estratigráficas). (b) Seção vertical (vista do plano XZ), na coordenada Y igual a 7443850, do grid de valores de desvio

padrão resultantes da simulação de vagarosidade de onda acústica (coordenadas estratigráficas).	180
Figura 6.47- Histogramas de valores simulados para quatro nós de grid escolhidos entre os nós de mais altos valores de desvio padrão.	181
Figura 6.48- Histogramas de valores simulados para nós de grid escolhidos entre nós de baixos valores de desvio padrão (próximos a 10 $\mu$ s/ft).	182
Figura 6.49- Histograma dos valores de vagarosidade média obtidos pela simulação tridimensional.	183
Figura 6.50- Histograma dos valores de desvio padrão condicional das estimativas E-type de vagarosidade média.	183
Figura 6.51- (a) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem. (b) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por simulação.	184
Figura 6.52- Correlação entre os valores obtidos por krigagem e simulação em cada nó de grid.	184
Figura 6.53- Posições originais dos valores de vagarosidade média de cada furo perfurado (marcadas com cruces) e a nova posição desses valores (marcadas com círculos coloridos).	185
Figura 6.54- Correlação entre os valores de vagarosidade média em cada furo perfurado e de vagarosidade média obtidos por krigagem tridimensional.	186
Figura 6.55- Correlação entre os valores de vagarosidade média em cada furo perfurado e de vagarosidade média obtidos por simulação tridimensional.	186
Figura 6.56- Correlação entre os valores de vagarosidade média obtidos por krigagem tridimensional e de vagarosidade média obtidos por simulação tridimensional.	187
Figura 7.1- Histograma dos dados de velocidade de onda sísmica.	191
Figura 7.2- Histograma desagrupado dos dados de velocidade de onda sísmica.	191

Figura 7.3- Histograma dos dados normalizados de velocidade de onda sísmica.	191
Figura 7.4- Variância das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).	192
Figura 7.5- Média das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).	192
Figura 7.6- Histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.	193
Figura 7.7- Mapa dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.	194
Figura 7.8- Mapa dos valores de desvio padrão condicional dos valores de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.	194
Figura 7.9- Histograma dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.	195
Figura 7.10- Histograma dos valores de desvio padrão condicional dos valores de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.	195
Figura 7.11- Histograma para os valores de CI/2 em cada nó simulado.	198
Figura 7.12- Mapa dos valores de CI/2 em cada nó de grid.	198
Figura 7.13- Histograma para os valores de limite superior em cada nó de grid simulado.	199
Figura 7.14- Mapa dos valores de limite superior.	199
Figura 7.15- Histograma para os valores de limite inferior em cada nó de grid simulado.	199
Figura 7.16- Mapa dos valores de limite inferior.	200
Figura 7.17- Grid de tempos de propagação da onda sísmica a partir do datum sísmico até a capa da camada de carvão GCWS.	200
Figura 7.18- Grid dos valores de tempo com nós nas mesmas posições dos nós do grid de velocidade média.	201

Figura 7.19- Mapa dos valores de profundidade da camada GCWS em relação a elevação do datum sísmico.	202
Figura 7.20- Comparação entre valores de elevação obtidos com a multiplicação de tempos por velocidades médias e os valores de elevação das amostras de cota da capa.	202
Figura 7.21- Comparação entre valores de elevação obtidos com a multiplicação de tempos por velocidades médias e os valores de elevação das amostras de cota da capa.	203
Figura 7.22- Histograma para valores de erro obtidos com a diferença entre os valores de cota capa interpolados e de cota capa obtidos com a multiplicação de tempo por velocidade média.	204
Figura 7.23- Mapa de correlação entre os valores de cota capa interpolados e de cota capa obtidos com a multiplicação de tempo por velocidade média.	204

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.	88
Tabela 5.2- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.	89
Tabela 5.3- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.	115
Tabela 5.4- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.	125
Tabela 5.5- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.	135
Tabela 6.1- Resultados do teste de binormalidade.	159
Tabela 6.2- Características técnicas de diferentes tipos de computadores e tempos de processamento.	162

## Resumo

A modelagem de um depósito mineral é realizada por meio da combinação de diversas fontes de informações. Dentre estas fontes pode-se citar a sísmica de reflexão. A sísmica de reflexão fornece dados de tempos de propagação de ondas sísmicas até essas serem refletidas pelas estruturas dos depósitos minerais. As profundidades dessas estruturas podem ser obtidas multiplicando-se os tempos pelas velocidades de propagação das ondas sísmicas. Normalmente, a velocidade de uma onda sísmica é determinada indiretamente por meio do processamento dos próprios dados sísmicos, o que pode gerar erros na interpretação de seções geológicas. A perfilagem geofísica é uma alternativa na determinação dessa velocidade, uma vez que a velocidade de onda acústica é obtida ao longo do furo perfurado e a velocidade de onda acústica pode ser relacionada com a velocidade de onda sísmica. As estimativas de valores de velocidade na região entre os furos perfurados permite as estimativas de valores de profundidade nessa região. Neste estudo, foram analisadas possibilidades de se estimar, em um *grid*, valores de velocidade e incertezas associadas a esses valores, utilizando-se ferramentas geoestatísticas. A simulação seqüencial Gaussiana, dentre as ferramentas analisadas, pareceu ser a mais adequada para obtenção de velocidades e incerteza dos valores estimados em cada nó do *grid* considerado. Para o caso abordado, alguns valores de profundidade da estrutura de interesse apresentaram variações significativas em função da incerteza de velocidade. Essas variações são muito importantes na execução de certos métodos de lavra subterrânea, o que enfatiza a importância da determinação da incerteza das velocidades estimadas. A metodologia é apresentada e ilustrada em um importante depósito de carvão em Queensland, Austrália.



## Abstract

Modelling mineral deposits requires the use of all possible sources of information. An example of information's source is the reflection seismic. Reflection seismic supplies seismic wave's traveltimes until these waves are reflected by geological structures. The depths of these structures might be obtained multiplying the time by the seismic wave's velocities. Usually, seismic wave velocity is indirectly inferred by the collected seismic data processing. This process leads to error in the geological section construction. The sonic logging is an alternative to determine this velocity, since the sonic velocity is measured along the borehole logged. The sonic velocity can be related to the seismic velocity. The velocity's estimates among logged boreholes allow the depth's estimates at this region. Along this study, various methods to estimate, in a grid, velocity and its associated uncertainty using geostatistical tools were analyzed. Sequential Gaussian simulation, among the methods analyzed, led to the most suitable results for the velocity estimation and its estimation error at each grid node. In the case analysed, depth values determined for the structure of interest (German Creek coal seam) presented significant variations considering the range of velocity error. These variations in depth are deemed relevant for certain underground mining methods. The methodology is presented and illustrated in an important coal deposit from Queensland, Australia.

## **CAPÍTULO 1 - Introdução**

### **1.1 Introdução**

O conhecimento geológico de um depósito mineral é o fator mais importante no planejamento e na lavra desse depósito. Esse conhecimento envolve tanto aspectos de quantidade e qualidade do minério em questão, como a geometria e localização do corpo de minério, além do conhecimento das estruturas encaixantes e possíveis descontinuidades que afetam a localização da mineralização. Todas informações a respeito de um depósito mineral são utilizadas na criação do modelo desse depósito e quanto mais informações forem utilizadas, mais próximo da realidade será o modelo criado.

O modelo do depósito é baseado nas amostras deste depósito. Atualmente, no setor da mineração, essas amostras são normalmente coletadas por meio de furos de sonda (geralmente sondagem rotativa com recuperação de testemunhos). Este método é preferido, já que as amostras são coletadas diretamente na localização desejada. Contudo, esta técnica de amostragem demanda elevados custos (aproximadamente US\$ 100/m sondado), além de fornecer quantidades restritas e quasi-pontuais de amostras, o que dificulta a modelagem do depósito mineral.

Um método de amostragem muito utilizado na mineração de carvão e petróleo é o levantamento sísmico. Apesar desse método ser um método de amostragem indireta, ele pode ser muito acurado em condições favoráveis (como é o caso de típicos depósitos de carvão e petróleo), além de amostrar maiores áreas do que o tradicional método de sondagem a custos muito inferiores. Os métodos sísmicos medem os tempos que ondas sísmicas levam ao propagar-se através do substrato rochoso. Esses tempos podem ser relacionados com a geometria do corpo

de minério, das camadas rochosas encaixantes a esse corpo e das descontinuidades presentes nessa região.

As profundidades do corpo de minério, das rochas encaixantes e das descontinuidades podem ser obtidas multiplicando-se os tempos obtidos pelas velocidades de propagação das ondas sísmicas, usando a equação clássica da cinemática (uma demonstração dessa equação pode ser encontrada em Bonjorno (1985)).

As velocidades de propagação das ondas sísmicas podem ser inferidas por meio de processamentos dos próprios dados obtidos pela sísmica. Contudo, essas velocidades também podem ser obtidas utilizando uma relação linear entre velocidade de onda sísmica e velocidade de onda acústica. A vagarosidade, que é o inverso da velocidade de onda acústica, pode ser medida diretamente por meio da técnica denominada perfilagem acústica, desse modo os valores de velocidades das ondas sísmicas obtidos seriam mais acurados do que os obtidos por inferência sísmica.

A perfilagem acústica é um método que envolve baixos custos em relação a outros métodos de amostragem, o que torna, em termos econômicos, a realização dos dois métodos (sísmica e perfilagem acústica) ainda vantajosa com relação à realização de métodos como sondagem. Uma avaliação básica dos custos envolvidos na aplicação dos métodos citados é apresentada no Apêndice A.

Todavia, as informações obtidas por perfilagem acústica são restritas a região dos furos perfilados e a estimativa dessas informações em outros pontos do depósito pode melhorar a estimativa dos valores de profundidade, na região entre furos, obtidos pelo processamento sísmico. Essas estimativas podem ser realizadas por meio de métodos geoestatísticos, que além de estimar a vagarosidade, podem fornecer a incerteza associada a esses valores. Essa incerteza pode ser utilizada na determinação da incerteza das profundidades obtidas, o que seria de grande valia, por exemplo, na escolha do método de lavra do depósito mineral.

A geoestatística compreende o conjunto de métodos que tem por objetivo a estimativa de valores de um atributo, que são correlacionados no tempo e/ou espaço. Essas estimativas são feitas baseadas no modelo de continuidade temporal/espacial desse atributo.

É com a intenção de abordar a questão do cálculo de estimativas de valores de vagarosidade de ondas acústicas e a incerteza associada a essas estimativas, utilizando métodos geoestatísticos, que esse trabalho foi proposto.

## **1.2 Estado-da-Arte**

As velocidades de propagação das ondas sísmicas podem ser inferidas por meio de processamentos dos próprios dados obtidos pela sísmica, considerando o contraste de impedância acústica entre dois meios e a quantidade de energia que retorna a superfície (ver capítulo 2) conforme é apresentado em Thomas (2001). Outra alternativa de inferência de velocidades é por meio da técnica CDP (ver Apêndice B).

Thomas (2001) também comenta sobre a obtenção de velocidades de ondas sísmicas por meio da sísmica de poço, assim como Parasnis (1997). A sísmica de poço é uma técnica parecida com a perfilagem acústica, porém pode envolver custos mais elevados devido ao uso de cargas explosivas, o que não acontece na perfilagem acústica (ver Capítulo 2).

Parasnis (1997) também comenta que a velocidade de ondas sísmicas pode ser inferida por meio da técnica *continuous velocity log* (CVL), a qual foi primeiramente introduzida por Vogel (1952) e Summers e Broding (1952). Pode-se dizer, que a introdução desta técnica foi a primeira aplicação de perfilagem acústica.

Matheron (1963) apresenta o método geoestatístico denominado krigagem ordinária (OK). Esse método pode ser utilizado na estimativa de valores de atributos contínuos como é o caso da vagarosidade de ondas acústicas. Essa ferramenta pode fornecer, também, a incerteza associada a cada valor estimado pelo uso da variância de krigagem. Goovaerts (1997) comenta que essa incerteza considera apenas a distância variográfica (ver Capítulo 5) dos pontos estimados em relação às amostras, o que torna duvidosa o uso dessa técnica para análise da incerteza dos valores estimados. As técnicas de krigagem tiveram suas raízes nos estudos desenvolvidos por Krige (1951) em uma mina de ouro da África do Sul, porém estes estudos só foram terminados por Matheron (1963).

Isaaks (1990) introduz o método denominado simulação seqüencial Gaussiana (sGs), o qual pode ser usado na estimativa de valores de variáveis contínuas e na análise da incerteza dessas estimativas. Essa técnica propicia a criação de vários cenários (realizações) igualmente prováveis da distribuição espacial do atributo em estudo (ver Capítulo 6).

### **1.3 Meta**

Para o processamento dos dados de tempo coletados com métodos sísmicos, necessita-se de informações dos valores de velocidade com que as ondas sísmicas propagam-se através das rochas. Considerando, que os valores de profundidades para as estruturas, descontinuidades e camadas rochosas são inferidos com base nessas velocidades, este trabalho pretende avaliar possibilidades de se estimar valores de velocidade média de ondas sísmicas, quando essas se propagam a partir da superfície do terreno até uma determinada camada ou estrutura de interesse. Assim, um *grid* bidimensional de tempos de chegada de ondas que viajaram pelo mesmo trajeto, poderia ser processado com os valores de velocidade média, para obtenção de valores de profundidades de pontos pertencentes à camada de interesse.

Estas estimativas deverão ser realizadas utilizando valores de amostras obtidas por perfilagem acústica, visto que a velocidade de ondas sísmicas pode ser encontrada por uma simples conversão dos valores de vagarosidade de onda acústica. Além disso, esse trabalho pretende avaliar métodos para quantificar a incerteza das estimativas de velocidade média, visto que essas incertezas poderão ser usadas na análise de incerteza dos valores de profundidades.

### **1.4 Objetivos**

Com o intuito de alcançar as metas propostas neste trabalho, alguns objetivos foram traçados:

1. Obter valores de estimativas de vagarosidade de ondas acústicas e a incerteza associada a essas estimativas, por meio da interpolação em um *grid* tridimensional, utilizando amostras de perfilagem acústica combinadas a krigagem ordinária (Matheron, 1963) e utilizar essas estimativas na geração de valores de vagarosidade média;
2. Analisar a diferença nas estimativas dos valores de vagarosidade, em um *grid* tridimensional, utilizando valores de elevação em coordenadas geológicas (estratigráficas) e valores de elevação em coordenadas cartesianas, visto que a correlação espacial do atributo vagarosidade depende da estratigrafia do depósito;
3. Obter valores de estimativas de vagarosidade média de ondas acústicas e a incerteza associada a essas estimativas, por meio da interpolação em um *grid* bidimensional, utilizando amostras de vagarosidade média, geradas pela interpretação dos dados de perfilagem acústica, combinadas a krigagem ordinária (Matheron, 1963);
4. Analisar a diferença entre as estimativas de vagarosidade média de ondas acústicas e incerteza dessas estimativas utilizando *grids* tridimensionais e bidimensionais na etapa da krigagem ordinária;
5. Comparar valores resultantes de estimativas utilizando dados de vagarosidade média e dados de velocidade média, em um *grid* bidimensional, a fim de verificar o impacto da utilização de variáveis inversas como dados originais durante a krigagem ordinária;
6. Obter valores de estimativas de vagarosidade de ondas acústicas e a incerteza associada a essas estimativas, utilizando amostras de perfilagem acústica combinadas a simulação sequencial Gaussiana (Isaaks, 1990) e analisar o uso dessas estimativas na geração de valores de vagarosidade média;
7. Analisar a diferença entre as estimativas de vagarosidade média de ondas acústicas e incerteza dessas estimativas utilizando as duas técnicas citadas (OK e sGs);

8. Utilizar os valores finais de incerteza de velocidade média de onda sísmica no cálculo dos intervalos de confiança das estimativas, para que esses intervalos possam ser usados na determinação da incerteza das profundidades inferidas para a camada de interesse. Erros de amostragem gerados durante a aplicação do método sísmico e da perfilagem acústica também contribuem para a incerteza das profundidades encontradas. Embora esses erros sejam discutidos neste estudo, a incerteza causada por eles não será incluída nos resultados gerados.

Em vista dos objetivos propostos, este trabalho demanda um estudo de caso real. O depósito mineral estudado é um depósito de carvão, localizado no estado de Queensland na Austrália.

## **1.5 Metodologia**

A Figura 1.1 apresenta o esquema da metodologia utilizada neste estudo, a fim de cumprir os objetivos propostos.

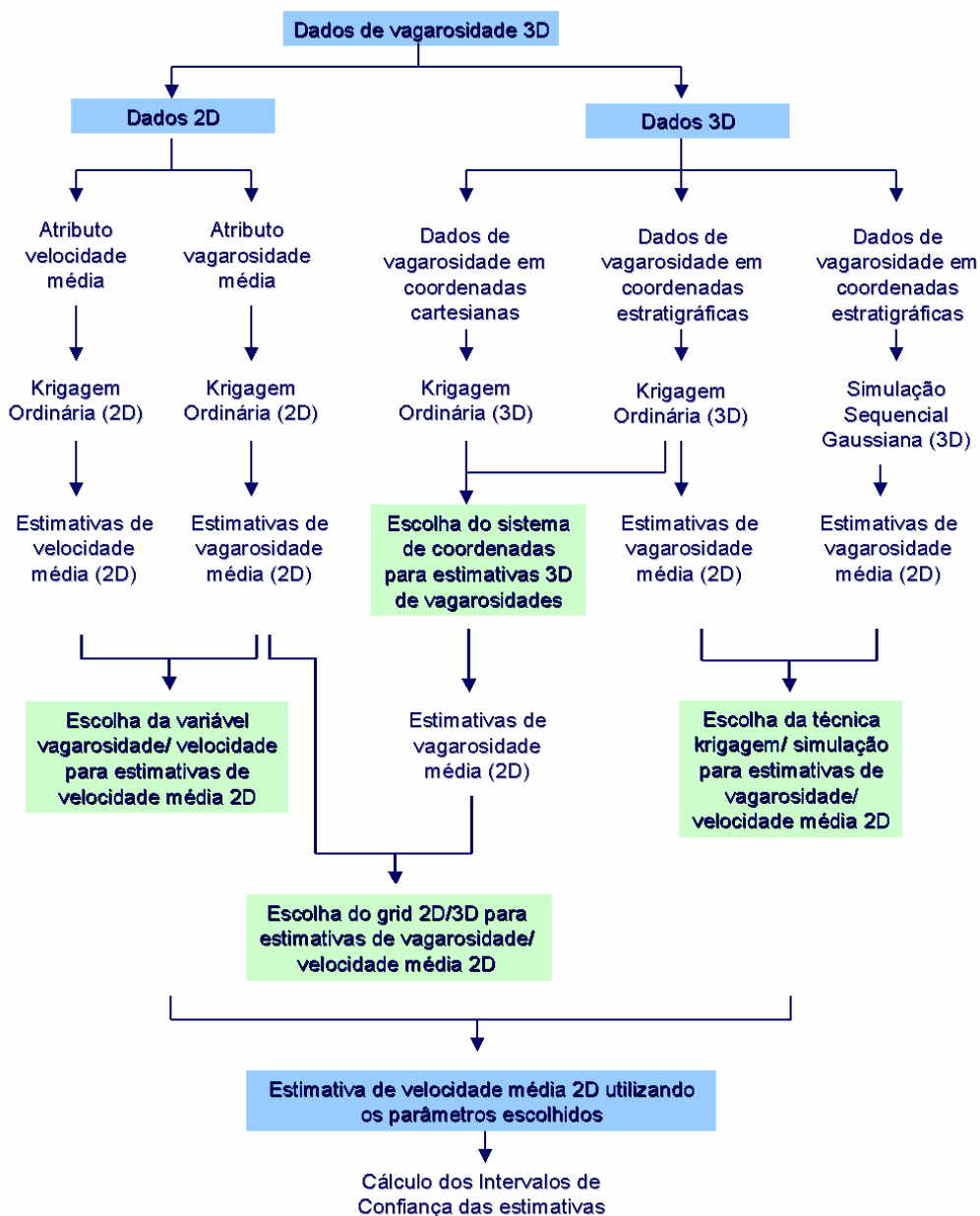


Figura 1.1- Esquema da metodologia utilizada neste estudo.

## 1.6 Organização da Dissertação

Essa dissertação está apresentada da seguinte forma:

Capítulo 1- Apresentação do problema e objetivos propostos neste trabalho.



Capítulo 2- Revisão bibliográfica sobre os dois métodos de amostragem geofísica abordados neste trabalho: sísmica e perfilagem acústica. Discussão sobre obtenção de profundidades utilizando dados de perfilagem acústica.

Capítulo 3- Transformação do banco de dados tridimensional, obtido durante a perfilagem acústica, com valores de elevação em coordenadas cartesianas em um banco de dados com valores de elevação em coordenadas geológicas (estratigráficas), a fim de utilizar esses dois bancos de dados nas estimativas dos valores de vagarosidade de ondas acústicas e nas estimativas das incertezas associadas a essas vagarosidades, em um *grid* tridimensional. Neste capítulo, também será apresentado o procedimento de como as estimativas obtidas com valores de elevação em coordenadas geológicas sofrerão a “retro-transformação” para o espaço original (elevação em coordenadas cartesianas).

Capítulo 4- Introdução do banco de dados tridimensional utilizado neste estudo, apresentação da estatística básica dos dados de vagarosidade obtidos durante a perfilagem acústica e desagrupamento dos dados de vagarosidade com valores de elevação em coordenadas geológicas e em coordenadas cartesianas.

Capítulo 5- Análise da continuidade espacial dos dados de vagarosidade de onda acústica com os valores de elevação em coordenadas cartesianas e com os valores de elevação em coordenadas geológicas. Krigagem ordinária do atributo vagarosidade de onda acústica usando banco de dados com elevação em coordenadas geológicas e usando banco de dados com elevação em coordenadas cartesianas. Escolha do banco de dados que resulte em modelos mais adequados das estimativas de vagarosidade de onda acústica. Análise da continuidade espacial dos dados bidimensionais de vagarosidade média de onda acústica e krigagem ordinária do atributo vagarosidade média em um *grid* bidimensional. Análise da continuidade espacial dos dados bidimensionais de velocidade média de onda acústica e krigagem ordinária do atributo velocidade média em um *grid* bidimensional. Comparação das estimativas de velocidade média usando dados de vagarosidade média e dados de velocidade média. Comparação das estimativas de vagarosidade média e incerteza associada a essas estimativas utilizando *grids* bidimensionais e tridimensionais.

Capítulo 6- Análise da continuidade espacial dos dados de vagarosidade de onda acústica que serão usados na simulação seqüencial Gaussiana (dados

normalizados). Simulação seqüencial Gaussiana tridimensional do atributo vagarosidade de onda acústica utilizando dados em coordenadas estratigráficas, e validação das simulações realizadas. Comparação entre os resultados obtidos por krigagem ordinária e simulação seqüencial Gaussiana a fim de escolher o algoritmo apropriado para fornecer valores de estimativas de vagarosidade média e incertezas associadas a esses valores.

Capítulo 7- Estimativas finais de velocidade média de onda sísmica e da incerteza associada a essas estimativas utilizando as melhores alternativas encontradas durante o trabalho. Cálculo do Intervalo de Confiança de cada estimativa. Obtenção de valores de profundidade da camada de interesse, ao longo da área em estudo.

Capítulo 8- Conclusões obtidas durante o estudo e recomendações para trabalhos futuros que possam complementar este estudo.

## **CAPÍTULO 2 - Geofísica Aplicada a Determinação de Profundidades de Litologias**

Geofísica é a ciência que estuda a formação das rochas da crosta terrestre e as propriedades físicas dessas rochas, além de suas geometrias, aplicando princípios da ciência física (Parasnis, 1997). Nesse estudo, dois métodos geofísicos são analisados: sísmica e perfilagem acústica de furo de sonda (perfilagem acústica é um tipo de perfilagem geofísica). Este capítulo discute os princípios desses dois métodos e como os resultados desses métodos podem ser combinados para a determinação de profundidades de litologias.

### **2.1 Sísmica**

O levantamento sísmico pode, em condições favoráveis, fornecer dados acurados a respeito das profundidades das camadas rochosas dentro da área em estudo. Durante o levantamento sísmico, ondas são geradas artificialmente. Essas ondas viajam através das rochas e são recebidas por dispositivos (ou receptores) chamados geofones (no levantamento terrestre) ou hidrofones (no levantamento marítimo), os quais medem o tempo de viagem da onda a partir do ponto onde ela foi gerada até a chegada no receptor.

#### **2.1.1 Ondas**

Uma onda pode ser representada como é descrito na Figura 2.1.

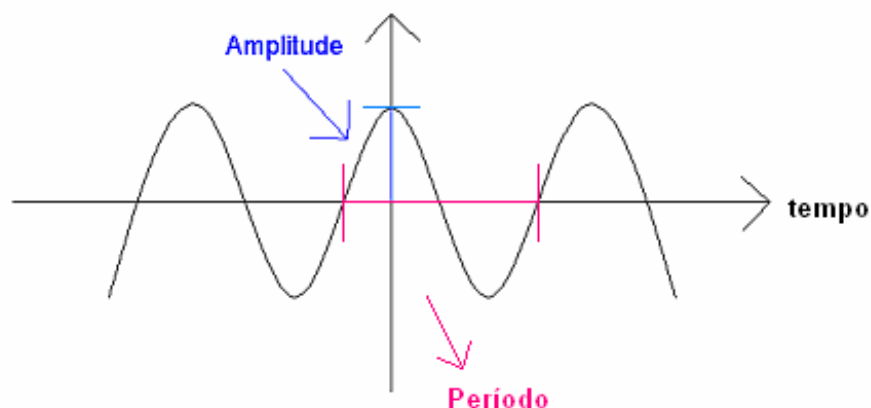


Figura 2.1- Representação de uma onda. Modificado de Robertson (2003).

Amplitude como é descrita na Figura 2.1 é relacionada à energia da onda e o período é o tempo de movimento de um ciclo. Outros elementos são usados para descrever uma onda (ou sinal) (Robertson, 2003):

- Freqüência - número de ciclos dentro da unidade de tempo. A Freqüência é o inverso do período.
- Comprimento de onda – Distância de um ciclo. Por exemplo, se a velocidade da onda e o número de ciclos dentro da unidade de tempo são conhecidos, então o comprimento de onda pode ser calculado ( $\text{Velocidade} = \text{Freqüência} \times \text{Comprimento de Onda}$ ).
- Fase – Medida do deslocamento do pico central a partir do tempo zero.

### **2.1.1.1 Geração de Ondas**

Suponha que as rochas sejam compostas por elementos cúbicos infinitesimais. As ondas sísmicas são geradas nas rochas devido a uma força externa (ver seção 2.1.2) aplicada sobre alguns desses elementos. Esses elementos são deformados enquanto a força é aplicada.

Geralmente, as rochas apresentam um comportamento elástico quando uma força externa, gerada durante a realização da sísmica, é aplicada nessas rochas

(Dobrin e Savit, 1988). Isso significa, que elementos infinitesimais das rochas são deformados durante a aplicação da força e retornam às suas formas e/ ou volumes iniciais depois que a força cessa.

A deformação nesses elementos causa deformação nos elementos ao redor e assim por diante. Portanto, por meio dessa seqüência, ondas sísmicas são geradas e viajam longas distâncias, em diferentes direções, até perderem toda energia e desaparecerem.

Existem diferentes tipos de deformações, dependendo do tipo de força atuante (Dobrin e Savit, 1988):

- deformação causada por força de compressão – Existe deformação, mas os ângulos entre as arestas de um cubo infinitesimal permanecem os mesmos;
- deformação causada por força de tração – Existe deformação de volume, mas os ângulos entre as arestas do cubo permanecem os mesmos;
- deformação causada por força de cisalhamento – Os ângulos entre as arestas do cubo são modificados (deformação de forma), mas o volume do elemento permanece o mesmo.

A Figura 2.2 descreve os tipos de deformação:

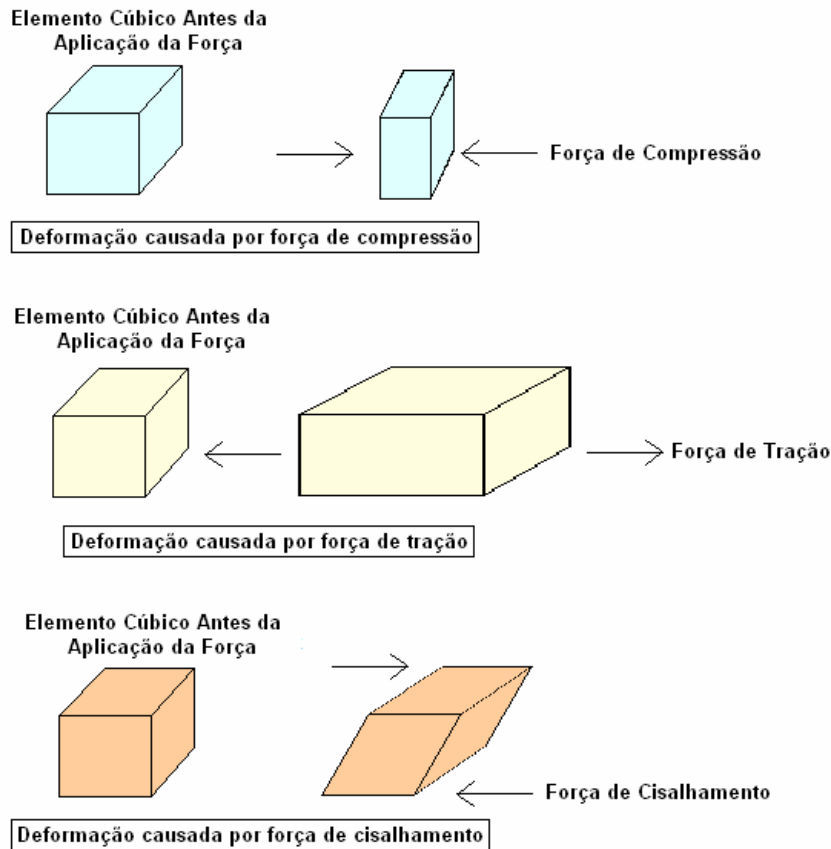


Figura 2.2- Tipos de deformações.

### 2.1.1.2 Tipos de Ondas

Muitos tipos de ondas podem ser observados durante a realização do levantamento sísmico. Ondas de compressão (ou longitudinais) e ondas de cisalhamento (ou transversais) são as ondas mais comuns e a combinação destas pode gerar outros tipos de ondas.

A velocidade de uma onda sísmica depende de fatores como o tipo de onda sísmica e da densidade da rocha por onde a onda se propagou.

Ondas de compressão são as ondas mais importantes para a sísmica, visto que estas ondas são as mais rápidas e por isso, as primeiras a serem captadas pelos receptores. Devido a isto, elas também são chamadas de Ondas primárias ou Ondas - P.

Durante a propagação da onda de compressão, os elementos vibram ao longo da mesma direção de propagação da onda. A Figura 2.3 mostra o esquema da vibração dos elementos na presença da onda de compressão.

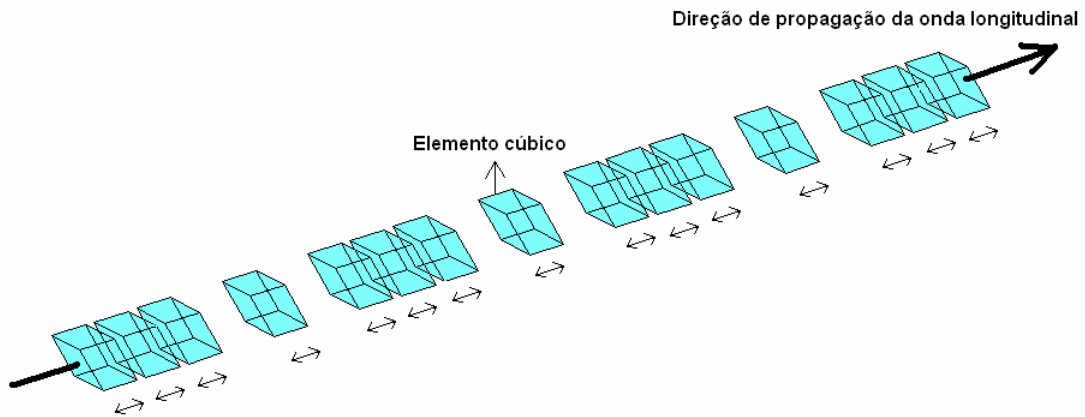


Figura 2.3- Esquema da vibração dos elementos devido a propagação da onda de compressão.

Durante a propagação da onda de cisalhamento, os elementos vibram ao longo de uma direção perpendicular a direção de propagação da onda. A Figura 2.4 mostra o esquema da vibração dos elementos na presença de uma onda de cisalhamento.

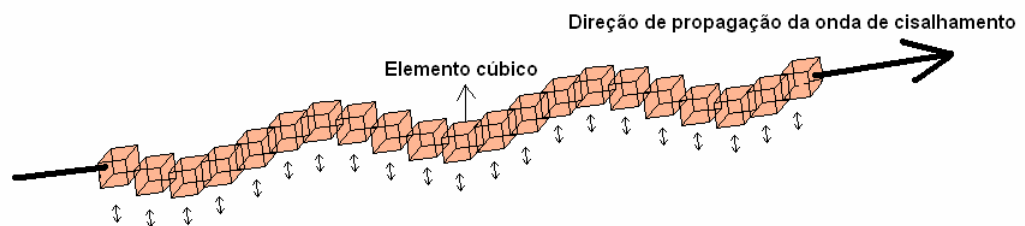


Figura 2.4- Esquema da vibração dos elementos na presença de uma onda de cisalhamento.

### **2.1.2 Geração de Força**

As fontes de força mais usadas no levantamento sísmico terrestre são as detonações, usando dinamite e/ou ANFO, e equipamentos construídos para causar

grandes vibrações no terreno (Thomas, 2001). As concentrações de dinamite ou ANFO dependem da quantidade de energia exigida para se obter registros bons e claros. Altas concentrações de explosivos produzem uma grande quantidade de energia que causa perturbações nos registros, enquanto baixas concentrações produzem ondas com baixa energia, as quais não podem ser detectadas pelos receptores.

### **2.1.3 Operação dos Receptores**

Existem dois tipos de receptores de ondas sísmicas; geofones e hidrofones. Os geofones são usados nas amostragens sísmicas terrestres, enquanto os hidrofones são usados nas amostragens sísmicas marítimas. Os receptores transformam impulsos mecânicos em impulsos elétricos, os quais são, depois disso, registrados (Thomas, 2001). Esta seção descreve a operação dos geofones, visto que este estudo compreende uma campanha de levantamento sísmico terrestre.

Geralmente, geofones são construídos suspendendo uma bobina ao redor de um ímã. O ímã pode movimentar-se livremente em relação à bobina. Esse movimento do ímã, o qual é acoplado verticalmente no terreno, gera um fluxo magnético que cria uma corrente induzida na bobina. Assim, o impulso mecânico é transformado em impulso elétrico (Anon, 1995).

Os impulsos elétricos são registrados ao longo do tempo, e são relacionados às ondas sísmicas (e seus componentes) que são captadas pelos receptores.

### **2.1.4 Sísmica de Reflexão e Sísmica de Refração**

As ondas sísmicas apresentam diferentes velocidades quando elas propagam-se através de diferentes tipos de rochas. Quando uma onda sísmica alcança uma interface, localizada entre diferentes tipos de rochas, e a onda sísmica



alcança essa interface através da rocha que causa menor velocidade de propagação da onda, esta onda pode ser refletida, refratada ou transmitida:

- quando ondas sísmicas alcançam uma interface e retornam ao mesmo meio de propagação, elas são chamadas ondas refletidas;
- quando ondas sísmicas alcançam uma interface, com um ângulo crítico e começam a propagar-se na mesma direção da interface, elas são chamadas ondas refratadas;
- quando ondas sísmicas alcançam uma interface e começam a propagar-se no meio que aumenta a velocidade dessa onda, elas são chamadas ondas transmitidas. Essas ondas também são refratadas, visto que o que o ângulo de incidência é modificado, contudo serão chamadas apenas de ondas transmitidas a fim de serem diferenciadas das ondas refratadas citadas no item anterior.

A Figura 2.5 apresenta as ondas refletidas, refratadas e transmitidas.

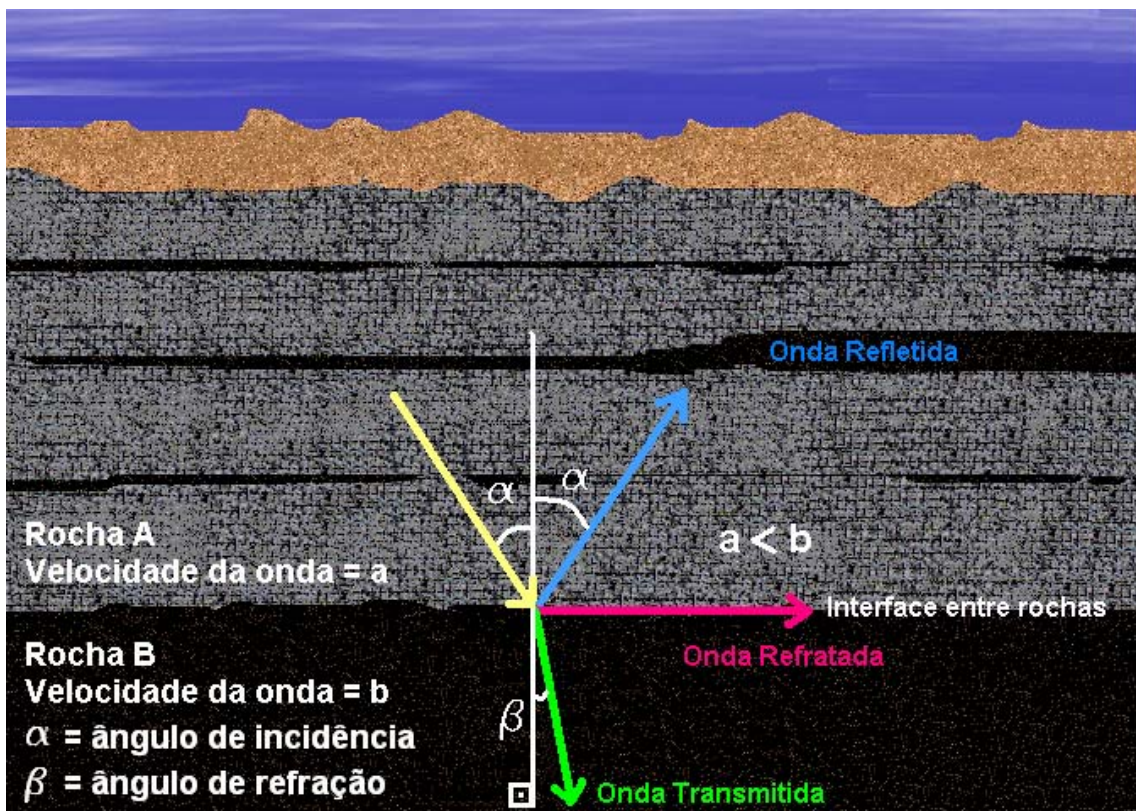


Figura 2.5- Descrição da formação de ondas refletidas, refratadas e transmitidas.

A sísmica pode registrar ondas refletidas e refratadas, sendo dividida em sísmica de reflexão e sísmica de refração, respectivamente. A diferença entre elas está na distância exigida entre as fontes e os receptores. Sísmica de refração é usada quando são exigidas grandes distâncias entre as fontes e os receptores.

### **2.1.5 Fontes de Erros com Métodos Sísmicos**

A forma com que os dados sísmicos são registrados e como eles são processados geram nos produtos finais (sismogramas) erros. Algumas dessas fontes de erros são a deconvolução, o empilhamento, a migração, as correções estáticas, correções de ruídos, múltiplas reflexões, entre outras. Algumas dessas fontes de erros são comentadas no Anexo B.

### **2.1.6 Inferência da Velocidade com Dados Sísmicos**

Segundo Thomas (2001), o método sísmico de reflexão permite que as velocidades de propagação das ondas sísmicas possam ser inferidas através de processamentos dos próprios dados obtidos pela sísmica. Quando as ondas sísmicas alcançam uma interface entre dois meios que causam diferentes velocidades de propagação, parte da energia dessa onda é refletida. A quantidade de energia que será refletida depende do contraste de impedância acústica entre esses meios. A chamada impedância acústica é o produto da densidade do meio pela velocidade de propagação da onda sísmica, quando essa se propaga através desse meio.

A velocidade, além de outros fatores, é função da densidade do meio. Por isso, Thomas (2001) explica que através do processamento criterioso dos valores de energia captados pelos receptores, pode-se inferir valores de impedâncias acústicas. Assim, através de valores de impedâncias acústicas pode-se inferir valores de velocidade de propagação de uma onda sísmica. Thomas (2001) comenta, também, outra alternativa de inferência de velocidades através da técnica CDP, essa técnica

é explicada no Anexo B. Porém, a obtenção da velocidade por Perfilagem Acústica (ver seção 2.2.6) pode permitir a obtenção de valores mais acurados do que os valores obtidos com o uso das impedâncias acústicas registradas e da técnica CDP.

Parasnis (1997) e Thomas (2001) comentam sobre a obtenção de velocidades de ondas sísmicas através da sísmica de poço. Neste tipo de sísmica, geofones são colocados ao longo de furos feitos na região do depósito. Parasnis (1997) explica que cargas podem ser detonadas na superfície próxima ao furo. Assim, sabendo-se a distância entre o geofone que se encontra dentro do furo e a carga detonada, pode-se calcular a velocidade da onda sísmica.

Thomas (2001) explica que diferentes receptores podem ser instalados dentro do furo. A diferença dos tempos de chegada da onda sísmica nos diferentes receptores possibilita o cálculo da velocidade de propagação da onda sísmica, já que a distância entre os diferentes receptores é conhecida. Contudo, a utilização da sísmica de poço para obtenção de valores de velocidade, pode envolver mais custos do que a utilização da perfilagem acústica de furo de sonda e valores menos acurados.

## **2.2 Perfilagem Geofísica de Furo de Sonda**

Atualmente, os métodos de perfilagem geofísica de furo de sonda são muito utilizados para auxiliar a interpretação dos dados obtidos na sísmica. Os dados obtidos por esses métodos são coletados ao longo dos furos perfilados. A execução desses métodos é mais fácil e demanda custos menores, em amostragens de grande escala, do que outros métodos como sondagem.

Os métodos de perfilagem sísmica medem várias propriedades físicas que podem ser associadas com uma dada litologia como por exemplo: teor de elemento ou de um mineral, resistividade elétrica, orientação do campo de tensões in-situ, frequência de fraturas e porosidade (Firth, 2004).

Alguns tipos de perfilagem geofísica são:

- perfilagem nuclear;

- perfilagem acústica;
- perfilagem elétrica;
- perfilagem utilizando caliper.

Os diferentes tipos de perfilagem de furo de sonda são geralmente realizados utilizando os seguintes materiais:

- sonda de perfilagem;
- cabo elétrico e um dispositivo para acoplar o cabo na sonda;
- guincho para puxar e liberar o cabo elétrico, com um sistema que controle a profundidade do cabo;
- computador portátil;
- sistema de interface (entre a sonda e o computador).

As Figuras 2.6 a 2.8 ilustram alguns dos materiais mencionados.



**Figura 2.6-** Sonda de perfilagem sendo introduzida no furo. Fonte: Oliveira et al. (2004).

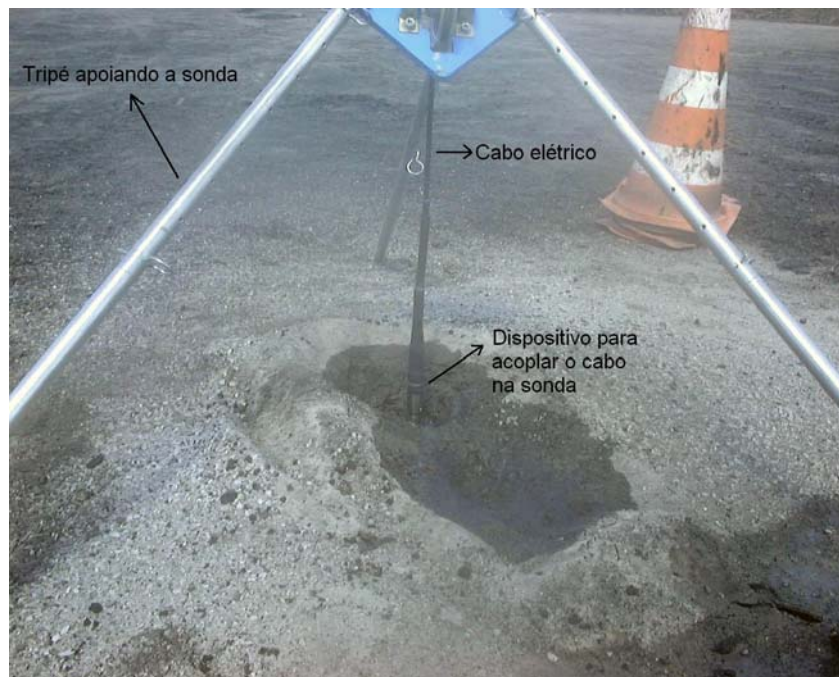


Figura 2.7- Sonda de perfilagem descendo ao longo do furo. Fonte: Oliveira et al. (2004).



Figura 2.8- Guincho segurando a sonda de perfilagem. Fonte: Oliveira et al. (2004).

### **2.2.1 Operação de Perfilagem e Materiais Utilizados**

Existe um tipo de sonda de perfilagem para cada tipo de propriedade física que será estudada, contudo, o princípio envolvendo a operação dessa ferramenta é basicamente o mesmo para todos tipos de perfiladores. Todas as sondas incluem uma fonte e um receptor. A sonda envia um sinal (através da fonte) para a parede do furo e cada tipo de rocha, constituinte da parede do furo, responderá de forma característica. Esta resposta será registrada pela sonda (através dos receptores), enquanto a sonda percorre o furo.

Ao longo dessa operação muitos sinais são enviados e recebidos por segundo pela sonda. Ambos os sinais, enviados e recebidos pela sonda, são controlados por um software presente no computador móvel.

O sistema de interface traduz os sinais da linguagem do computador para a linguagem da sonda e vice-versa, provendo uma ligação entre o computador e a sonda. O sistema de interface envia sinais para a sonda e recebe sinais desta através do dispositivo que acopla o cabo elétrico na sonda e do próprio cabo.

O guincho faz a ligação entre o sistema de interface e o cabo elétrico, além de controlar a profundidade e a velocidade da sonda ao longo do furo. A Figura 2.9 apresenta um esquema da configuração da operação de perfilagem.

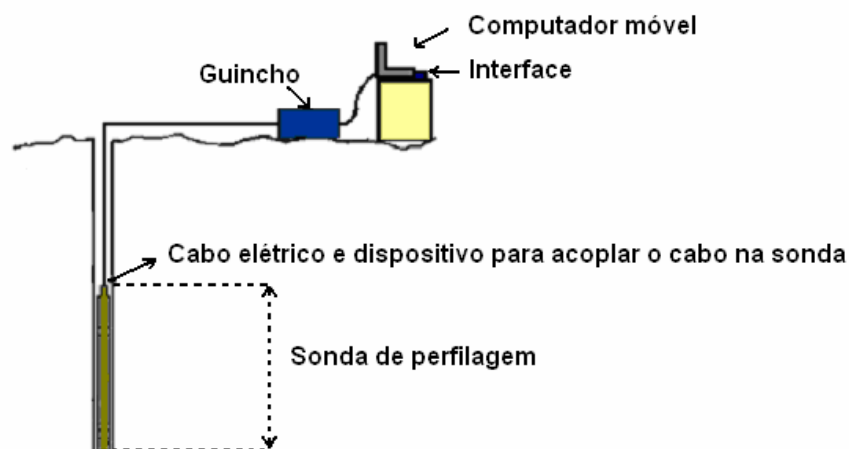


Figura 2.9- Esquema da configuração da operação de perfilagem.

Os dados de campo são registrados em um arquivo de formato binário, o qual exige menor capacidade de armazenamento do que a maioria dos outros formatos. Este arquivo é convertido do formato de campo para um formato reconhecido internacionalmente (Firth, 2004). Um formato comum para o qual o arquivo de campo é convertido é o chamado LAS (Log ASCII Standard).

LAS é um formato simples, que pode ser visto por qualquer programa editor de texto ou editor de planilhas. Os dados são registrados em colunas, com cada coluna mostrando as propriedades físicas em diferentes profundidades, medidas por diferentes tipos de sondas (se mais do que um tipo de perfilagem foi realizado). O arquivo apresenta também, um cabeçalho, contendo algumas informações sobre o furo perfurado.

Os dados de vagarosidade usados neste estudo foram obtidos em arquivos do tipo LAS. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de parte de um arquivo LAS.

```

~VERSION INFORMATION
#MNEM.UNIT      DATA      DESCRIPTION OF MNEMONIC
#-----
VERS.  2.0      :CMLS LOG ASCII STANDARD-VERSION 2.0
WRAP.  NO      :ONE LINE PER DEPTH STEP
#####
~WELL INFORMATION
#MNEM.UNIT      DATA      DESCRIPTION OF MNEMONIC
#-----
STRT.M          .100 :START DEPTH
STOP.M          217.150 :STOP DEPTH
STEP.M          .050 :STEP
NULL.          -999.25 :NULL VALUE
COMP.          AG (0.2m) :CASINGFROM1
WELL.          R10918 :Well
FLD .          :Fluid Level
LOC .          N/A :LOCATION
PROV.          01/06/2001 :Print Date:
SRVC.          :Scale of Log
DATE.          01/06/2001 :Date
UWI .          N/A :UNIQUE WELL ID
#####
~CURVE INFORMATION
#MNEM.UNIT      DATA      DESCRIPTION OF MNEMONIC
#-----
DEPT.M          :DEPTH
NEUT.          :Neutron (cps)
DELT.          :delta t (us/ft)
#####
~A      DEPT      NEUT      DELT
      18.250      305.000000      109.755997
      18.300      291.000031      112.147980
      18.350      309.000000      110.414001
      18.400      365.000000      109.755997
      18.450      287.000000      109.755997
      18.500      314.000000      109.755997
      18.550      270.000488      104.994972
      18.600      304.000000      106.038002
    
```

Figura 2.10- Exemplo de parte de um arquivo LAS.

### **2.2.2 Ambiente do Furo Perfilado**

Os tipos de perfilagem acústica e elétrica só podem ser realizados em furos preenchidos com algum tipo de fluido, visto que ondas acústicas (ver seção 2.2.6) e correntes elétricas (ver seção 2.2.4), respectivamente, exigem um fluido para propagar da sonda para a parede do furo e vice-versa. O ambiente padrão para estes tipos de perfilagem é o furo-aberto (sem revestimento nas paredes do furo) preenchido com água fresca.

### **2.2.3 Perfilagem Nuclear de Furo de Sonda**

Os tipos de perfilagem nuclear são baseados em medidas de partículas ou radiação gama emitidas de átomos, que compõem os minerais que constituem as rochas atravessadas pelo furo. Esta seção apresenta dois exemplos deste tipo de perfilagem.

#### **2.2.3.1 Perfilagem de Raios Gama**

A perfilagem de raios gama mede os raios gama naturais (captados pelos receptores) que são emitidos pela série de elementos químicos formados a partir da desintegração de isótopos de U, Th, e K (Hartman, 1992). Nenhum sinal é emitido pela sonda neste tipo de perfilagem.

Alguns tipos de rochas, tais como granito, contêm alta quantidade de isótopos, assim, na medida que a sonda atravessa estas rochas, altas quantidades de raios gama naturais serão registradas. Inversamente, sondas que atravessam litotipos como carvão, que apresentam baixa quantidade desses isótopos, registrarão baixos valores para raios gama naturais.



### 2.2.3.2 Perfilagem Gama-Gama

A perfilagem gama-gama mede interações entre os raios gama emitidos pela sonda de perfilagem e os elétrons dos átomos, que compõem as rochas atravessadas pela sonda. A fonte de raios gama normalmente é o Césio 137.

A principal interação que ocorre neste tipo de perfilagem é o chamado Efeito Compton. Nessa interação, os raios gama, emitidos pela sonda de perfilagem, colidem com os elétrons de átomos pertencentes à formação rochosa que compõe a parede do furo e são espalhados. A quantidade de raios gama espalhados que são detectados pelos receptores depende da densidade de elétrons dos átomos atravessados pelos raios gama. A densidade de elétrons e a densidade *bulk*<sup>1</sup> podem ser relacionadas como mostra a equação 2.1 (Firth, 2004):

$$\rho_e = 2 \frac{Z}{A} \rho_b$$

(2.1)

onde:

Z= Número atômico (Número de *prótons* pertencentes a um átomo);

A= Massa atômica;

$\rho_e$ = Densidade de elétrons;

$\rho_b$ = Densidade *bulk*.

A densidade *bulk* das rochas atravessadas pela sonda de perfilagem gamma-gamma pode ser determinada baseando-se na relação entre densidade de elétrons e densidade *bulk*. A razão Z/A é 0,5 para a maioria das rochas e minerais. Portanto, a densidade *bulk* e a densidade de elétrons são consideradas iguais. Água é uma exceção para esta regra (Z/A é 0,555), assim, rochas porosas, que podem

---

<sup>1</sup> Densidade *bulk* é a massa total da unidade de volume preenchida com partículas. A massa relacionada com o material que preenche os poros entre as partículas é adicionada à massa das partículas no cálculo da massa total.

reter água, devem ter a densidade de elétrons corrigida a fim de determinar a densidade *bulk* (Firth, 2004).

Conforme Hoffman et al. (1982), a função resposta, que representa a quantidade de raios-gamma detectados versus a densidade das rochas, tem a forma semelhante a da função apresentada na figura 2.11. A densidade das rochas pode ser tão grande que a “volta” dos raios-gamma espalhados para a sonda é dificultada e a contagem desses raios diminui.

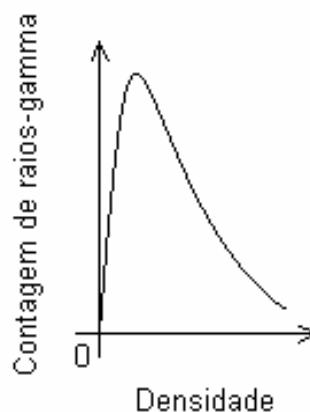


Figura 2.11- Contagem de raios-gamma versus densidade. Modificado de Hoffman et al. (1982).

## **2.2.4 Perfilagem Elétrica de Furo de Sonda**

Este tipo de perfilagem é baseado na medida das propriedades elétricas das rochas que são atravessadas pelo furo. Um dos tipos de perfilagem elétrica mais utilizados é a perfilagem de resistividade.

### **2.2.4.1 Perfilagem de Resistividade**

A perfilagem de resistividade mede a resistividade (propriedade física do material relacionada com a capacidade natural do material de conduzir eletricidade) das camadas rochosas. Uma diferença de potencial é gerada entre dois pontos, um

na sonda e outro na superfície do terreno ao lado da boca do furo perfilado. Esta diferença de potencial gera um fluxo de corrente (sinal), que percorre as rochas e é medida pelos receptores.

A corrente viaja da sonda para a parede do furo e daí para a sonda através de um fluido. Dependendo da resistividade da rocha, o fluxo de corrente será alto ou baixo. O carvão não é um bom condutor de eletricidade, então sua resistividade é alta e o fluxo de corrente medido será baixo quando comparado ao fluxo de corrente medido para outros tipos de rochas (Hartman, 1992).

### **2.2.5 Perfilagem Utilizando Caliper**

O caliper é um dispositivo mecânico que abre (ou fecha, como se fosse o braço da sonda de perfilagem) enquanto a sonda movimenta-se ao longo do furo em direção a superfície do terreno. A abertura do caliper varia proporcionalmente ao diâmetro do furo.

A perfilagem com caliper é usada na avaliação da qualidade dos resultados obtidos por outros tipos de perfilagem, já que este tipo de perfilagem mede a variação do diâmetro do furo ao longo de sua extensão. O diâmetro do furo influencia as medidas de alguns tipos de sonda como perfilagem gama-gama (Firth, 2004). A perfilagem com caliper também pode ser utilizada no estudo da resistência mecânica das diferentes camadas rochosas atravessadas pelo furo.

### **2.2.6 Perfilagem Acústica de Furo de Sonda**

Este tipo de perfilagem foi usado neste estudo de caso. Em vista desse fato, o assunto perfilagem acústica de furo de sonda será discutido com mais detalhes na seção 2.3.

### **2.3 Perfilagem Acústica de Furo de Sonda e Fatores de Influência**

Perfilagem Acústica mede parâmetros de uma onda acústica (onda compressional) que viaja através das rochas. O parâmetro mais importante para este estudo é o tempo (*Interval Transit Time*) que uma onda acústica leva para propagar-se ao longo de parte da parede do furo perfilado. Este tempo depende das formações rochosas presentes ao longo do caminho percorrido (Jorden e Campbell, 1986).

A onda acústica enviada pela fonte viaja a partir da sonda de perfilagem até a parede do furo, na forma de onda compressional. Quando a onda compressional encontra a parede do furo, parte de sua energia é refratada e a onda compressional é transformada em onda compressional e onda de cisalhamento, sendo a onda compressional mais rápida do que a onda de cisalhamento.

A qualquer momento parte da energia dessas ondas volta para a sonda de perfilagem e é detectada pelo receptor. As ondas viajam a partir da sonda de perfilagem até a parede do furo através de um fluido e vice-versa. Não existem ondas de cisalhamento nos fluidos, portanto a energia das ondas de cisalhamento é transformada em onda compressional, quando as ondas de cisalhamento viajam de volta para a sonda de perfilagem.

A perfilagem acústica gera vários pulsos de ondas durante sua execução e novas ondas podem chegar até o receptor enquanto ondas antigas ainda estão chegando no mesmo receptor. Ondas antigas possuem menos energia, assim, a maioria das sondas de perfilagem identifica as ondas usando um limite de energia que pode ser detectada nos receptores.

Quando o *Interval Transit Time* é dividido pelo comprimento da parte do furo perfilado através da qual a onda se propagou, obtém-se a medida da vagarosidade. Assim, a perfilagem acústica registra a vagarosidade. A vagarosidade é normalmente apresentada nas seguintes unidades: microsegundos/m ou microsegundos/ft. A vagarosidade é o inverso da velocidade, e por isso, quando se têm valores de vagarosidade têm-se também valores de velocidade. As leituras de

vagarosidade de onda acústica (amostras) usadas neste estudo foram medidas em microsegundos por pé.

A perfilagem acústica pode ser usada para inferir várias propriedades físicas das rochas (por exemplo, a porosidade), identificar as litologias atravessadas pela sonda de perfilagem e para a conversão dos dados obtidos pela sísmica em valores de profundidades (ver seção 2.4).

### **2.3.1 Sondas de Perfilagem Acústica**

Esta seção descreverá duas configurações que podem ser usadas na perfilagem acústica.

#### **2.3.1.1 Uma Fonte e Um Receptor**

Algumas sondas de perfilagem são construídas com uma fonte e um receptor (sondas de perfilagem com um receptor). A vagarosidade é medida dividindo o tempo total que a onda acústica leva para viajar a partir da fonte até o receptor (viajando através do fluido entre a fonte e a parede do furo, da própria parede do furo, e do fluido entre a parede do furo e o receptor) pela distância entre eles. Se o tempo gasto pela onda acústica viajando através do fluido não for pequeno, esse tempo deveria ser reduzido do tempo total.

O tempo gasto pela onda acústica no fluido, depende do diâmetro do furo perfilado, do diâmetro da sonda de perfilagem, e da velocidade da onda compressional no fluido. Como esses parâmetros podem variar, a vagarosidade medida pela sonda de perfilagem com um receptor é menos acurada do que a vagarosidade medida pela sonda de perfilagem com dois receptores (ver seção 2.3.1.2) (Jorden e Campbell, 1986).

A Figura 2.12 mostra um esquema do caminho percorrido por uma onda acústica a partir da fonte até o receptor de uma sonda de perfilagem com um receptor.

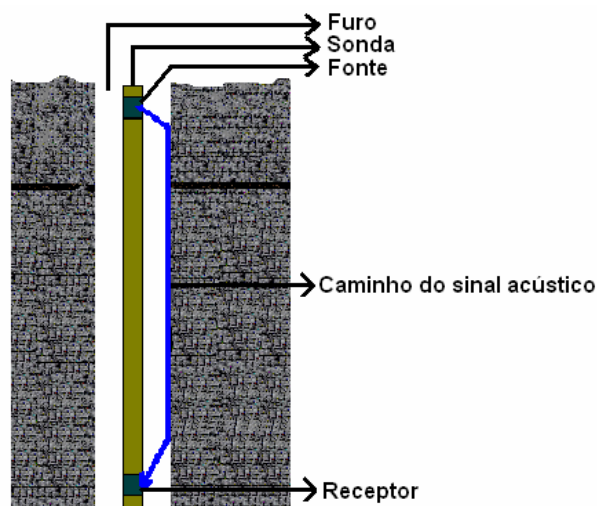


Figura 2.12- Esquema do caminho percorrido por uma onda acústica a partir da fonte até o receptor de uma sonda de perfilagem com um receptor. Modificado de Jorden e Campbell (1986).

### **2.3.1.2 Uma Fonte e Dois Receptores**

Algumas sondas de perfilagem são construídas com uma fonte e dois receptores (sonda de perfilagem com dois receptores). A vagarosidade é medida dividindo o tempo que a onda acústica leva para viajar entre os dois receptores (parte da energia é detectada pelo primeiro receptor e parte da energia é detectada pelo segundo receptor) pela distância entre os dois receptores.

Essa medida de vagarosidade é mais acurada do que a medida feita pela sonda de perfilagem com um receptor, visto que esta medida não considera o tempo que a onda gasta para percorrer o fluido (o tempo de chegada da onda detectada no primeiro receptor é reduzido do tempo de chegada da onda detectada pelo segundo receptor e o tempo gasto pela onda para percorrer o fluido é eliminado) (Jorden e Campbell, 1986). A Figura 2.13 mostra um esquema do caminho percorrido por uma

onda acústica a partir da fonte até os receptores de uma sonda de perfilagem com dois receptores.

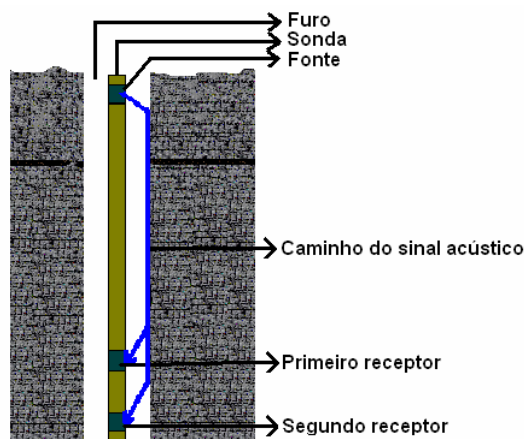


Figura 2.13- Esquema do caminho percorrido por uma onda acústica a partir da fonte até os receptores de uma sonda de perfilagem com dois receptores. Modificado de Jorden e Campbell (1986).

As medidas feitas pela sonda de perfilagem com dois receptores são afetadas pela variação do diâmetro do furo ao longo de sua extensão. Se os dois receptores apresentarem diferentes distâncias de separação da parede do furo, o tempo calculado, de viagem da onda entre os dois receptores, não será apenas o tempo gasto pela onda ao propagar-se pela parede do furo. Assim, a leitura de vagariedade na rocha não será correta.

Usualmente, limites entre camadas, onde o diâmetro do furo pode mudar abruptamente devido à diferença nas respostas dos diferentes tipos de rochas à perfuração do furo (causada pela diferença de resistência mecânica das rochas), são pontos onde medidas equivocadas de vagariedade podem ser observadas (Jorden e Campbell, 1986).

Durante a perfilagem, a sonda deve estar paralela à parede do furo, a fim de garantir medidas acuradas de vagariedade. Centralisadores mecânicos podem garantir essas medidas.

Os receptores são ajustados para detectar qualquer quantidade de energia maior do que um determinado limite. Em algumas situações, a energia da onda é maior do que o limite no primeiro receptor, mas não é no segundo receptor. Assim, a vagariedade medida será, artificialmente, muito alta. Este fenômeno é chamado

*cycle-skipping* e pode ser causado por gases no fluido, os quais atenuam a energia da onda. *Cycle-skipping* pode ser identificado por sua ocorrência randômica (Jorden e Campbell, 1986).

A sonda de perfilagem com dois receptores pode medir vagarosidade em camadas de espessura igual ou maior do que o espaço entre os receptores.

### **2.3.2 Fatores de Influência**

Cada tipo de rocha possui um intervalo de possíveis valores de vagarosidade da onda acústica, visto que a composição de cada tipo de rocha pode apresentar pequenas variações. As propriedades de uma rocha, por onde a onda acústica se propaga, também podem influenciar a vagarosidade dessa onda acústica. Esta seção descreverá a influência da porosidade, quantidade de fraturas, anisotropia e umidade das rochas na vagarosidade da propagação da onda acústica.

#### **2.3.2.1 Porosidade**

Comumente, para todos tipos de rocha, a vagarosidade da onda acústica aumenta com o aumento da porosidade da rocha. A onda acústica viaja mais rápido nos sólidos do que nos líquidos ou gases, materiais que podem preencher os poros das rochas.

#### **2.3.2.2 Fraturas**

Normalmente, macrofraturas não têm influência considerável na vagarosidade da onda acústica. Contudo, elas exercem grande influência na



amplitude de uma onda acústica, já que a onda perde energia quando se propaga através de uma macrofratura (Jorden e Campbell, 1986).

### **2.3.2.3 Anisotropia**

Usualmente, a anisotropia (orientação preferencial dos minerais) que algumas rochas podem apresentar tem pouca influência na vagarosidade de uma onda acústica.

### **2.3.2.4 Umidade**

O aumento da umidade das rochas afeta proporcionalmente a vagarosidade da onda acústica. Dependendo do tipo de fluido ou combinação, que satura uma rocha, a vagarosidade da onda acústica sofrerá um maior ou menor aumento. Comparando três tipos diferentes de fluidos, tais como água, óleo e gás: o aumento na vagarosidade da onda, causado pela umidade da rocha por gás, será maior do que o aumento causado por óleo ou água, e o aumento da vagarosidade da onda, causado pela umidade da rocha por óleo, será maior do que o aumento causado por água (Mello, 1987).

### **2.3.3 Densidade e Vagarosidade**

A densidade de um material afeta inversamente a vagarosidade da onda acústica que percorreu este material. Materiais muito densos como o aço, apresentam valores de vagarosidade de aproximadamente  $50 \mu\text{s/ft}$ , enquanto materiais menos densos como a água, apresentam valores de vagarosidade de aproximadamente  $200 \mu\text{s/ft}$ . Carvão pode mostrar densidades diferentes,

dependendo da sua formação, assim pode também mostrar diferentes valores de vagarosidade. Os possíveis valores de vagarosidade do carvão variam entre 90  $\mu\text{s}/\text{ft}$  a 170  $\mu\text{s}/\text{ft}$  (Firth, 2004).

## **2.4 Conversão de Tempo em Profundidade**

O levantamento sísmico mede o tempo que a onda sísmica leva para viajar a partir do ponto em que ela foi gerada até os receptores. Essas ondas chegam até os receptores devido a sua reflexão e/ou refração nas interfaces das rochas. Assim, o tempo registrado fornece informações sobre as estruturas rochosas presentes na área em estudo.

As posições das camadas rochosas podem ser inferidas convertendo os tempos obtidos na sísmica em valores de profundidade. Os tempos obtidos na sísmica podem ser convertidos em profundidades pela multiplicação das velocidades obtidas com a perfilagem acústica de furo de sonda por esses tempos.

Contudo, duas questões são muito importantes na conversão descrita:

- velocidade de onda acústica versus velocidade de onda sísmica;
- a combinação de velocidades e tempos que deve ser utilizada para se obter profundidades.

### **2.4.1 Velocidade de Onda Acústica Versus Velocidade de Onda Sísmica**

Os valores obtidos por perfilagem acústica de furo de sonda são os valores de velocidade de ondas acústicas, enquanto os valores obtidos por sísmica são valores de tempo de chegada de onda sísmica que se propaga com velocidade diferente da velocidade de onda acústica, visto que cada tipo de onda tem uma velocidade de propagação característica.

A diferença de velocidade de ondas sísmicas e ondas acústicas é causada pela diferença de valores de frequência e comprimento de onda entre essas ondas, visto que a velocidade de onda depende desses fatores. Por exemplo, ondas sísmicas, têm frequência na ordem de 50 Hz, enquanto ondas acústicas têm frequências na ordem de 20 KHz (Firth, 2004).

As ondas acústicas são mais rápidas que as ondas sísmicas. Comumente, na prática, os valores de velocidades dessas ondas podem ser relacionados através de uma equação linear. Velocidades de ondas sísmicas podem ser encontradas considerando que a velocidade de uma onda sísmica é 0,925 vez a velocidade de uma onda acústica. Essa relação é utilizada na região do depósito em estudo.

*Observação:* Essa conversão de velocidades (acústica para sísmica) deveria ser mais cuidadosamente investigada já que é um ponto crucial na conversão de tempo em profundidade. Este assunto é fortemente recomendado como tópico de trabalhos futuros. Amostras de laboratório poderiam ser usadas para calibrar esta associação mais precisamente, ao invés de usar para todas as situações o valor 0,925.

#### **2.4.2 Combinação de Velocidades e Tempos**

Como produto da sísmica, podem ser construídas seções no domínio do tempo, onde estruturas como interfaces entre diferentes tipos de rochas podem ser identificadas. Porém, essas seções não podem fornecer valores de espessuras de camadas ou posições de estruturas. Por exemplo, as estruturas de maiores profundidades podem encontrar-se “achatadas” nessas seções sísmicas, visto que a velocidade da onda sísmica pode aumentar com a profundidade (devido a maior compactação de rochas mais profundas), diminuindo o tempo que a onda leva para se propagar por essas rochas.

Assim, os valores de velocidade obtidos na perfilagem acústica de furo de sonda podem ser utilizados para transformar essas seções em seções no domínio de profundidade, auxiliando, por exemplo, no planejamento da lavra de uma camada de carvão. Contudo, qual a melhor maneira de multiplicar as velocidades obtidas

com os tempos da sísmica, já que as velocidades obtidas estarão em posições conhecidas, ao contrário dos valores de tempo?

Este trabalho sugere a multiplicação de um *grid* bidimensional de tempo por um *grid* bidimensional de velocidade. O *grid* bidimensional de tempo possui valores de tempo de chegada da onda até uma determinada camada de interesse. Esses valores de tempos são obtidos pela interpretação das seções sísmicas, pois, estruturas podem ser identificadas nas seções sísmicas e o delineamento dessas permite a obtenção dos tempos de chegada da onda em diferentes pontos da estrutura. Esse método é abordado por Fallon et.al. (2004). O *grid* bidimensional de valores de velocidade média até a camada de interesse será obtido de diversas maneiras ao longo do trabalho, a fim de comparar a utilização de diferentes métodos na obtenção desse *grid*.

## **2.5 Considerações Finais**

Este capítulo discutiu os princípios dos métodos geofísicos sísmica e perfilagem geofísica de furo de sonda e como os resultados desses métodos podem ser combinados para a determinação de profundidades de litologias.

Ao final desse capítulo algumas considerações importantes devem ser lembradas:

- Os tópicos abordados nesse capítulo discutiram que o levantamento sísmico pode fornecer um *grid* bidimensional de tempo de chegada da onda sísmica até a camada de interesse, enquanto os dados de perfilagem acústica de furo de sonda associados a técnicas de geoestatística podem fornecer um *grid* bidimensional de velocidade média da onda acústica que percorreu o mesmo percurso da onda sísmica.
- A velocidade média da onda acústica deve ser transformada em velocidade média da onda sísmica para que a multiplicação dos *grids* de tempo e velocidade média resulte em um *grid* de profundidade da camada de interesse.

O *grid* bidimensional de valores de velocidade média até a camada de interesse pode ser obtido de diversas maneiras. Os próximos capítulos apresentarão algumas dessas metodologias como, por exemplo, a construção de um *grid* tridimensional de valores de vagarosidade, utilizando dados de perfilagem acústica de furo de sonda, para posterior transformação desse *grid* em um *grid* bidimensional de vagarosidade média de onda acústica. O próximo capítulo apresenta uma nova visão no tratamento de dados obtidos por perfilagem acústica visando à interpolação do *grid* tridimensional de valores de vagarosidade.

## **CAPÍTULO 3 – Transformação de Coordenadas**

Este capítulo descreve a transformação do banco de dados com valores de elevação em coordenadas cartesianas para valores de elevação em coordenadas geológicas, a fim de utilizar essas duas formas de representação nas estimativas tridimensionais dos valores de vagarosidade de ondas acústicas e nas estimativas das incertezas associadas a essas vagarosidades. Neste capítulo, também é apresentada como as estimativas obtidas com valores de elevação em coordenadas geológicas serão retro-transformadas para o espaço original (elevação em coordenadas cartesianas).

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos com os *softwares* Datamine Studio© (Anon, 2003) (visualização dos dados em três dimensões) e Locmap.exe (visualização de dados em duas dimensões) (Deutsch e Journal, 1998).

### **3.1 Introdução**

Depósitos de carvão são constituídos de rochas sedimentares. A formação de rochas sedimentares ocorre, basicamente, com a acumulação de materiais, que geralmente são provenientes de outras rochas, transporte até o local de acumulação e posterior compactação desses materiais (Jensen e Bateman, 1979). Porém, o carvão, um pouco diferente das demais rochas sedimentares, é formado pela acumulação de materiais originados de fósseis de vegetais superiores e posterior compactação desses materiais (Davidson et al., 1997). Em vista do modo de deposição dos sedimentos que formam um depósito de rochas sedimentares, esse tipo de depósito possui camadas de rochas plano-paralelas ou em forma de bacias.

O modelamento geoestatístico utiliza a dependência temporal/espacial de amostras de um atributo do depósito em estudo, para realizar estimativas de valores

desse atributo em locais não amostrados. As superfícies entre as diferentes camadas de rochas sedimentares correspondem a uma época geológica específica, que separou dois diferentes períodos de deposição (Deutsch, 2002). Logo, a dependência temporal/espacial que a geoestatística deve se apoiar está na continuidade de cada camada.

Contudo, eventos geológicos posteriores, como dobramentos, podem modificar as formas das camadas rochosas. Esses dobramentos posteriores, ou a própria forma de bacia de alguns depósitos sedimentares, podem modificar o modelamento geoestatístico tri-dimensional, visto que a geoestatística utiliza amostras do atributo em estudo, que quando coletadas na região do depósito dobrado, podem estar próximas espacialmente, mesmo tendo sido depositadas em épocas geológicas diferentes, não apresentando dependência espacial. A Figura 3.1 apresenta um esquema de como um dobramento pode prejudicar o modelamento geoestatístico.

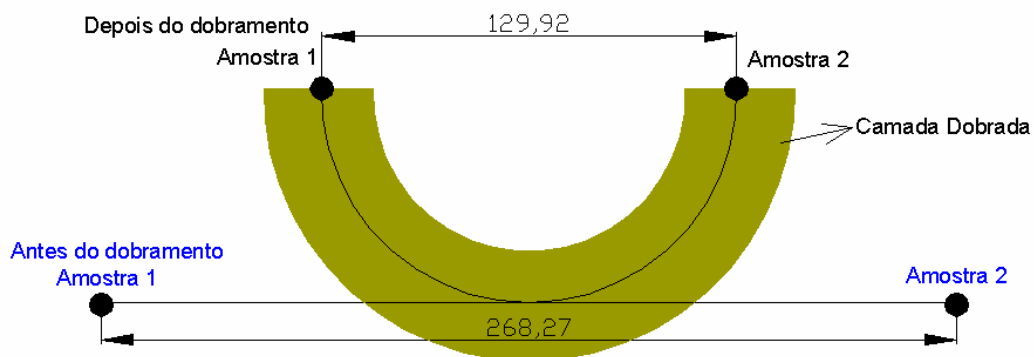


Figura 3.1- Esquema de um depósito mineral dobrado.

A fim de contornar essa questão, novas idéias a respeito da transformação de coordenadas cartesianas<sup>1</sup>, têm surgido. Geralmente, o posicionamento das amostras de campo e o modelamento dos depósitos minerais, são baseados em coordenadas cartesianas, que procuram representar a configuração atual, em subsuperfície, das camadas que compõem o depósito em estudo.

<sup>1</sup> O sistema de coordenadas cartesianas teve origem no trabalho de René Descartes, filósofo e matemático francês. Descartes introduziu a noção de coordenadas, construindo um sistema formado por dois eixos fixos que se interceptavam em um ponto, o qual era a origem do sistema (Enciclopédia Mirador Internacional, 1993).

O modelamento geoestatístico pode ser aprimorado, se essas coordenadas cartesianas forem transformadas em coordenadas geológicas (ou estratigráficas), o que significa que camadas depositadas em uma mesma época geológica poderão ser melhor representadas durante a etapa de análise de continuidade espacial realizada na geoestatística.

Deutsch (2002) sugere algumas aproximações que podem ser feitas para transformar coordenadas cartesianas em coordenadas estratigráficas. Para Deutsch (2002), um estrato (ou camada) do depósito mineral, caracteriza-se por apresentar 1,5 a 30m, e poder ser mapeado sobre uma extensão areal substancial. Esse estrato deve ser interpretado geologicamente e a configuração final dessa interpretação deve ser classificada em uma das seguintes situações:

- Proporcional – A superfície (capa) da camada não foi erodida e a lapa (lapa) da camada foi depositada sobre a topografia simultaneamente ao longo de sua extensão (ver Figura 3.2);
- Truncada – A capa da camada foi erodida e a lapa da camada foi depositada sobre a topografia simultaneamente ao longo de sua extensão (ver Figura 3.2);
- Sobreposição – A capa da camada não foi erodida e a lapa da camada “preencheu” a topografia, e por isso, não foi depositada simultaneamente sobre a topografia ao longo de sua extensão (ver Figura 3.2);
- Combinação – A capa da camada foi erodida e a lapa da camada “preencheu” a topografia, e por isso, não foi depositada simultaneamente sobre a topografia ao longo de sua extensão (ver Figura 3.2).

As linhas de erosão, deposição, capa e lapa do estrato, demarcam a continuidade entre diferentes pontos do estrato. As linhas de erosão e deposição possuem o mesmo formato que outras superfícies do estrato, porém são mais originadas da interpretação geológica do que as superfícies do estrato, que são aproximadas por interpretação das informações das amostras (Deutsch, 2002).



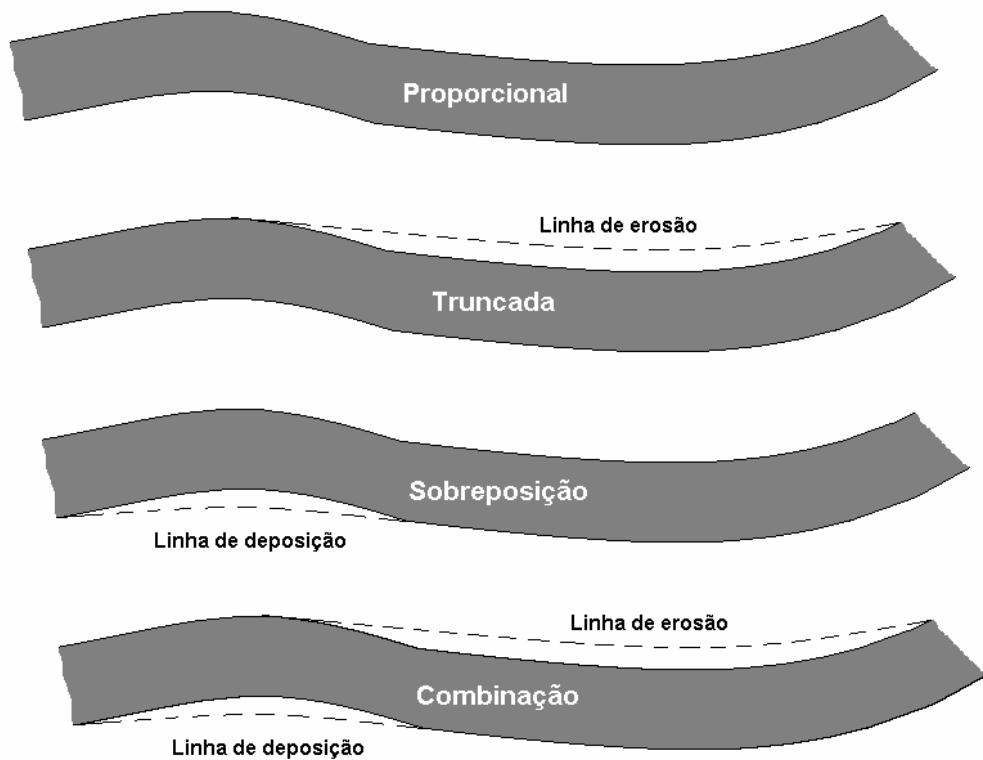


Figura 3.2- Esquema de diferentes interpretações geológicas. Modificado de Deutsch (2002).

A camada com coordenadas transformadas será plana, as coordenadas horizontais serão iguais às coordenadas cartesianas, já as coordenadas verticais serão modificadas. As novas coordenadas verticais da camada estratigráfica podem ser calculadas utilizando:

$$z(i)_{\text{estr}} = \frac{z(i) - z(i)_{\text{cl}}}{z(i)_{\text{cc}} - z(i)_{\text{cl}}} (E) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.1)$$

onde:

$z(i)_{\text{estr}}$  = Nova coordenada vertical de uma amostra (i) pertencente a camada;

$Z(i)$  = Coordenada vertical atual da amostra (i);

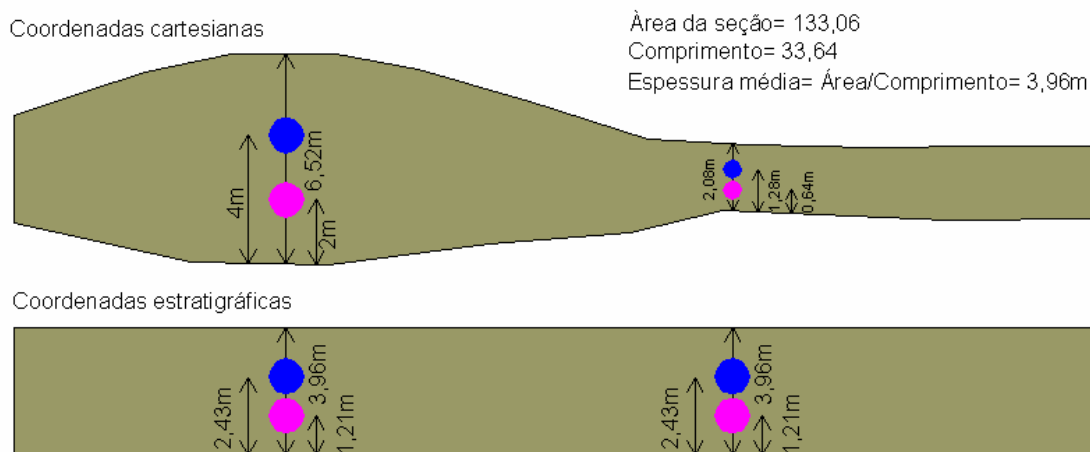
$Z(i)_{\text{cc}}$  = Coordenada vertical do ponto da linha de erosão, situado ao norte da amostra (i);

$Z(i)_{cl}$  = Coordenada vertical do ponto da linha de deposição, situado ao sul da amostra (i);

$E$  = espessura média da camada cartesiana;

$n$  = número de amostras.

Analisando a equação 3.1, pode-se notar que as distâncias verticais entre as amostras serão modificadas, visto que a distância entre a linha de erosão e a linha de deposição ao longo da extensão do estrato, no depósito com coordenadas estratigráficas, será a espessura média da camada cartesiana. Outra observação que se pode fazer, é que se uma camada é classificada como proporcional, as distâncias verticais entre as amostras serão aumentadas ou diminuídas ao longo da extensão da camada, isso pode resolver o efeito, por exemplo, de diferentes graus de compactação que tenham ocorrido ao longo do estrato, os quais podem mascarar a continuidade horizontal de certos atributos (ver Figura 3.3).



**Figura 3.3- Esquema mostrando a transformação das coordenadas cartesianas de uma camada proporcional para coordenadas estratigráficas.**

Às vezes as camadas estratigráficas podem não corresponder as estruturas que existiram no passado, porém serão úteis no modelamento geoestatístico, visto que a continuidade horizontal das camadas poderá ser bem determinada.

Uma das vantagens do uso de coordenadas estratigráficas é a diminuição do *grid* de estimativas, o qual deve ser construído na região das camadas em estudo. As camadas serão transformadas em camadas planas e menos pontos do *grid* serão exigidos para cobrir o volume em estudo na direção vertical, assim, o esforço computacional exigido durante a etapa de estimativas, também será menor.

Dependendo da variável de estudo que está sendo analisada geoestatisticamente, a definição de um estrato para geoestatística pode ser diferente da definição de estrato geológico (Deutsch, 2002).

O depósito abordado, neste trabalho, apresenta diversas camadas de carvão intercaladas com camadas de estéril. Essas camadas apresentam-se quase paralelas em relação a horizontal, apresentando um leve dobramento das camadas na forma de uma bacia (ver Figura 3.4).

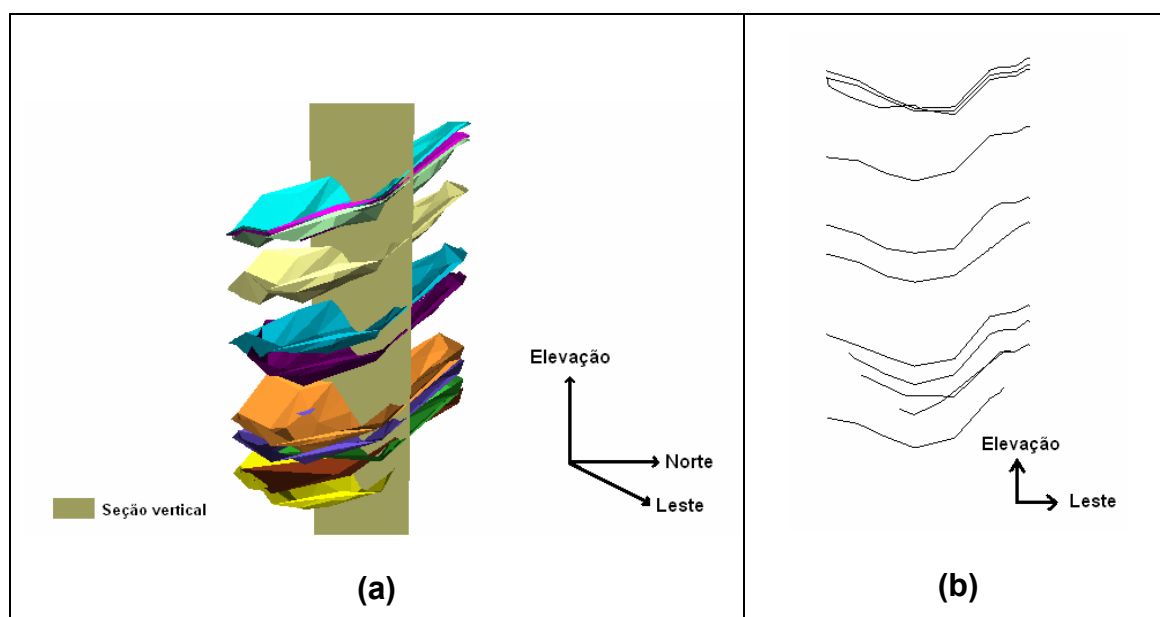


Figura 3.4- (a) Representação em perspectiva das capas de camadas de carvão do depósito em estudo (exagero vertical). (b) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (a) com as superfícies atravessadas.

As camadas apresentadas na Figura 3.4 foram construídas pelo método de triangulação<sup>2</sup>. A triangulação e representação das camadas foram feitas com o auxílio do software Datamine Studio ©. Furos de sonda (verticais), que posteriormente foram perfilados, foram realizados na região do depósito. As

<sup>2</sup> Triangulação é um método de interpolação que cria planos, os quais ligam três amostras formando triângulos ao redor do ponto a ser estimado (Isaaks e Srivastava, 1989).

definições das capas e lapas de cada camada de carvão foram descritas nos resultados das sondagens, os pontos das capas foram demarcados dentro do software Datamine Studio. Após, os pontos de uma mesma camada foram ligados por triangulação, gerando as superfícies exibidas na Figura 3.4, que são chamadas de *wireframes* e podem ser usadas para representar a capa de cada camada.

Esse leve dobramento das camadas de carvão do depósito pode interferir nas estimativas de vagarosidades, já que a maior continuidade dos estratos será numa direção próxima a direção horizontal e a determinação dessa continuidade pode ser prejudicada.

Durante este estudo, estimativas da variável vagarosidade de onda acústica deverão ser realizadas em um *grid* que possui pontos ao longo de todas camadas de carvão e de estéril do depósito. Os valores dessas estimativas poderão ser utilizados na determinação da profundidade das camadas de carvão (Figura 3.4), sendo a mais importante delas a camada mais profunda denominada German Creek (GCWS) e com espessura média de aproximadamente 2 metros.

Geralmente, diferentes domínios geológicos são separados antes da realização de estimativas de alguma variável no interior desses domínios. Contudo, a separação das diversas camadas durante a fase de estimativa de vagarosidade não pode ser realizada para o depósito em estudo, já que esse depósito apresenta muitas camadas de rochas intercaladas: uma camada de carvão de espessura média de aproximadamente 2m, diversas camadas de carvão (aproximadamente 15 camadas) de menor espessura média, que muitas vezes são de difícil definição durante a interpretação geológica, e diversas camadas (estéril) intercaladas com as camadas de carvão. Mesmo que essa separação seja realizada após um longo e tedioso trabalho, os resultados não seriam de grande utilidade na indústria de mineração, meio onde são necessárias metodologias rápidas e eficazes de determinação de profundidades de camadas. Em vista desses fatos, o desdobramento (transformação das coordenadas cartesianas em coordenadas estratigráficas) do depósito, pode aprimorar os resultados das estimativas de vagarosidade, já que na maioria das estimativas, serão utilizadas mais amostras de um domínio geológico igual ao domínio do ponto onde está ocorrendo a estimativa.

Estimativas de vagarosidade feitas por krigagem (ver capítulo 5) serão realizadas utilizando dados de um banco de dados em coordenadas cartesianas e

de um banco de dados em coordenadas estratigráficas, a fim de analisar se o benefício do uso de coordenadas estratigráficas é realmente significativo no depósito em estudo. Outro fator favorável ao uso de coordenadas estratigráficas neste estudo, é que as amostras de vagarosidade, foram coletadas de 5cm em 5cm, ao longo dos furos perfilados, por isso, um leve dobramento das camadas, por menor que seja, pode ser capaz de separar geoestatisticamente, muitas amostras que poderiam ser correlacionadas com um ponto qualquer onde ocorreria a estimativa.

### **3.2 Transformação de Coordenadas Cartesianas em Coordenadas Estratigráficas**

A principal camada de carvão do depósito foi utilizada na transformação das coordenadas das amostras de cartesianas para coordenadas estratigráficas. Essa camada foi interpretada como uma camada de sobreposição, considerou-se que a camada apresenta leves mudanças de espessura ao longo de sua extensão. A deposição dos primeiros sedimentos dessa camada pode ter preenchido a topografia.

A Figura 3.5 apresenta valores de espessura dessa camada ao longo do depósito. Essas espessuras são aproximações obtidas pela interpretação das informações das amostras oriundas da sondagem (descrição da capa e lapa da principal camada de carvão em cada furo de sonda).

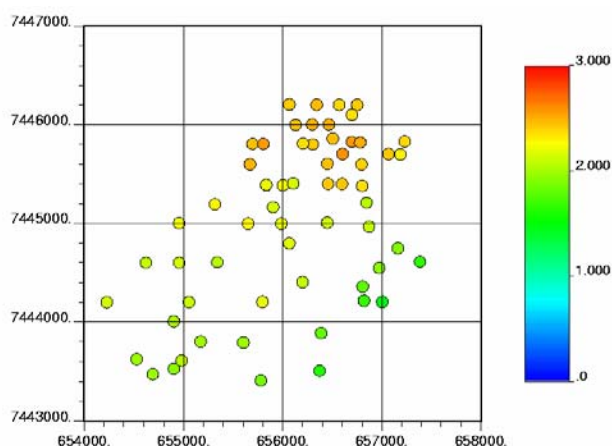


Figura 3.5- Valores de espessura da camada GCWS.

A transformação realizada foi um pouco diferente daquela sugerida por Deutsch (2002). A utilização do valor da espessura média da camada de carvão não foi necessária, porque a mudança das distâncias verticais entre amostras não se fez necessária.

A capa da camada foi aplainada e as demais camadas do depósito acompanharam essa mudança de coordenadas. Essa mudança foi realizada considerando a cota vertical da capa da camada, demarcada em cada furo de sonda (mesmos furos perfilados), igual a zero. Assim, todas as amostras de perfilagem acima ou abaixo dessa camada tiveram cotas verticais transformadas em valores positivos ou negativos, respectivamente. A equação 3.2 demonstra essa transformação de coordenadas.

$$z(i)_{\text{estr}} = z(i) - z(i)_{\text{cc}} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam representações da principal camada de carvão em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas.

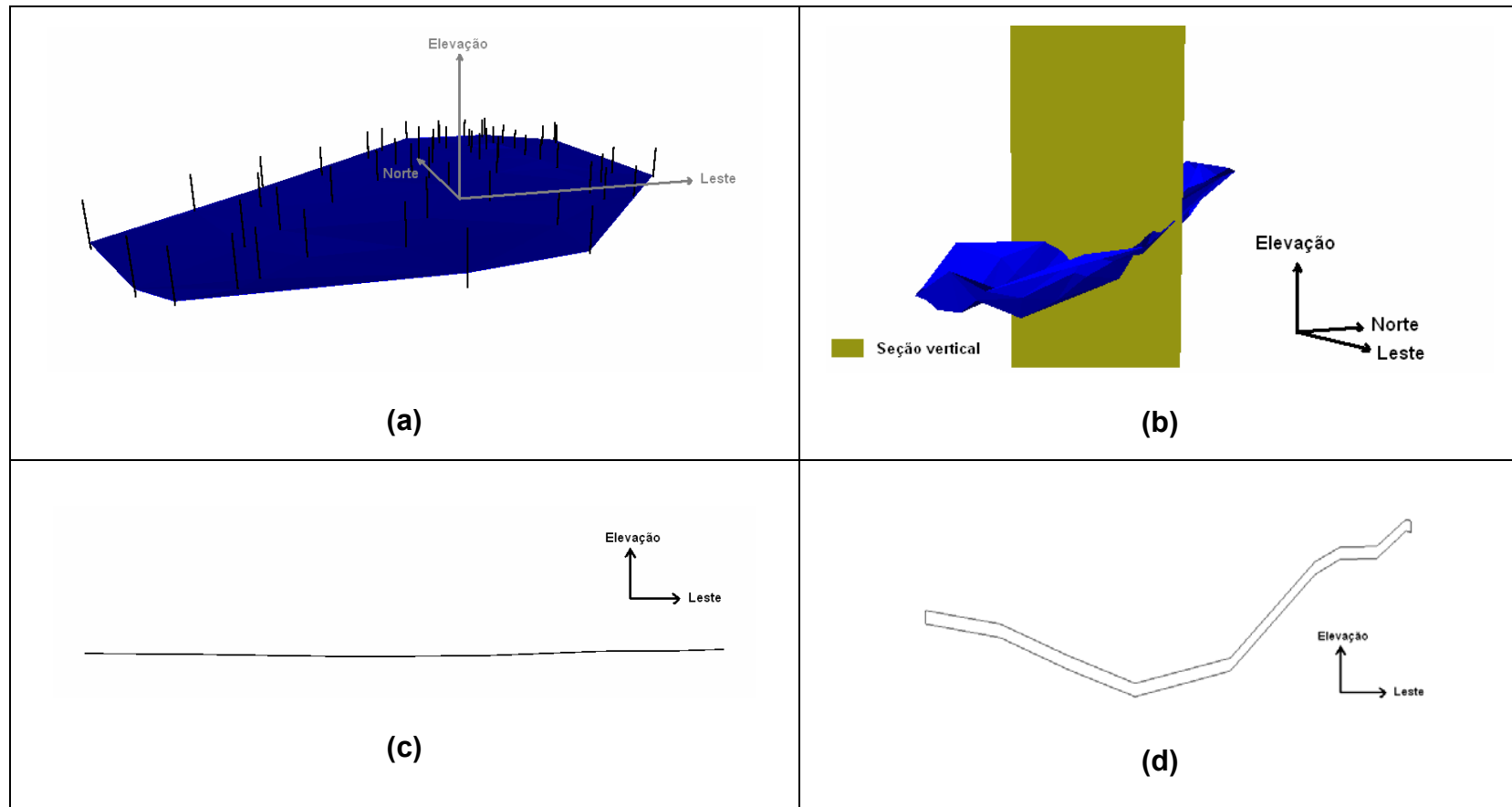


Figura 3.6- (a) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas cartesianas e de amostras de vagarosidade (pontos pretos). (b) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas cartesianas (exagero vertical). (c) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (sem exagero vertical). (d) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (com exagero vertical).

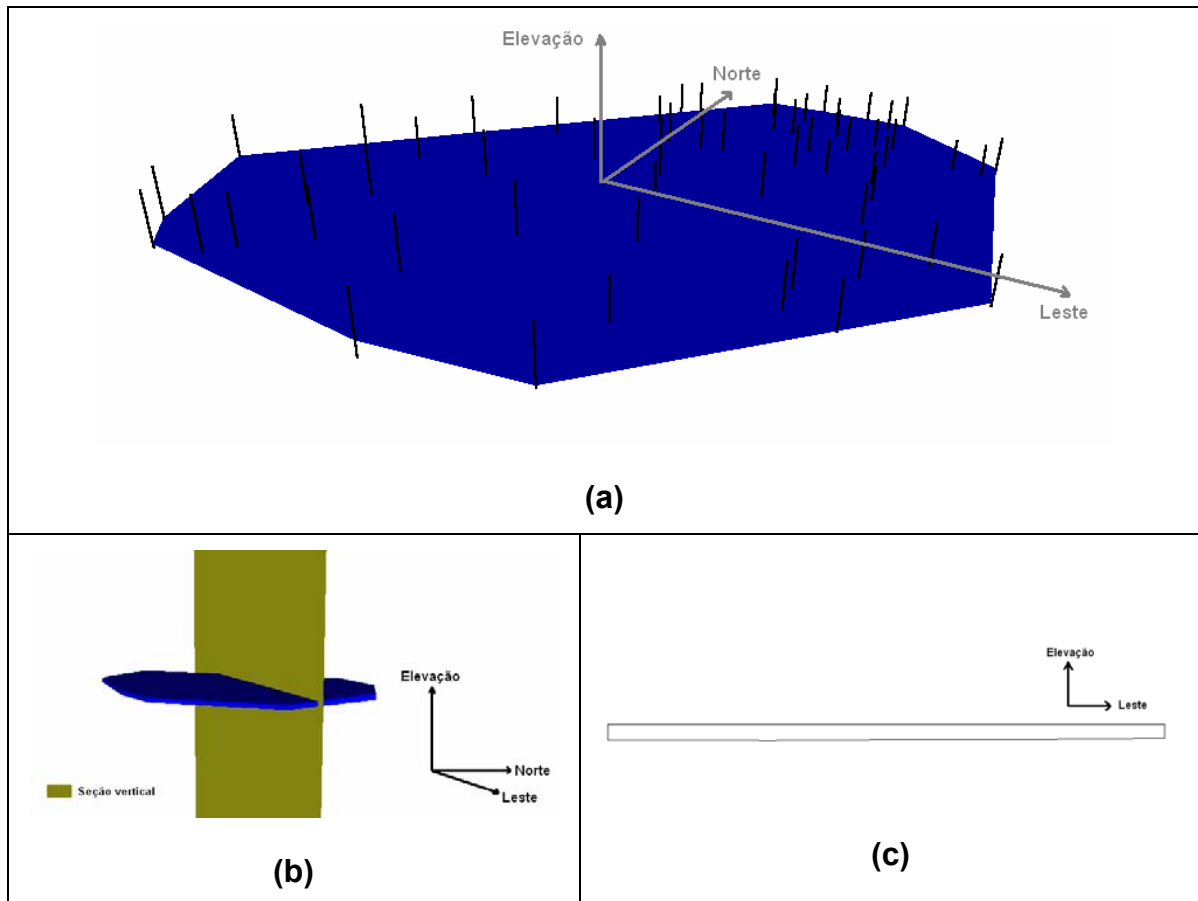


Figura 3.7- (a) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas estratigráficas e de amostras de vagarosidade (pontos pretos). (b) Vista em perspectiva da representação da camada GCWS em coordenadas estratigráficas (exagero vertical). (c) Linhas de intersecção da seção vertical da figura (b) com a camada atravessada (com exagero vertical).

A transformação realizada não corrige distâncias horizontais entre amostras, o que pode em casos de camadas fortemente dobradas, modificar significativamente a continuidade horizontal determinada por meio de valores das amostras, levando a erros nas estimativas do variograma (ver Figura 3.8). Contudo, o depósito em estudo apresenta apenas um leve dobramento das camadas, o que não resultará em erros significativos na determinação da continuidade horizontal. Além disso, conforme será abordado no Capítulo 5 os valores de vagarosidade em estudo, apresentam uma forte continuidade horizontal, por isso, pequenas diferenças nas distâncias horizontais entre amostras não causarão erros significativos nas estimativas.

Deutsch (2002) também sugere rotação do eixo cartesiano, para que esse possa ser alinhado na direção do mergulho, isso pode ser feito nos casos de fortes dobramentos.



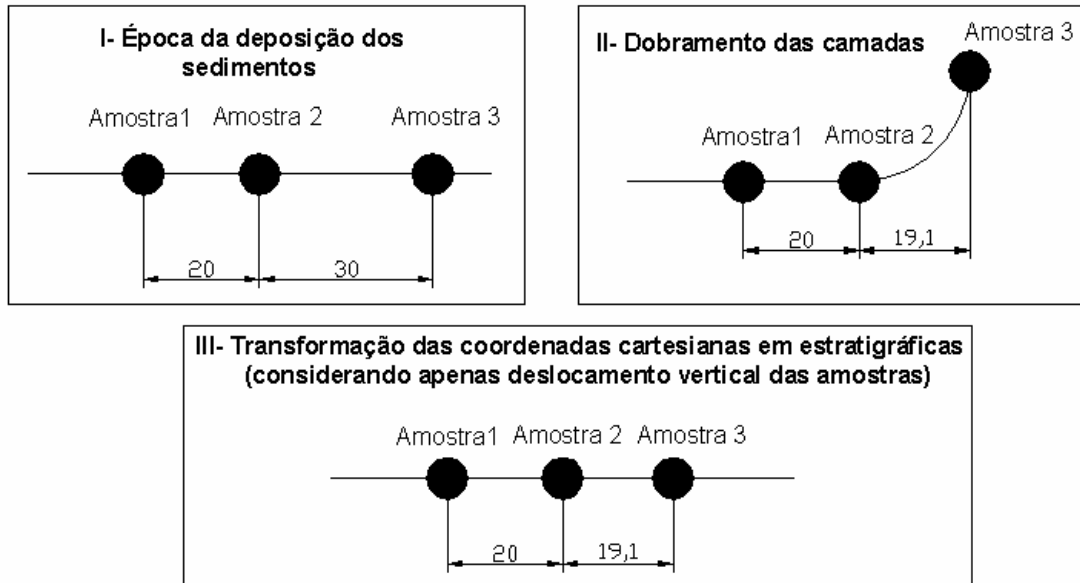


Figura 3.8- Esquema de como podem ocorrer erros na determinação da continuidade horizontal de qualquer atributo de camadas fortemente dobradas.

### 3.3 Transformação de Coordenadas Estratigráficas em Coordenadas Cartesianas

As amostras em coordenadas estratigráficas serão utilizadas nas estimativas dos valores de vagarosidade em pontos de um *grid* tridimensional. Logo, todas as estimativas realizadas em cada ponto do *grid*, estarão posicionadas em coordenadas estratigráficas. Por isso, as estimativas resultantes devem ser re-posicionadas em coordenadas cartesianas, a fim de se representar o depósito de carvão conforme ele é no espaço real. Essa operação será chamada de retro-transformação.

Para a realização da retro-transformação, cada ponto do *grid* deverá apresentar o valor da coordenada vertical somado ao valor da cota da capa da principal camada de carvão do depósito, que se encontra na mesma linha vertical que o ponto do *grid*. Assim, o inverso da equação 3.2 será realizado.

Porém, o banco de dados apresenta valores da cota capa apenas nos locais onde foram realizadas sondagens. Portanto, para determinar o valor da cota capa que deve ser somado as coordenadas verticais de cada ponto do *grid* de vagarosidades, deve-se realizar estimativas do valor da cota capa em um *grid* bi-dimensional, que apresenta os nós (vistos em planta) na mesma posição dos nós do

*grid* de vagarosidade (visto em planta). Essas estimativas foram realizadas com o uso da chamada krigagem ordinária, que é um interpolador que visa minimizar a variância do erro das estimativas (ver capítulo 5), e por isso, seria bem aplicado no caso de interpolação dos valores de cota de uma superfície. A realização dessa krigagem é apresentada no capítulo 5.

A questão da retro-transformação pode introduzir um erro de posição nos valores de vagarosidade estimados, porém esse erro não será quantificado nesse estudo.

### **3.4 Considerações Finais**

O presente capítulo discutiu a transformação do banco de dados com valores de elevação em coordenadas cartesianas para valores de elevação em coordenadas estratigráficas, a fim de utilizar essas duas formas de representação nas estimativas tridimensionais dos valores de vagarosidade de ondas acústicas. O modelamento geoestatístico pode ser aprimorado, se as coordenadas cartesianas forem transformadas em coordenadas estratigráficas, o que significa que camadas depositadas em uma mesma época geológica poderão ser melhor representadas durante a etapa de análise de continuidade espacial realizada na geoestatística. Estimativas tridimensionais utilizando dados com valores de elevação em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas serão realizadas ao longo do trabalho para análise da eficiência da utilização de dados em coordenadas estratigráficas.

No próximo capítulo, serão apresentadas informações a respeito dos dados tridimensionais de vagarosidade, coletados por perfilagem acústica. Essas informações compreenderão o modo de obtenção, estatística básica e desagrupamento dos dados de vagarosidade de onda acústica com elevação em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas.

## CAPÍTULO 4 – Banco de Dados

Neste capítulo, são apresentadas informações a respeito dos dados tridimensionais de vagarosidade, coletados por perfilagem acústica. Esses dados foram utilizados nas krigagens e simulações tridimensionais apresentadas durante esse estudo e foram a base da construção dos bancos de dados bidimensionais utilizados nas krigagens de vagarosidade média e de velocidade média. Essas informações compreendem modo de obtenção, estatística básica e desagrupamento dos dados de vagarosidade de onda acústica com elevação em coordenadas geológicas e em coordenadas cartesianas.

Os resultados apresentados foram gerados com os *softwares* Datamine Studio© (Anon, 2003) (visualização dos dados em três dimensões), Locmap.exe (visualização de dados em duas dimensões), Histplt.exe (construção de histogramas) e Declus.exe (desagrupamento dos dados), sendo os três últimos pertencentes a biblioteca de programas de geoestatística GSLIB (Deutsch e Journel, 1998).

### 4.1 Conceitos

O conhecimento de alguns parâmetros estatísticos é relevante ao longo deste capítulo. As equações 4.1 a 4.7 explicam alguns desses parâmetros (Isaaks and Srivastava, 1989).

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

(4.1)

onde:

m = Média dos dados (Z);

n = Número de dados (Z);

Z<sub>i</sub> = Valor da i-ésima amostra.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - m)^2$$

(4.2)

onde:

$\sigma^2$  = Variância dos dados (Z);

n = Número de dados (Z);

Z<sub>i</sub> = Valor da i-ésima amostra;

m = Média dos dados (Z).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - m)^2}$$

(4.3)

onde:

$\sigma$  = Desvio padrão dos dados (Z), o qual apresenta a mesma unidade dos dados;

n = Número de dados (Z);

Z<sub>i</sub> = Valor da i-ésima amostra;

m = Média dos dados (Z).

$$M = \begin{cases} Z_{\frac{n+1}{2}} & \text{se } n \text{ for ímpar} \\ \left( \frac{Z_{\frac{n}{2}} + Z_{\frac{n}{2}+1}}{2} \right) & \text{se } n \text{ for par} \end{cases} \quad (4.4)$$

onde:

M = Mediana dos dados (Z). Valor na distribuição de densidade de probabilidade onde 50% dos valores são maiores do que este e 50% são menores, assim a mediana é o ponto central da distribuição dos dados (Z);

$Z_n$  = Valor da n-ésima amostra, estando os dados (Z) distribuídos em ordem ascendente;

n = Número de dados (Z).

$$\text{Máximo} = Z_i \quad (4.5)$$

onde:

$Z_i$  = Valor da i-ésima amostra, o qual é o maior valor dos dados (Z).

$$\text{Mínimo} = Z_i \quad (4.6)$$

onde:

$Z_i$  = Valor da i-ésima amostra, o qual é o menor valor dos dados (Z).

*Quartil Superior = Valor na distribuição onde 75% dos valores dos dados (Z) são mais baixos que este.*

Quartil Inferior= Valor na distribuição onde 25% dos valores dos dados (Z) são mais baixos que este.

$$CV = \frac{\sigma}{m}$$

(4.7)

onde:

CV = Coeficiente de Variação;

$\sigma$  = Desvio padrão dos dados (Z), o qual apresenta a mesma unidade dos dados;

m = Média dos dados (Z).

## 4.2 Localização do Depósito

O depósito de carvão abordado durante este estudo é localizado no nordeste da Austrália. A Figura 4.1 apresenta um mapa de localização da região onde situa-se o depósito.

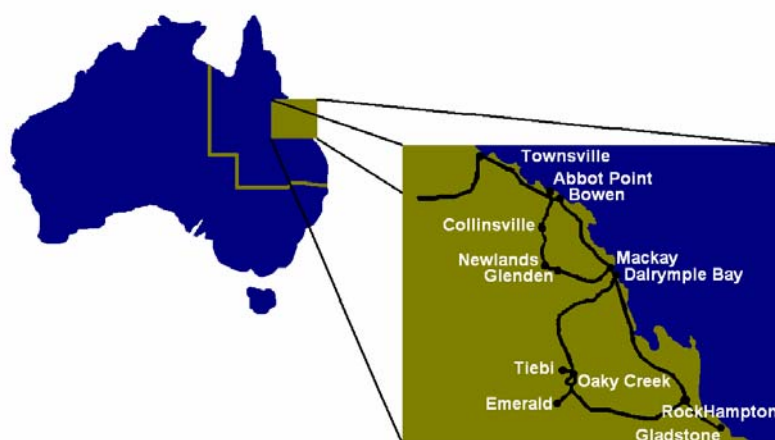


Figura 4.1- Mapa de localização da área em estudo.

### 4.2.1 Banco de Dados

As amostras de vagarosidade de onda acústica, utilizadas neste trabalho, foram coletadas por meio de perfilagem acústica. Essas amostras foram coletadas ao longo de 60 furos (verticais) perfilados, distribuídos na área em estudo. As amostras coletadas em cada furo foram coletadas em intervalos de 5cm em 5cm, perfazendo um total de aproximadamente 300m por furo.

O banco de dados compreende 228851 amostras de vagarosidade de onda acústica (medidas em  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ). Os furos perfilados foram irregularmente espaçados. As amostras de vagarosidade cobrem uma região de aproximadamente 3000m na direção leste-oeste e 3000m na direção norte-sul. A Figura 4.2 apresenta uma vista superior dos furos perfilados (coordenadas UTM) e da área do depósito onde foi realizado o levantamento sísmico.

Os limites do levantamento sísmico devem ser conhecidos, visto que o *grid* de vagarosidade, a ser construído, deverá cobrir uma região de intersecção entre a área levantada por sísmica e a área amostrada por perfilagem acústica. A Figura 4.3 mostra uma representação em perspectiva da superfície topográfica na região do depósito e das amostras de vagarosidade (representação com exagero vertical). A representação da superfície topográfica apresentada na Figura 4.3 é uma *wireframe* construída por meio da triangulação de pontos obtidos por plani-altimetria.

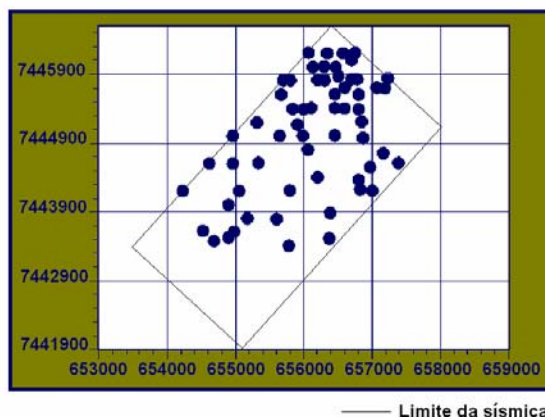


Figura 4.2- Vista superior dos furos perfilados (coordenadas UTM) e limite do polígono do levantamento sísmico.

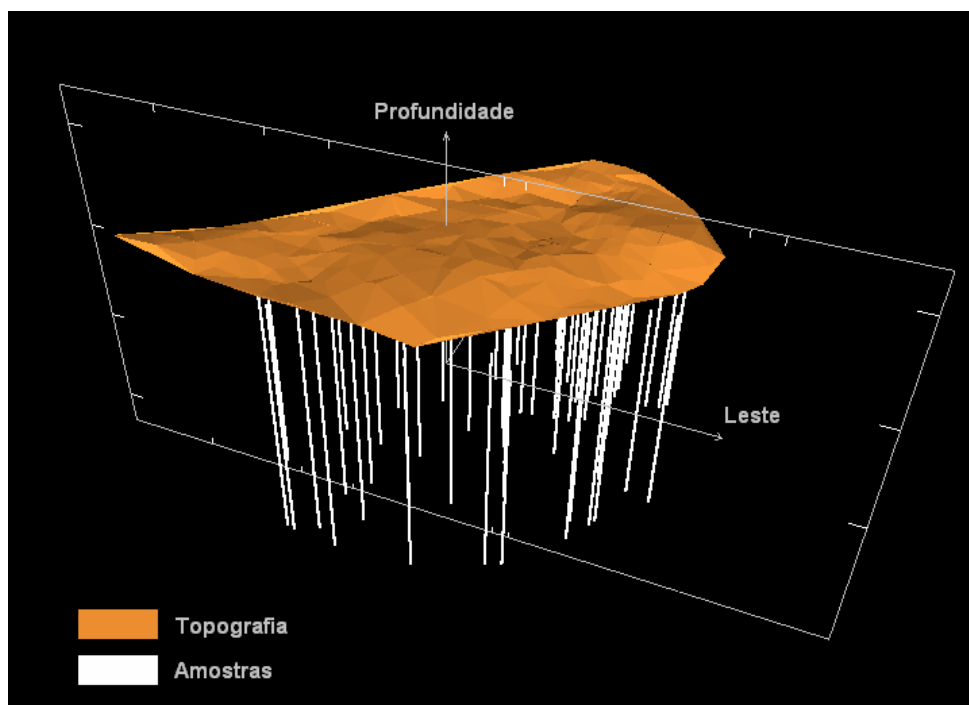


Figura 4.3- Representação em perspectiva da superfície topográfica e das amostras de vagarosidade (representação com exagero vertical).

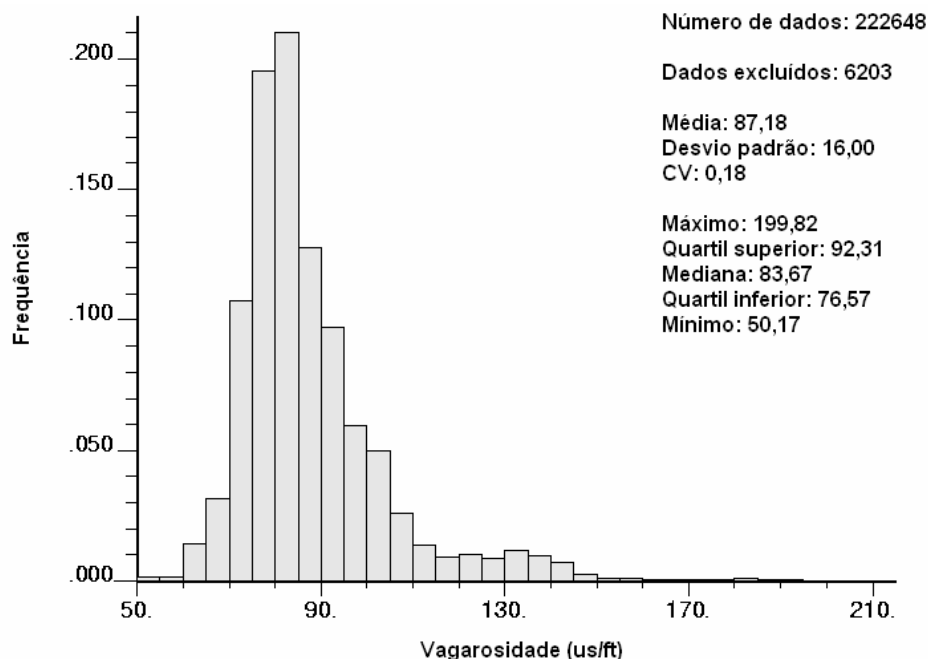
Devido a grande quantidade de amostras que serão utilizadas nas estimativas e ao grande volume que deverá ser coberto pelo *grid* de vagarosidades, espera-se uma grande demanda computacional para interpolação e simulação.

### 4.3 Estatística Básica

O histograma é comumente o primeiro passo usado na análise exploratória dos dados (Isaaks and Srivastava, 1989). A Figura 4.4 mostra o histograma para os valores de vagarosidade de onda acústica. O eixo horizontal mostra classes de valores, enquanto o eixo vertical mostra a frequência associada a cada classe.

A estatística básica dos dados pode ser analisada com a construção do histograma, acompanhado dos valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo, valor mínimo, quartil superior, quartil inferior e mediana dos valores amostrais.





**Figura 4.4- Histograma para os valores de vagarosidade de onda acústica.**

*Nota: Os dados excluídos apresentados na Figura 4.4 referem-se aos valores iguais a -999,000, os quais foram atribuídos a intervalos não amostrados durante a perfilagem. Além disso, dados menores que 50 $\mu$ s/ft e maiores do que 200 $\mu$ s/ft não foram considerados, visto que esses valores não tem significado físico e, provavelmente, estão associados com ruídos nas leituras de vagarosidade.*

A estatística básica das amostras é igual para o banco de dados em coordenadas cartesianas e para o banco de dados em coordenadas estratigráficas, visto que a diferença desses dois bancos de dados é, apenas, a posição das amostras.

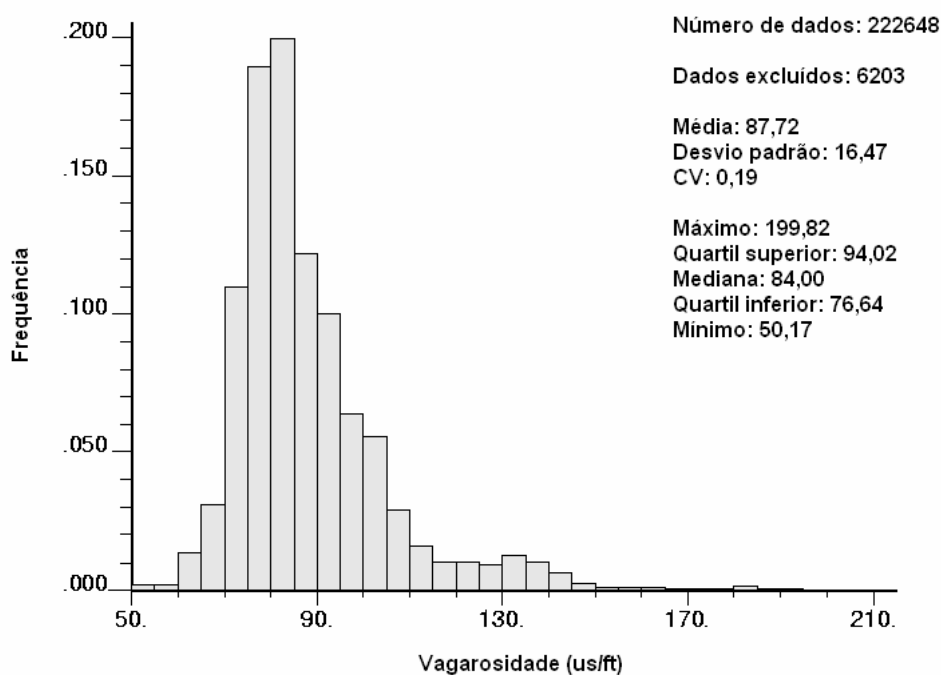
#### **4.4 Desagrupamento**

Durante o modelamento de qualquer atributo de um depósito mineral representado por amostras, é necessário verificar se as amostras foram preferencialmente coletadas. Amostras encontram-se agrupadas (preferencialmente coletadas) se suas localizações não estão regularmente ou randomicamente distribuídas sobre a área em estudo (Goovaerts, 1997). Este tipo de amostragem

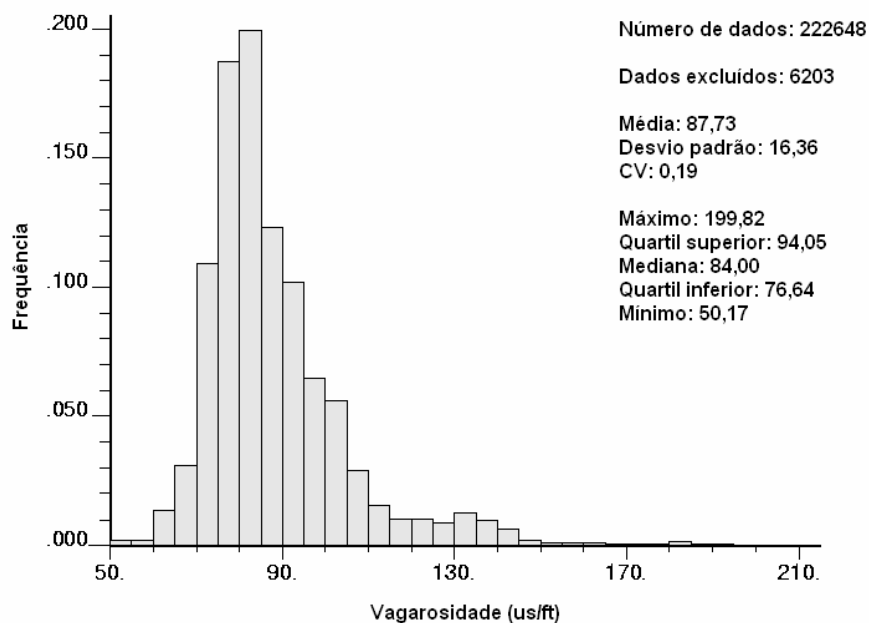
leva ao cálculo de uma estatística tendenciosa do atributo analisado. Neste caso, técnicas de desagrupamento são recomendadas.

A Figura 4.2 mostra que as amostras utilizadas apresentam agrupamento preferencial. A técnica de desagrupamento utilizada neste trabalho foi o chamado Método das Células Móveis (Journel, 1983; Isaaks e Srivastava, 1989; Deutsch, 1989; Deutsch e Journel, 1998). Neste método, a área em estudo é dividida em células de tamanhos iguais (2D) ou sólidos de volumes iguais (3D). As amostras que caem dentro de uma mesma célula recebem o mesmo peso de desagrupamento. Esses pesos são inversamente proporcionais ao número de amostras que caem dentro da célula. A utilização desse método aproxima a estatística das amostras da estatística da população, do contrário uma estatística tendenciosa será gerada, caso o agrupamento esteja presente.

A Figura 4.5 apresenta o histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas, considerando o banco de dados em coordenadas cartesianas. A Figura 4.6 apresenta o histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas, considerando o banco de dados em coordenadas estratigráficas.



**Figura 4.5- Histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas (banco de dados em coordenadas cartesianas).**



**Figura 4.6- Histograma das amostras de vagarosidade de onda acústica desagrupadas (banco de dados em coordenadas estratigráficas).**

Conforme análise dos histogramas apresentados nesta seção, o efeito do agrupamento não causou mudanças significativas na estatística dos dados amostrais, tanto para o banco de dados em coordenadas cartesianas como para o banco de dados em coordenadas estratigráficas. Isto pode ter ocorrido, porque o depósito pode apresentar uma estratigrafia muito parecida ao longo de sua extensão, assim um agrupamento preferencial em alguma região, não influenciaria significativamente a estatística básica dos dados amostrais.

#### **4.5 Considerações Finais**

Esse capítulo apresentou o modo de obtenção das 228851 amostras de vagarosidade de onda acústica coletadas por meio de perfilagem acústica, ao longo de 60 furos perfilados, distribuídos na área em estudo. A estatística básica e o desagrupamento dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica com elevação em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas também foram apresentados. Esses dados foram utilizados nas etapas de krigagem e simulação tridimensional apresentadas durante esse estudo e foram a base da

construção dos bancos de dados bidimensionais utilizados na etapa de krigagem de vagarosidade média e de velocidade média.

Várias alternativas de krigagem foram realizadas ao longo desse estudo visando a comparação dos resultados obtidos e a escolha da melhor alternativa para obtenção de valores de velocidade média da onda sísmica, meta desse trabalho.

O capítulo seguinte apresentará as interpolações realizadas com o algoritmo de krigagem, quais sejam: krigagem dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica com valores de elevação em coordenadas cartesianas, krigagem dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica com valores de elevação em coordenadas estratigráficas, krigagem dos dados bidimensionais de vagarosidade média da onda acústica (quando essa se propaga a partir da superfície do terreno até a capa da camada de carvão GCWS), krigagem dos dados bidimensionais de velocidade média da onda acústica (quando essa se propaga a partir da superfície do terreno até a capa da camada de carvão GCWS) e krigagem dos valores de cota da capa da camada GCWS cujas estimativas serão utilizadas na retro-transformação dos dados de vagarosidade em coordenadas estratigráficas.

## CAPÍTULO 5 - Krigagem

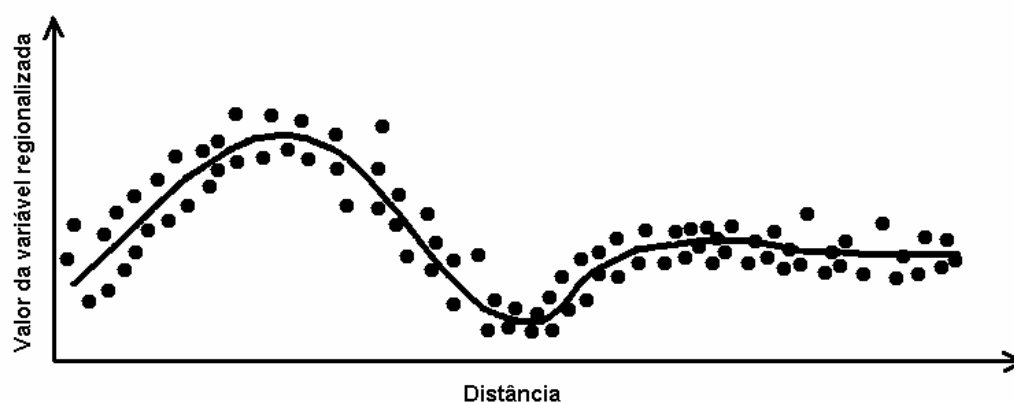
Neste capítulo serão abordados alguns conceitos nos quais a geoestatística se apóia para fazer inferências de valores de atributos em locais não amostrados. Além disso, será apresentada a análise da continuidade espacial dos dados de vagarosidade de onda acústica com os valores de elevação em coordenadas cartesianas e com os valores de elevação em coordenadas geológicas; a krigagem ordinária do atributo vagarosidade de onda acústica usando banco de dados com elevação em coordenadas geológicas e usando banco de dados com elevação em coordenadas cartesianas; e a escolha do banco de dados que resultou melhores valores das estimativas de vagarosidade de onda acústica. Também, serão apresentadas a krigagem ordinária do atributo vagarosidade média e a krigagem ordinária do atributo velocidade média usando dados bidimensionais (Leste-Norte), além de uma comparação entre os resultados obtidos com dados bidimensionais e com dados tridimensionais.

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos com os *softwares* Datamine Studio© (Anon, 2003), Surfer© (Anon, 2002), Isatis© (Bleines et al., 2001), Variowin© (Pannatier, 1996), Locmap.exe, Hlstplt.exe, Gamv.exe, Varmap.exe, Scatplt.exe, Postsim.exe, Kt3d.exe e Pixelplt.exe, sendo os oito últimos pertencentes a biblioteca de geoestatística GSLIB (Deutsch e Journel, 1998).

## 5.1 Variável Regionalizada e Estacionariedade

A geoestatística se apóia no conceito de “Variável regionalizada”<sup>1</sup> para fazer inferências a partir de amostras de qualquer atributo de um depósito mineral. Variável regionalizada (ou atributo) é uma Variável que é distribuída no espaço. Usualmente, essa Variável é característica de um certo fenômeno, como por exemplo, teor de um mineral é característica de uma mineralização (Journel e Huijbregts, 1978).

Geralmente, uma Variável regionalizada apresenta valores dessa Variável, que distribuídos no espaço, apresentam um aspecto estruturado, apesar de apresentarem um aspecto errático (aleatório) em cada vizinhança local (Journel e Huijbregts, 1978). A Figura 5.1 apresenta um exemplo de como uma Variável regionalizada pode ser distribuída.



**Figura 5.1- Exemplo de como uma variável regionalizada pode ser distribuída em uma seção do depósito. Os pontos pretos representam valores da variável regionalizada e a linha preta representa o comportamento estruturado da variável regionalizada.**

---

<sup>1</sup> Para uma melhor compreensão do assunto abordado nesta seção e possibilitar o uso de expressões geoestatísticas como “Variável regionalizada”, a palavra Variável, com letra inicial maiúscula, significará um atributo, como por exemplo, teor de um mineral, enquanto a palavra variáveis, com letra inicial minúscula, significará valores do atributo, como por exemplo, valor do teor de um mineral em diferentes amostras de um depósito.

Valores de uma Variável regionalizada podem ser gerados por uma função aleatória ou randômica, visto que as variáveis geradas por uma função aleatória, isto é, variáveis aleatórias, podem assumir certos valores de acordo com uma certa distribuição de probabilidades. Ou seja, valores de uma Variável regionalizada podem ser considerados realizações de uma função aleatória. (Journel e Huijbregts, 1978).

Uma função aleatória gera variáveis que podem assumir valores aleatórios em uma vizinhança local (respeitando a probabilidade de ocorrência de cada valor), mas quando comparados a variáveis pertencentes a outras vizinhanças, mantêm a estrutura espacial da Variável regionalizada.

As técnicas geoestatísticas de interpolação mais utilizadas se apóiam na estacionariedade de funções aleatórias (Isaaks e Srivastava, 1989). Uma função aleatória é dita estritamente estacionária quando a dependência dos valores de uma Variável regionalizada, separados por um vetor  $h$  (módulo, direção e sentido), não varia com a translação desse vetor. Porém, a geoestatística se apóia na estacionariedade de segunda ordem (Journel e Huijbregts, 1978), a qual considera que o momento estatístico de primeira ordem, descrito como a esperança matemática (média) dos possíveis valores da Variável regionalizada, e o momento estatístico de segunda ordem, conhecido como covariância, não dependem da translação do vetor  $h$ .

É seguindo as teorias de Variável regionalizada e estacionariedade que interpolações utilizando ferramentas geoestatísticas serão realizadas neste trabalho.

## **5.2 Continuidade Espacial**

O conhecimento das direções de maior/ menor continuidade do atributo em estudo, será necessário durante a etapa de interpolação (krigagem) desse atributo. A continuidade espacial de um atributo é comumente analisada por meio de medidas de variabilidade entre valores desse atributo, separados por um vetor  $h$ . Entre as medidas de variabilidade mais comuns, utilizadas na geoestatística, estão as funções de  $h$  chamadas covariância ( $C$ ) e variograma ( $\gamma$ ).

A covariância é uma medida de semelhança entre pares de dados separados por um vetor  $h$ . Assim quanto maior a covariância entre os pares maior é a semelhança entre esses pares. A covariância entre dados separados por um vetor  $h$  é:

$$C(\mathbf{h}) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} (Z_i \cdot Z_{i+h}) - (m_{-h} \cdot m_{+h}) \quad \text{sendo}$$

$$m_{-h} = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} Z_i \quad m_{+h} = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} Z_{i+h}$$

(5.1)

onde:

$C(h)$ = covariância entre valores de dados separados por um vetor  $h$ ;

$Z_i$ = valor da  $i$ -ésima amostra;

$Z_{i+h}$ = valor da amostra separada de  $Z_i$  por um vetor  $h$ ;

$N(h)$ = número de pares separados por uma distância  $h$ ;

$m_{-h}$ = média dos valores  $Z_i$ ;

$m_{+h}$ = média dos valores  $Z_{i+h}$ .

A covariância também pode ser obtida por:

$$C(\mathbf{h}) = \sigma^2 - \gamma(\mathbf{h})$$

(5.2)

onde:

$C(h)$  = covariância entre valores de dados separados por um vetor  $h$ ;

$\sigma^2$  = variância dos dados;

$\gamma(h)$  = variograma entre valores de dados separados por um vetor  $h$ .



O variograma para amostras separadas por um vetor  $h$  é escrito da seguinte maneira:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_{i+h})^2$$

(5.3)

onde:

$\gamma(h)$ = variograma para amostras separadas por uma distância  $h$ ;

$N$ = número de pares de amostras separadas por uma distância  $h$ ;

$h$ = distância média entre amostras;

$Z_i$ = valor da  $i$ -ésima amostra;

$Z_{i+h}$ = valor da amostra separada de  $Z_i$  por um vetor  $h$ .

O variograma é calculado para diferentes valores de  $h$ . O gráfico conhecido como variograma experimental pode ser construído com esses valores de variograma (Figura 5.2).

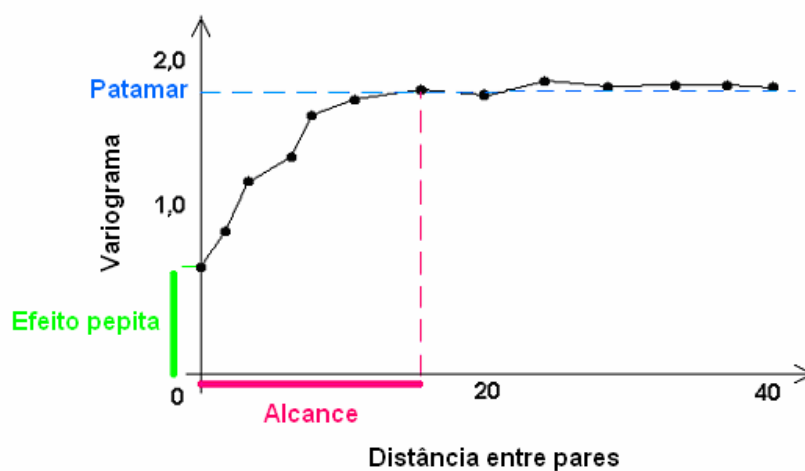


Figura 5.2- Esquema de um variograma experimental típico. Modificado de Hartman (1992).

Os parâmetros de um variograma experimental são:

Efeito pepita – é o valor da ordenada (eixo y) quando o variograma experimental intercepta esse eixo. Este valor representa a aleatoriedade e os fatores que influenciam a variabilidade a curtas distâncias, como erros de amostragem e mineralizações erráticas;

Patamar – valor que coincide com a variância dos dados. É o valor da ordenada no qual o variograma experimental torna-se aproximadamente constante;

Alcance – é a distância entre pares na qual o variograma experimental alcança o patamar. As amostras separadas por distâncias maiores do que o alcance não apresentam correlação espacial, ou seja, o valor de uma amostra não depende do valor de outra amostra separada por distância superior ao alcance.

A inclinação e a forma do variograma freqüentemente variam em direções diferentes, com o alcance aumentando na direção de maior continuidade da mineralização.

Outra medida de variabilidade é o chamado correlograma. O correlograma é a forma padronizada do covariograma. Por isso, algumas estruturas podem ser melhor evidenciadas no correlograma do que no covariograma. O correlograma pode ser descrito como:

$$\rho(\mathbf{h}) = \frac{C(\mathbf{h})}{\sqrt{\sigma_{-h}^2 \cdot \sigma_{+h}^2}} \in [-1, +1] \text{ sendo}$$

$$\sigma_{-h}^2 = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [Z_i - m_{-h}]^2 \quad \sigma_{+h}^2 = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [Z_{i+h} - m_{+h}]^2$$

(5.4)

onde:

$\rho(\mathbf{h})$ = correlograma entre valores de dados separados por um vetor h;

$C(\mathbf{h})$ = covariância entre valores de dados separados por um vetor h;

$Z_i$  = valor da  $i$ -ésima amostra;

$Z_{i+h}$  = valor da amostra separada de  $Z_i$  por um vetor  $h$ ;

$N(h)$  = número de pares a uma distância  $h$ ;

$m_{-h}$  = média dos valores  $Z_i$ ;

$m_{+h}$  = média dos valores  $Z_{i+h}$ ;

$\sigma_{-h}^2$  = variância dos valores  $Z_i$ ;

$\sigma_{+h}^2$  = variância dos valores  $Z_{i+h}$ .

A krigagem utiliza valores de variogramas que medem a variabilidade entre as amostras usadas em cada estimativa e entre cada amostra e o ponto onde ocorre a estimativa, por isso, uma função, que possa fornecer esses valores, deve ser ajustada aos variogramas experimentais.

### **5.2.1 Funções para Ajuste de Variogramas**

Funções são ajustadas aos variogramas por dois motivos (Isaaks e Srivastava, 1989).

- fornecer valores de variogramas para qualquer distância  $h$ ;
- assegurar a existência de um resultado durante a interpolação e que esse resultado seja único.

Quanto melhor estruturados os variogramas, mais eficientes serão as funções ajustadas a esses durante a fase de interpolação. Essas funções podem ser de diferentes modelos. Os modelos mais utilizados são apresentados nas equações 5.5 a 5.8.

**Modelo esférico**

$$\gamma(\mathbf{h}) = c \cdot \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}}{a}\right) = \begin{cases} c \cdot \left[ 1,5 \cdot \left(\frac{\mathbf{h}}{a}\right) - 0,5 \cdot \left(\frac{\mathbf{h}}{a}\right)^3 \right] & \text{se } \mathbf{h} \leq a \\ c & \text{se } \mathbf{h} > a \end{cases} \quad (5.5)$$

onde:

c= patamar do modelo esférico;

a= alcance do modelo esférico.

**Modelo exponencial com alcance prático a**

(Alcance prático= alcance do variograma a 95% do patamar)

$$\gamma(\mathbf{h}) = c \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3\mathbf{h}}{a}\right) \right] \quad (5.6)$$

onde:

c= patamar do modelo exponencial;

a= alcance do modelo exponencial.

**Modelo Gaussiano com alcance prático a**

(Alcance prático= alcance do variograma a 95% do patamar)

$$\gamma(\mathbf{h}) = c \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3\mathbf{h}^2}{a^2}\right) \right] \quad (5.7)$$

onde:

c= patamar do modelo Gaussiano;

a= alcance do modelo Gaussiano.

### **Modelo de potência**

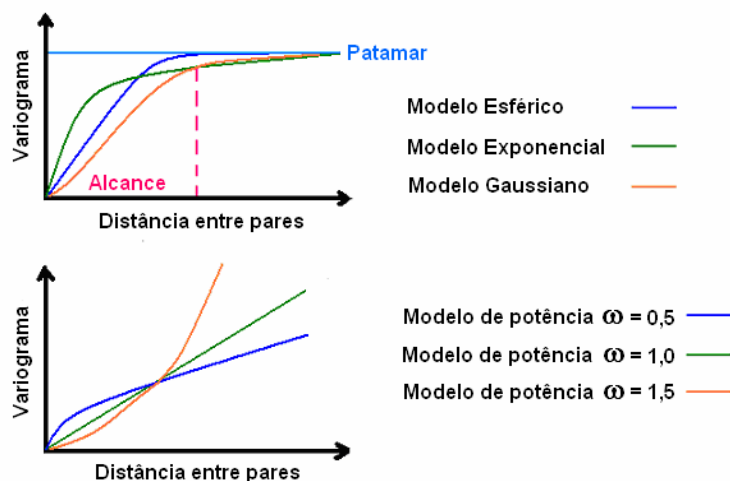
$$\gamma(\mathbf{h}) = c \cdot h^w \quad \text{com } 0 < w < 2$$

(5.8)

onde:

c= inclinação do modelo de potência.

A Figura 5.3 ilustra os quatro tipos de modelos mais utilizados.



**Figura 5.3- Representação das funções mais utilizadas para modelar variogramas experimentais. Modificado de Goovaerts (1997).**

Um variograma experimental pode ser ajustado com mais de uma estrutura, ou seja, com uma função que contém mais de um modelo do mesmo tipo ou de tipos diferentes. Os valores de variograma do variograma experimental são as somas dos valores de variograma de cada modelo para um mesmo  $h$  e do efeito pepita.

### 5.3 Krigagem

Krigagem é um algoritmo de interpolação que visa obter estimativas de valores de um atributo  $z$  em locais ( $u$ ) não amostrados sobre a área em estudo, considerando as amostras disponíveis e a correlação espacial entre valores desse atributo (Matheron, 1963).

A krigagem é comumente identificada com a sigla BLUE, que quer dizer na língua inglesa “*best linear unbiased estimator*”. A krigagem é uma técnica de interpolação linear (*linear*), porque suas estimativas são combinações lineares dos dados disponíveis; não-tendenciosa (*unbiased*), porque a média do erro da estimativa é zero (entenda-se por erro da estimativa a diferença entre o valor real e o valor estimado); e melhor (*best*) porque minimiza a variância do erro da estimativa (Isaaks e Srivastava, 1989).

Considerando que os valores de um atributo  $z$  qualquer são realizações de uma função aleatória e estacionária, a equação de krigagem simples (base para outros tipos de krigagem) é definida como mostra a seguinte equação (Matheron, 1963):

$$Z^*(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i(\mathbf{u}) [Z(\mathbf{u})_i - m(\mathbf{u})_i]$$

(5.9)

onde:

$Z^*(u)$ = valor da estimativa;

$m(u)$ = esperança matemática (média) das variáveis aleatórias  $Z^*(u) = m(u)_i$ ;

$\lambda_i(u)$ = peso para a  $i$ -ésima amostra usada na estimativa;

$Z(u)_i$ = valor da  $i$ -ésima amostra usada na estimativa;

$m(u)_i$ = esperança matemática das variáveis aleatórias  $Z^*(u)_i$ ;

$n$ = número de amostras usadas na estimativa.

A equação 5.9 pode ser reescrita conforme segue (Matheron, 1963):

$$Z^*(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i(\mathbf{u})Z(\mathbf{u})_i + \lambda_m(\mathbf{u})m(\mathbf{u}) \quad \text{sendo} \quad \lambda_m(\mathbf{u}) = 1 - \sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i(\mathbf{u}) \quad (5.10)$$

onde:

$\lambda_m$  = peso atribuído a média estacionária para a estimativa em um local  $u$ .

Dois tipos de krigagem serão usados neste estudo: krigagem ordinária e krigagem simples. Krigagem ordinária (OK) considera a flutuação local da média limitando o domínio de estacionariedade da média para a vizinhança local do ponto a ser estimado, enquanto a krigagem simples (SK) considera a média  $m(u)$  conhecida e constante por toda a área em estudo (Matheron, 1963).

O atributo vagarosidade de onda acústica foi krigado por krigagem ordinária, que é o tipo de krigagem mais comumente usado na estimativa de atributos de depósitos minerais, visto que considera flutuação local da média. Na krigagem ordinária existe uma restrição aos pesos de krigagem de forma que:

$$\sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i(\mathbf{u}) = 1 \quad (5.11)$$

Logo, a equação da krigagem ordinária pode ser descrita como:

$$Z^*(\mathbf{u})_{OK} = \sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i^{OK}(\mathbf{u})Z(\mathbf{u})_i \quad (5.12)$$

onde:

$Z^*(\mathbf{u})_{OK}$  = valor da estimativa;

$\lambda_i^{OK}(\mathbf{u})$  = peso atribuído a  $i$ -ésima amostra utilizada na estimativa;

$Z(\mathbf{u})_i$  = valor da  $i$ -ésima amostra utilizada na estimativa;

$n$  = número de amostras utilizadas na estimativa.

Os valores dos pesos da krigagem ordinária [ $\lambda_i^{OK}(\mathbf{u})$ ] são calculados resolvendo o sistema de krigagem ordinária, que possui  $(n+1)$  equações lineares. Um exemplo desse sistema é mostrado a seguir:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j^{OK}(\mathbf{u}) C(\mathbf{u})_{R(ij)} + \mu(\mathbf{u}) = C(\mathbf{u})_{R(i0)} & i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^{OK}(\mathbf{u}) = 1 \end{cases}$$

(5.13)

onde:

$C(\mathbf{u})_{R(ij)}$  = covariância entre amostras utilizadas na estimativa;

$C(\mathbf{u})_{R(i0)}$  = covariância entre a amostra utilizada na estimativa e o ponto a ser interpolado;

$\mu$  = parâmetro de Lagrange.

Na realidade, os valores  $C_R$  utilizados no sistema da equação 5.13 significam covariâncias dos resíduos. Deutsch e Journel (1998) apresentam o significado matemático de resíduos por meio da seguinte equação:

$$Z(\mathbf{u}) = m(\mathbf{u}) + R(\mathbf{u})$$

(5.14)



onde:

$Z(u)$ = valor da variável aleatória do atributo  $z$  no local  $(u)$ ;

$m(u)$ = esperança matemática dos valores das variáveis aleatórias próximas a  $Z(u)$ ;

$R(u)$ = resíduo do valor da variável aleatória do atributo  $z$  no local  $(u)$ .

Apesar do valor  $m(u)$  ser considerado estacionário apenas para uma vizinhança local, pela teoria da krigagem ordinária, na prática a covariância dos resíduos é considerada igual as covariâncias calculadas para as variáveis do atributo em estudo (Goovaerts, 1997).

Isaaks e Srivastava (1989) mostram que o parâmetro de Lagrange é introduzido na equação da variância do resíduo (usada na construção do sistema de krigagem ordinária), de uma maneira que não modifica o valor dessa variância. Esse artifício é utilizado a fim de garantir uma única solução para o sistema de krigagem ordinária, já que o sistema será, então, composto de  $(n+1)$  equações e  $(n+1)$  variáveis.

A variância de krigagem ordinária pode ser usada na determinação da incerteza de cada estimativa krigada (em cada local  $(u)$ ). A variância da krigagem ordinária é descrita como:

$$\sigma^2_{OK}(\mathbf{u}) = \sigma^2 - \left( \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i^{OK}(\mathbf{u}) C(\mathbf{u})_{(i0)} + \mu \right) \quad (5.15)$$

onde:

$\sigma^2_{OK}$ = variância de krigagem ordinária;

$\sigma^2$ = variância das amostras;

$C(\mathbf{u})_{(i0)}$ = covariância da  $i$ -ésima amostra usada na estimativa com o ponto a ser interpolado;

$\lambda_i^{OK}(\mathbf{u})$ = peso para a  $i$ -ésima amostra usada na estimativa;

$n$  = número de amostras usadas nas estimativas;

$\mu$  = parâmetro de Lagrange.

Estimativas feitas por krigagem simples e a variância atribuída para cada estimativa serão usadas na simulação do atributo vagarosidade de onda acústica (ver capítulo 6). A equação 5.10 é a equação da krigagem simples, logo, a krigagem simples não impõe restrições para os pesos de krigagem.

Os valores dos pesos de krigagem simples  $[\lambda_i^{SK}(\mathbf{u})]$  podem ser calculados resolvendo o sistema de krigagem simples. Um exemplo desse sistema é mostrado a seguir:

$$\left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j^{SK}(\mathbf{u}) \mathbf{C}(\mathbf{u})_{(ij)} = \mathbf{C}(\mathbf{u})_{(i0)} \quad i = 1, \dots, n \right.$$

(5.16)

Analisando-se a equação 5.10 pode-se dizer que na krigagem simples, quanto menor o somatório dos pesos atribuídos as amostras utilizadas, maior peso será atribuído a média estacionária, em cada estimativa. Quanto mais longe as amostras estiverem do ponto a ser interpolado, menores serão as covariâncias entre as amostras e o ponto, logo, menor serão os pesos atribuídos as amostras e a estimativa terá um valor mais parecido com a média estacionária.

A variância de cada estimativa feita por krigagem simples pode ser expressa como segue:

$$\sigma_{SK}^2(\mathbf{u}) = \sigma^2 - \sum_{i=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_i^{SK}(\mathbf{u}) \mathbf{C}(\mathbf{u})_{(i0)}$$

(5.17)

onde:

$\sigma_{SK}^2$  = variância de krigagem simples;

---

$\sigma^2$  = variância das amostras;

$C(u)_{(i_0)}$  = covariância da i-ésima amostra usada na estimativa com o ponto a ser interpolado;

$\lambda_i^{SK}(u)$  = peso para a i-ésima amostra usada na estimativa;

n = número de amostras usadas na estimativa.

### **5.3.1 Krigagem de Bloco**

As equações de krigagem mostradas até agora se referem a krigagem de pontos. Contudo, freqüentemente, prefere-se usar a krigagem de bloco (Isaaks e Srivastava, 1989). Na krigagem de bloco, a região em estudo é dividida em blocos (3D) ou quadrados (2D). Vários pontos dentro de cada bloco ou quadrado são interpolados, e a média dos valores dessas interpolações é o valor do atributo atribuído ao bloco ou quadrado. Assim, existirão estimativas ao longo de toda a região em estudo.

A quantidade de pontos que deverão ser interpolados dentro de cada bloco ou quadrado depende do grau de discretização desejado. Discretização é a divisão da área/ ou volume do quadrado/ ou bloco em vários pontos.

Contudo, dependendo do número de pontos a ser interpolado dentro de uma área ou volume, o esforço computacional exigido será muito grande, visto que, em cada ponto a ser interpolado, deverá ser resolvido um sistema de krigagem. Esse esforço computacional pode ser amenizado se apenas um sistema de krigagem, um pouco diferente do já apresentado, for resolvido para cada quadrado ou cubo.

Um exemplo de sistema de krigagem ordinária de bloco que deve ser resolvido em cada estimativa é apresentado a seguir (Isaaks e Srivastava, 1989):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j^{OK} C_{R(ij)} + \mu = C_{R(iA)} & i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^{OK} = 1 \end{cases}$$

(5.18)

onde:

$C_{R(ij)}$  = covariância entre amostras utilizadas na estimativa;

$\mu$  = parâmetro de Lagrange;

$\lambda_j^{OK}$  = peso para a j-ésima amostra usada na estimativa;

$C_{R(iA)}$  = Covariância média entre uma amostra e todos os pontos dentro de uma área A (área A será definida como a área do quadrado ou o volume do bloco).

A fórmula que define  $C_{R(iA)}$  é descrita a seguir:

$$C_{R(iA)} = \frac{1}{|A|} \sum_{j \in A} C_{R(ij)}$$

(5.19)

onde:

A = número de pontos discretizados dentro da área A.

A variância das estimativas feitas por krigagem ordinária de bloco pode ser escrita como:

$$\sigma_{OK}^2 = C_{R(AA)} - \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i^{OK} C_{iA} + \mu \right)$$

(5.20)

onde o valor  $C_{R(AA)}$  pode ser definido como:

$$C_{R(AA)} = \frac{1}{|A|^2} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} C_{R(ij)}$$

(5.21)

### **5.3.2 Validação Cruzada**

Antes da krigagem da vagarosidade de onda acústica, o variograma modelado e a estratégia de interpolação (parâmetros de krigagem) devem ser verificados. Essa verificação pode ser realizada por meio da chamada validação cruzada (Isaaks and Srivastava, 1989).

A validação cruzada consiste de remover um dado (amostra) do banco de dados e realizar a re-estimativa desse dado usando as amostras remanescentes. O valor da amostra removida é comparado com o valor da re-estimativa e a diferença entre esses valores é definida como erro. Espera-se que a média do erro seja próxima de zero e a variância seja a menor possível. Se o variograma modelado e a estratégia de interpolação não levam a esta condição desejada, os parâmetros são redefinidos e o processo é novamente realizado.

### **5.4 Krigagem Ordinária em Três Dimensões (3D)**

Esta seção apresenta a análise da continuidade dos valores de vagarosidade tridimensionais com elevação em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas, assim como a krigagem tridimensional em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas.

### **5.4.1 Variogramas de Vagarosidade de Onda Acústica (3D)**

Os variogramas experimentais de vagarosidade de onda acústica, construídos com banco de dados tridimensionais em coordenadas cartesianas e banco de dados tridimensionais em coordenadas estratigráficas, são apresentados nesta seção.

Geralmente, depósitos de carvão são formados por uma seqüência de diferentes estratos, conforme havia sido comentado no capítulo 3. Cada estrato apresenta propriedades físicas intrínsecas a cada tipo de litologia, logo é esperado que a vagarosidade de onda acústica seja semelhante entre os pontos amostrados que pertencem a um mesmo estrato.

Normalmente, esses estratos apresentam formas horizontais e a direção de menor continuidade tende a coincidir com a direção da espessura de cada camada. Não existe uma evidência de algum processo geológico severo, como dobramento ou falhamento, que tenha ocorrido na região do depósito em estudo. Conseqüentemente, é provável que a direção vertical seja a direção de menor continuidade (variograma experimental com o menor alcance) e a direção horizontal seja a de maior continuidade.

Os variogramas experimentais verticais das amostras de vagarosidade de onda acústica, em coordenadas cartesianas e estratigráficas, são apresentados na Figura 5.4. Estes variogramas são iguais, visto que as coordenadas das amostras no plano norte-leste (XY) e distância vertical entre elas é a mesma para os dois banco de dados.

A Figura 5.4 mostra que a variabilidade média entre amostras aumenta rapidamente nos primeiros metros, e esse crescimento é atenuado até alcançar o patamar. Esse rápido aumento ocorre devido a natureza do atributo que está sendo analisado, por exemplo, a variável vagarosidade é muito sensível a pequenas variações na composição das rochas. Isto quer dizer, que dentro de uma faixa de possíveis valores, a variável vagarosidade pode apresentar valores um tanto diferentes a pequenas distâncias (alto efeito pepita). Inversamente, a atenuação desse crescimento ocorre devido a estratigrafia do depósito. A estratigrafia mostra

diferentes camadas intercaladas (ver capítulo 3), conseqüentemente a vagarosidade de onda acústica é semelhante dentro de certos tipos de rochas os quais se repetem em várias profundidades. Essa tendência causa um “hole effect” no variograma (Isaaks e Srivastava, 1989).

Isaaks e Srivastava (1989) comentam que “hole effect” ocorre em fenômenos onde existe uma ciclicidade ou repetição natural das camadas, como é o caso do depósito em estudo. Esse “hole effect” é melhor observado no correlograma experimental vertical das amostras de vagarosidade de onda acústica (ver Figura 5.5).

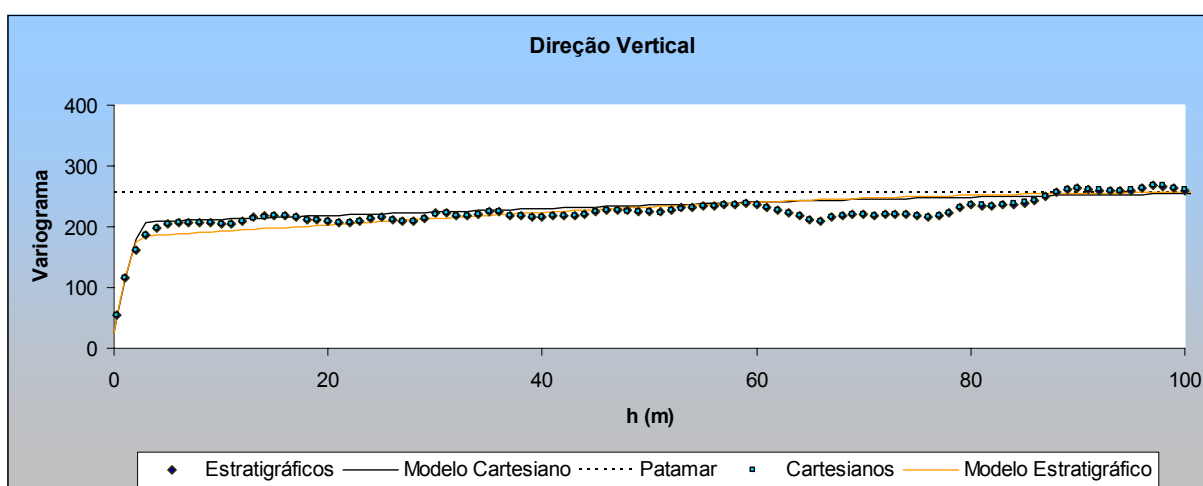


Figura 5.4- Variograma experimental vertical e seu modelo.

A Figura 5.6 mostra os variogramas experimentais horizontais omnidirecionais das amostras de vagarosidade de onda acústica em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas. O variograma omnidirecional é construído a fim de fornecer parâmetros, como o efeito pepita e o patamar, que deverão ser usados nos variogramas direcionais e para fornecer um comportamento aproximado desses variogramas. Um variograma experimental omnidirecional é construído com pares de amostras encontradas em todas as direções do plano XY.

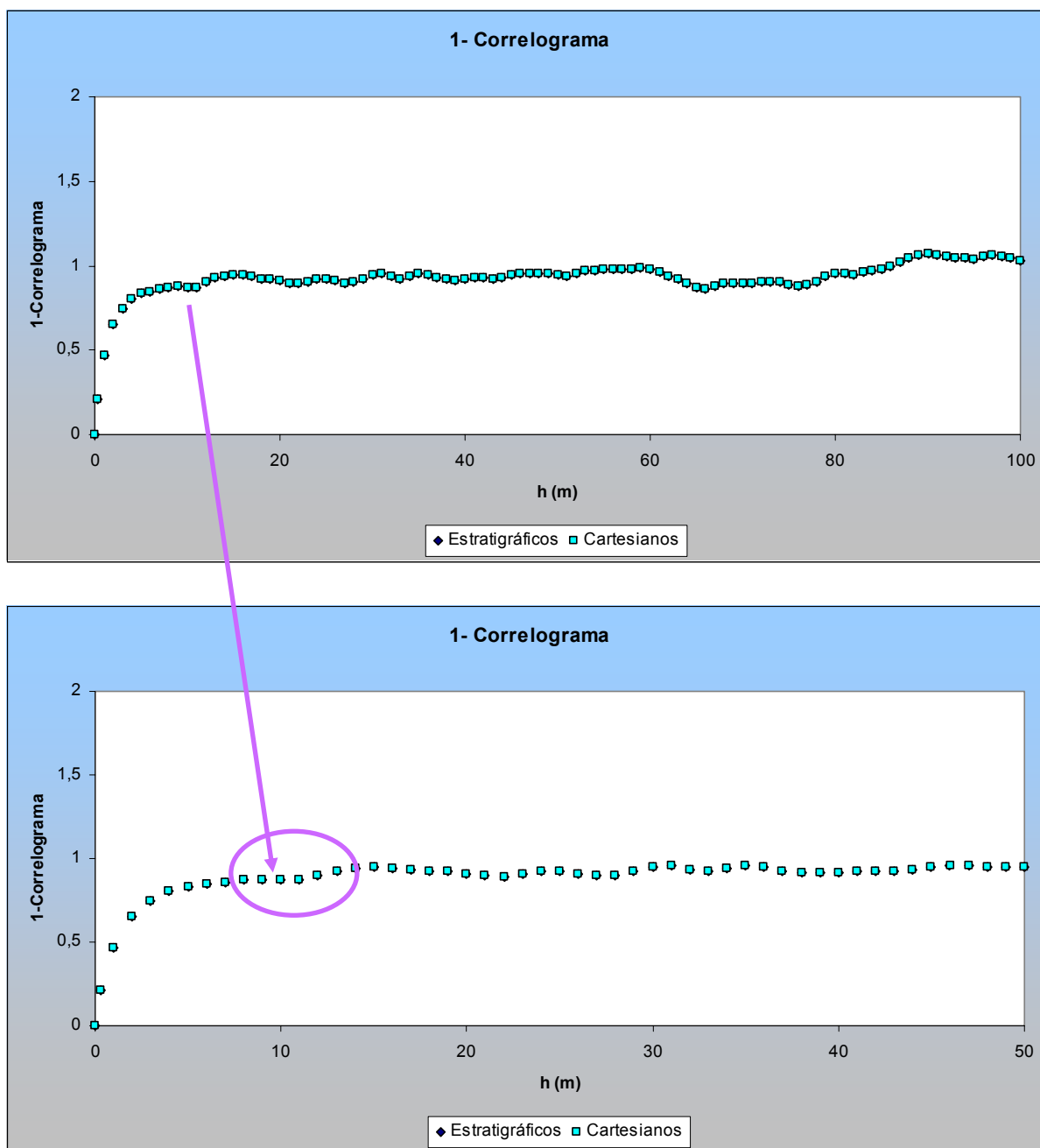


Figura 5.5- Correlograma experimental vertical.

Os variogramas da Figura 5.6 mostram uma grande continuidade na direção horizontal, típica dos depósitos de carvão, visto que a variância dos dados originais (patamar) não é alcançada, pelo menos para uma distância tão grande quanto o comprimento do depósito de carvão.

Analisando-se os variogramas experimentais omnidirecionais, pode-se observar que os variogramas dos dados em coordenadas cartesianas apresentam um comportamento muito parecido com o comportamento dos variogramas dos



dados em coordenadas estratigráficas, porém a variabilidade dos dados em coordenadas cartesianas é maior em todos os pontos dos variogramas. Isso evidencia que as camadas do depósito de carvão, em coordenadas cartesianas, são quase horizontais, como já havia sido comentado no capítulo 3. Porém, o leve dobramento (ou mergulho quasi-horizontal) das camadas em coordenadas cartesianas ao longo da extensão do depósito fez com que amostras de domínios geológicos diferentes fossem comparadas, o que aumenta a variabilidade entre amostras. Provavelmente, isso ocorreu nas regiões de mudança de estrato ou quando amostras de estratos mais finos (como camadas de carvão) foram incluídas no cálculo do variograma. A Figura 5.7 apresenta o esquema de como os pares de amostras em coordenadas cartesianas foram escolhidos.

Apesar da transformação das coordenadas originais do banco de dados em coordenadas estratigráficas não garantir que todos os pares de amostras incluam amostras de um mesmo domínio geológico, a utilização desse sistema de coordenadas garantiu uma melhor caracterização da correlação espacial das amostras de vagarosidade de onda acústica.

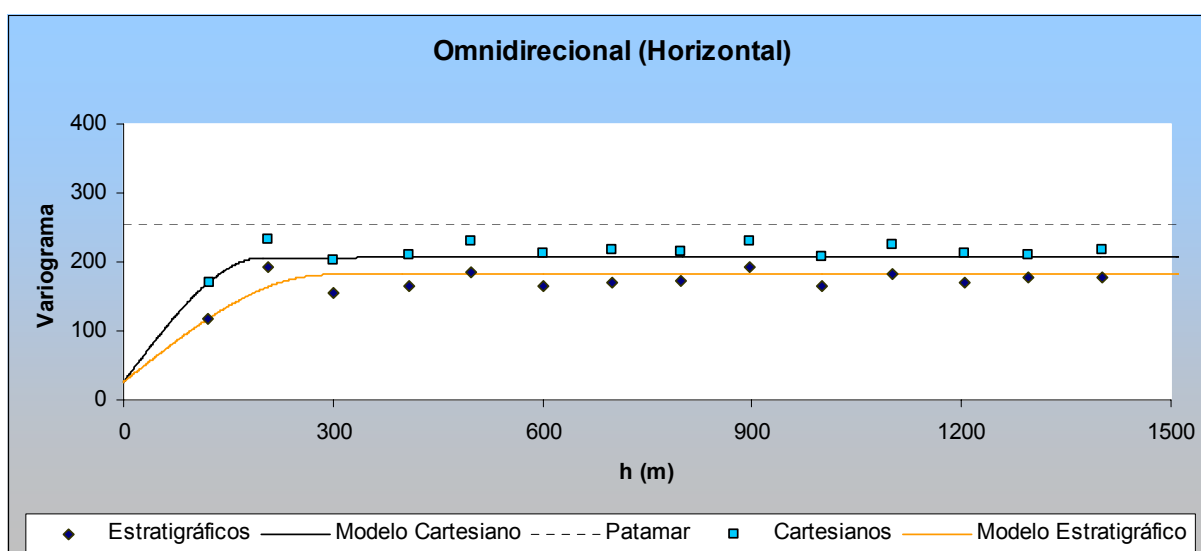


Figura 5.6- Variograma experimental omnidirecional horizontal e seu modelo.

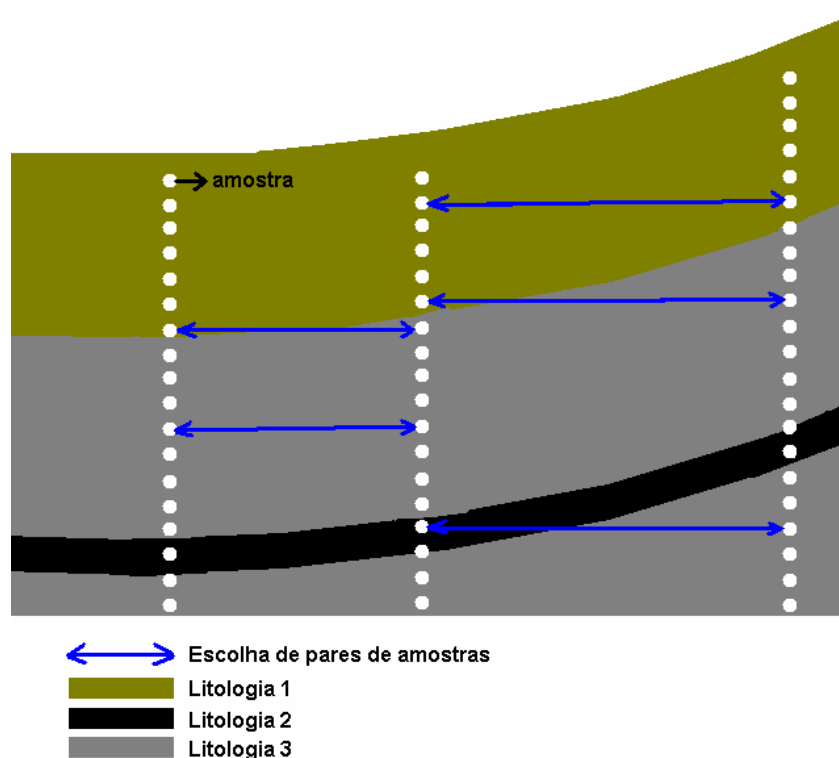


Figura 5.7- Esquema de como pares de amostras foram escolhidos (coordenadas cartesianas).

As Figuras 5.8 a 5.15 mostram variogramas experimentais horizontais, construídos com amostras em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas, nas direções azimutais de  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente. Com a análise dos variogramas horizontais direcionais, pode-se dizer que não existe uma direção horizontal preferencial, tanto para o depósito em coordenadas cartesianas como para o depósito em coordenadas estratigráficas. Assim, os parâmetros encontrados nos variogramas experimentais omnidirecionais serão usados na etapa de krigagem dos respectivos depósitos (em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas).

Dois modelos esféricos foram ajustados a cada variograma experimental apresentado nesta seção. Esse tipo de estrutura geralmente se ajusta bem a variogramas experimentais de atributos de depósitos de carvão (Borba et al., 1996).

A dificuldade de modelamento de variogramas em três direções pode ser evidenciada pelo fato de que os variogramas experimentais verticais das amostras de vagarosidade, que são iguais para coordenadas cartesianas e estratigráficas, tiveram que ser modelados de maneiras diferentes em cada caso, visto que os modelos horizontais e verticais devem apresentar o mesmo patamar em todas

estruturas. No entanto, os valores de patamar nos variogramas horizontais são diferentes em cada caso.

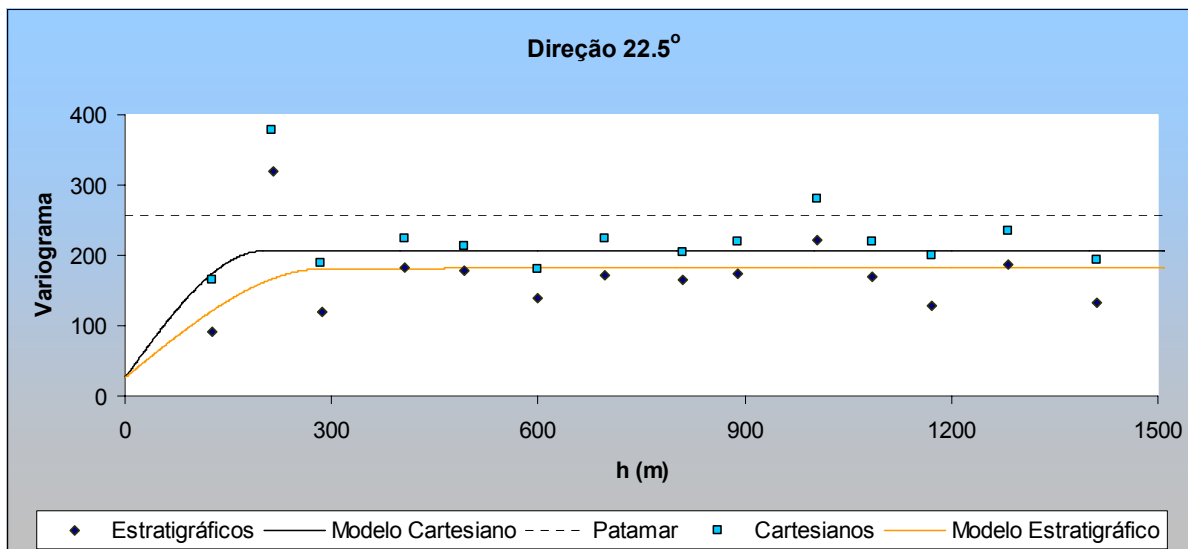


Figura 5.8- Variograma experimental na direção 22,5° (direção azimutal) e seu modelo.

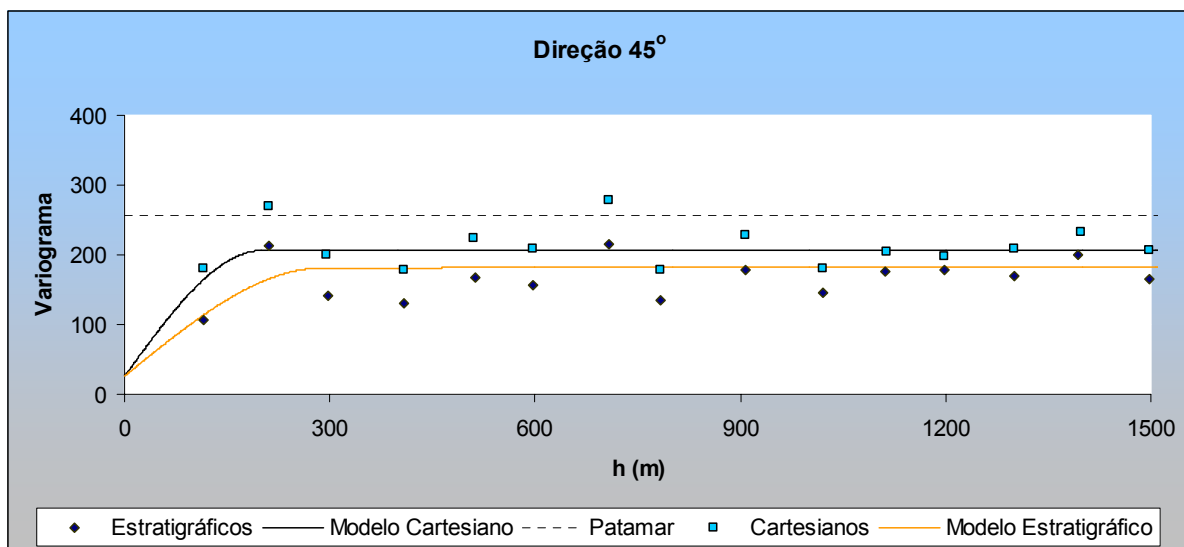


Figura 5.9- Variograma experimental na direção 45° (direção azimutal) e seu modelo.

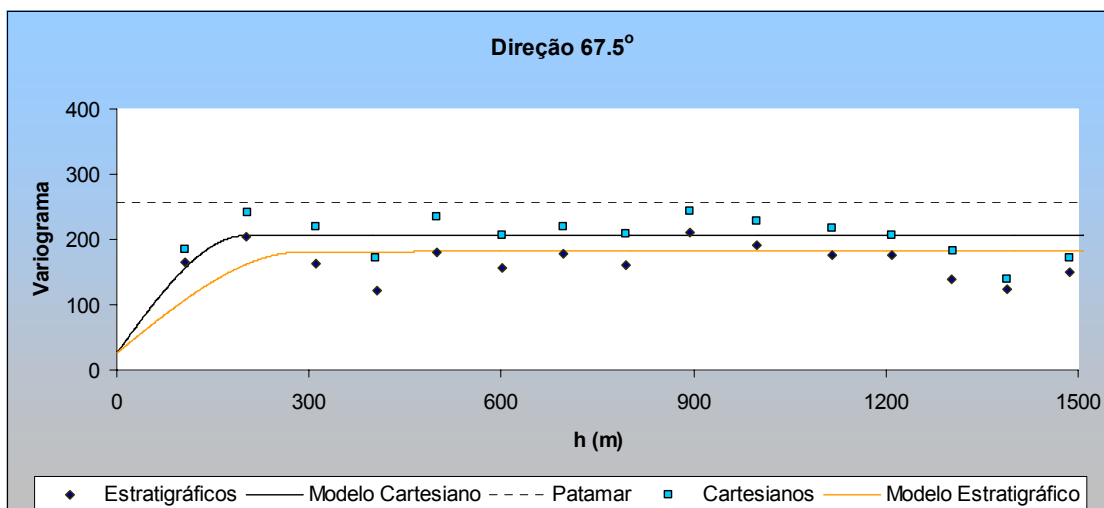


Figura 5.10- Variograma experimental na direção 67,5° (direção azimutal) e seu modelo.

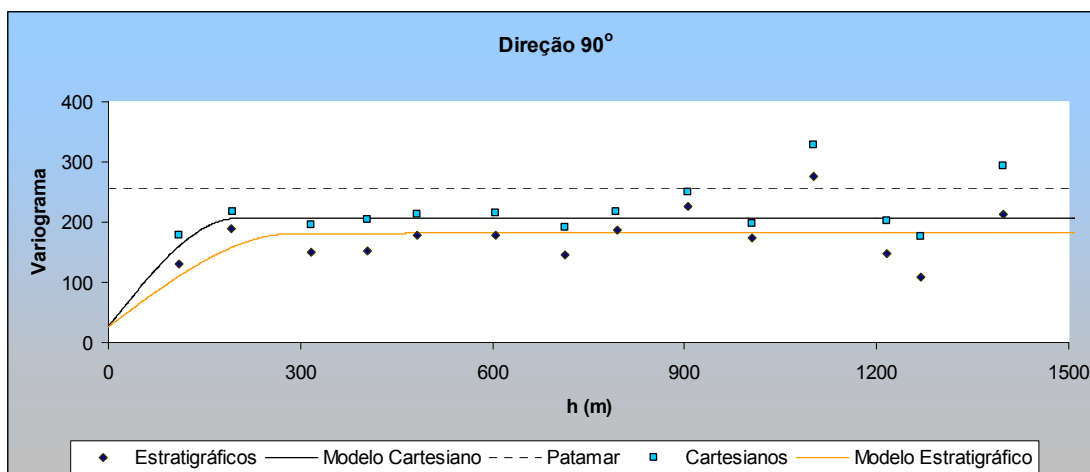


Figura 5.11- Variograma experimental na direção 90° (direção azimutal) e seu modelo.

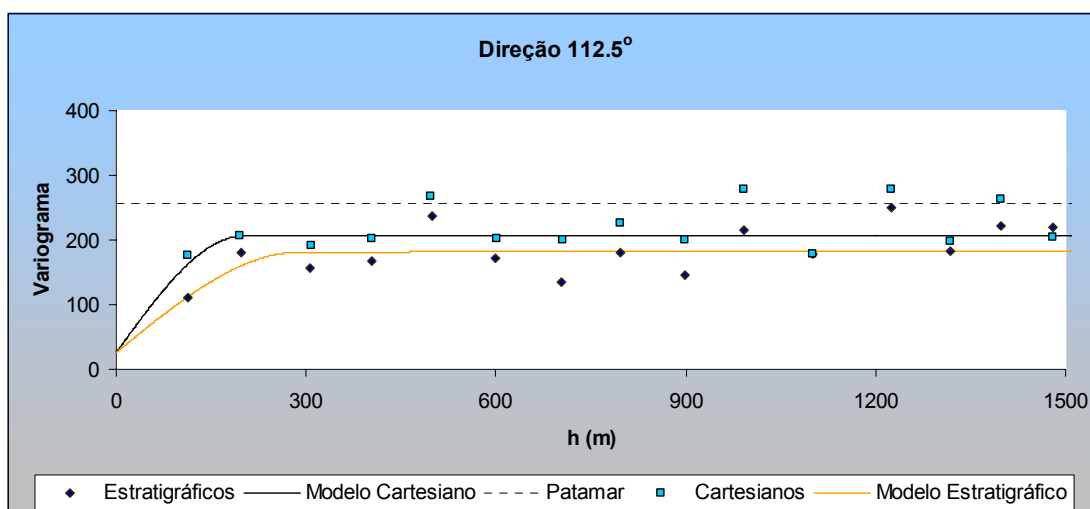


Figura 5.12- Variograma experimental na direção 112,5° (direção azimutal) e seu modelo.

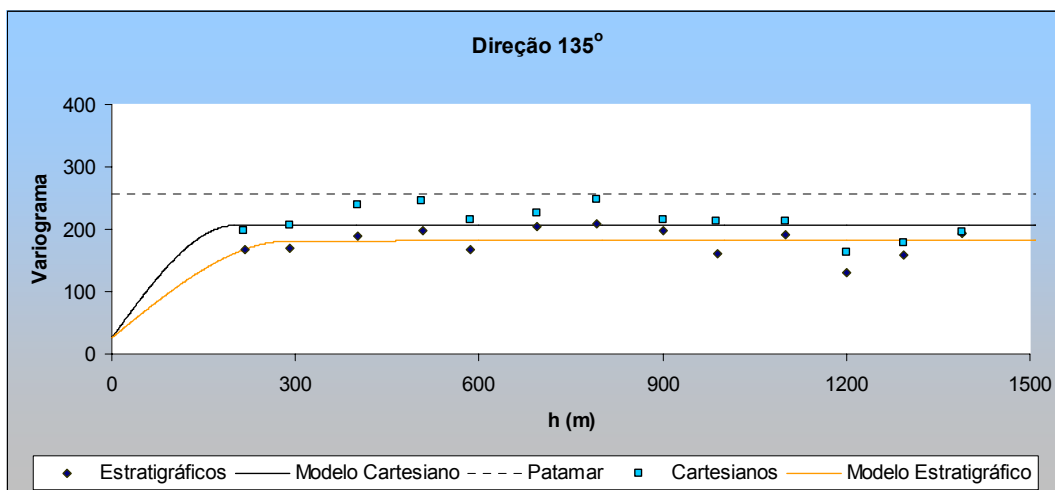


Figura 5.13- Variograma experimental na direção 135° (direção azimutal) e seu modelo.

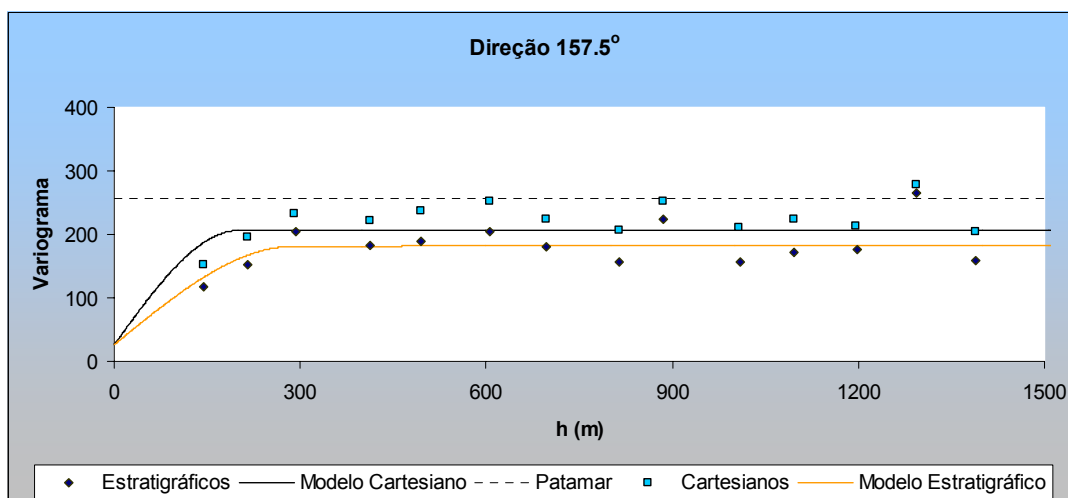


Figura 5.14- Variograma experimental na direção 157,5° (direção azimutal) e seu modelo.

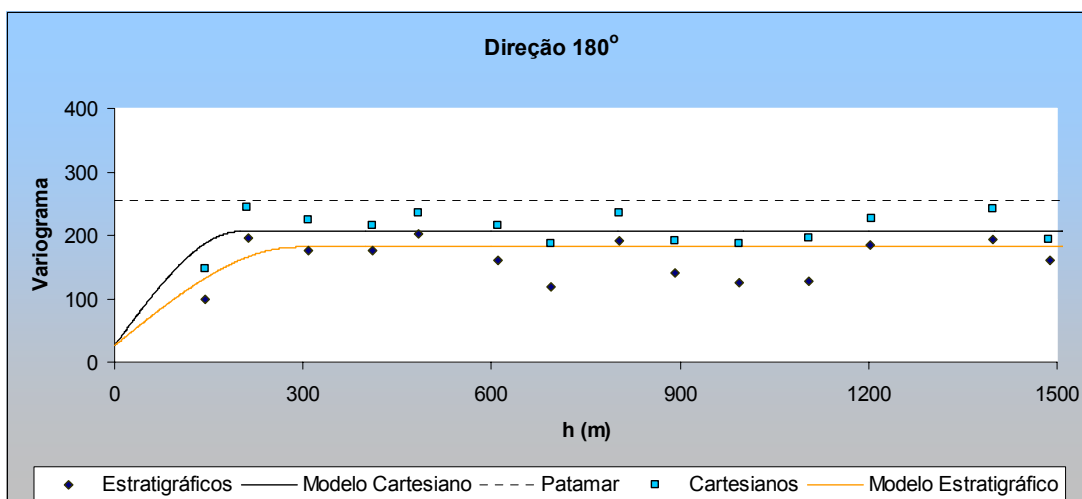


Figura 5.15- Variograma experimental na direção 180° (direção azimutal) e seu modelo.

A função variograma ajustada para os variogramas estratigráficos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 26 + 155 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}90^\circ}}{290}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}0^\circ}}{290}, \frac{\mathbf{h}_{\text{dip}90^\circ}}{2,5}\right) + 75 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}90^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}0^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{dip}90^\circ}}{100}\right) \quad (5.22)$$

A função variograma ajustada para os variogramas cartesianos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 26 + 180 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}90^\circ}}{200}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}0^\circ}}{200}, \frac{\mathbf{h}_{\text{dip}90^\circ}}{3}\right) + 50 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}90^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}0^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{dip}90^\circ}}{120}\right) \quad (5.23)$$

#### **5.4.2 Validação Cruzada**

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de vagarosidade e suas estimativas, resultantes da primeira validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de vagarosidade (3D) em coordenadas estratigráficas. Os parâmetros de busca e variograma utilizados nessa validação cruzada estão listados na Tabela 5.1.

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de vagarosidade e suas estimativas resultantes da primeira validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de vagarosidade (3D) em coordenadas cartesianas. Os parâmetros de busca e variograma utilizados nessa validação cruzada estão listados na Tabela 5.2.

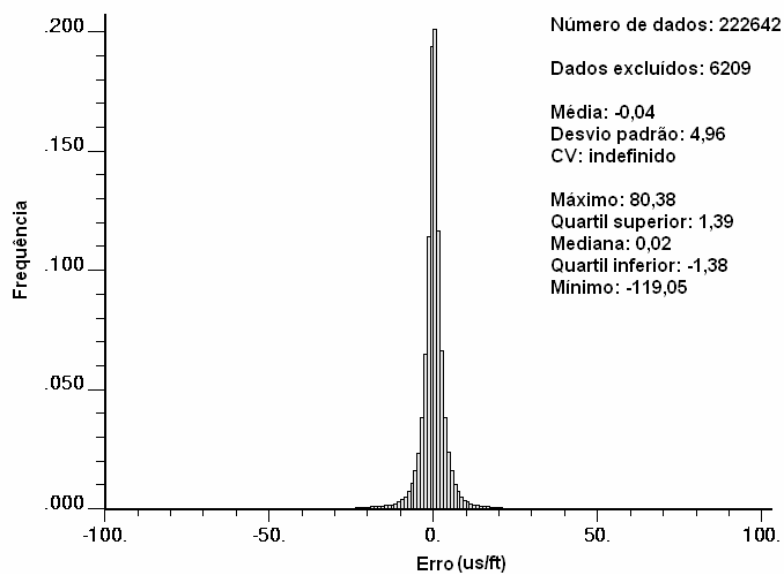


Figura 5.16- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica (amostras em coordenadas estratigráficas).

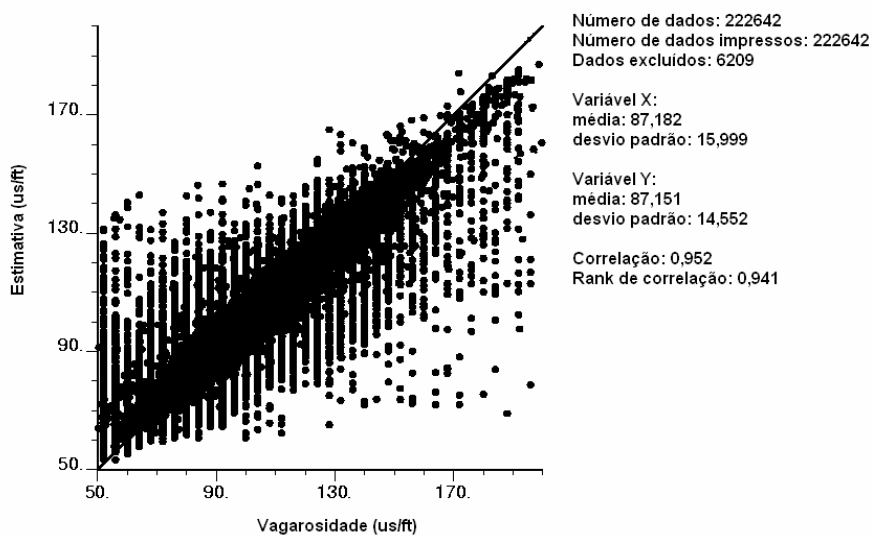


Figura 5.17- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas estratigráficas).

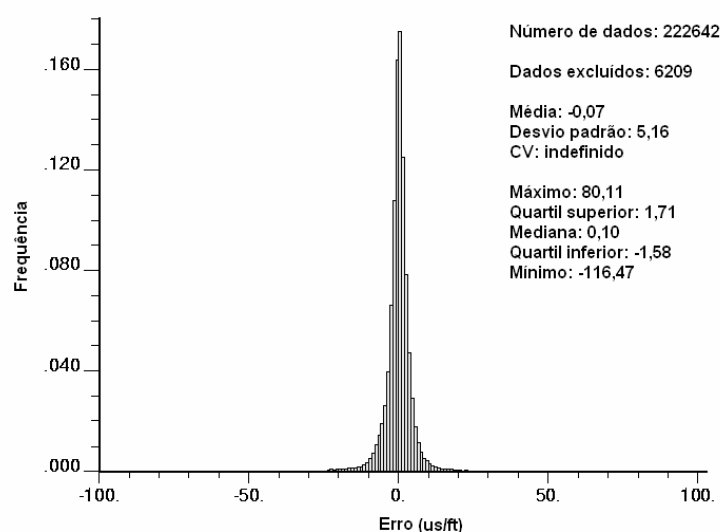


Figura 5.18- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica (amostras em coordenadas cartesianas).

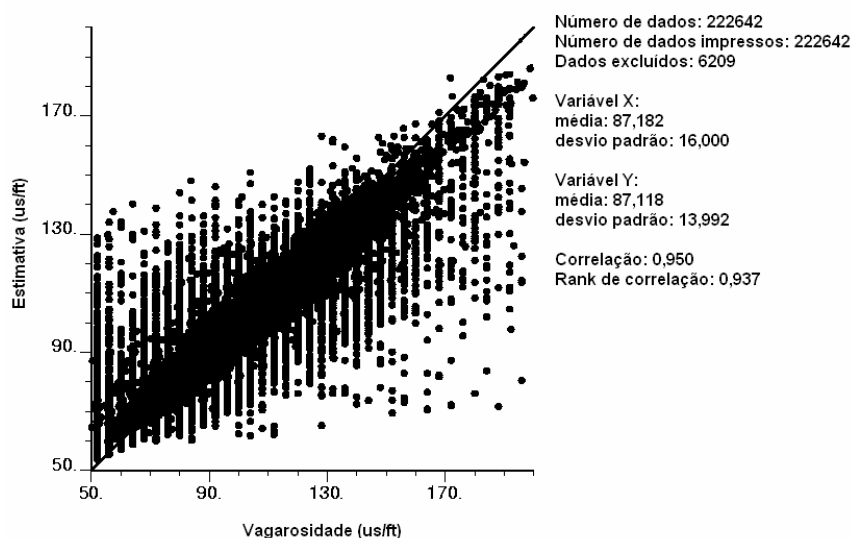


Figura 5.19- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas cartesianas).

A média do erro e a correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas, resultantes desta primeira verificação feita por validação cruzada, mostram que os parâmetros de busca e variograma que serão utilizados na krigagem foram bem escolhidos, tanto para o depósito em coordenadas cartesianas como para o depósito em coordenadas estratigráficas. Contudo, esses resultados otimistas podem ter sido causados pela configuração das amostras. O banco de dados é densamente amostrado ao longo da direção vertical, logo, a re-estimativa



dessas amostras usando os dados remanescentes mais próximos tendem a produzir erros menores. Isso não é o que acontece em zonas entre os furos perfilados, onde as distâncias em relação as amostras mais próximas serão muito maiores. Assim, uma segunda validação cruzada foi realizada, restringindo o uso de amostras que estivessem a distâncias menores que 80m (menor distância de separação entre furos perfilados) em cada estimativa.

**Tabela 5.1- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.**

<b>Parâmetros de busca e variograma</b>	
Mínimo de dados para krigagem	3
Máximo de dados para krigagem	16
Máximo de dados por octante	2
Tipo de krigagem	krigagem ordinária
Máximo raio de busca (x, y, z)	1200m; 1200m; 2,5m
Variograma- número de estruturas	2
Variograma- efeito pepita	26
Variograma- modelos (2)	Esférico
Variograma- primeira estrutura - patamar	155
Variograma- primeira estrutura – alcance (x,y,z)	290m; 290m; 2,5m
Variograma- segunda estrutura – patamar	75
Variograma- segunda estrutura – alcance (x,y,z)	100000m; 100000m; 100m

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de vagarosidade e suas estimativas, resultantes da segunda validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de vagarosidade (3D) em coordenadas estratigráficas. As Figuras 5.22 e 5.23 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de vagarosidade e suas estimativas, resultantes da segunda validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de vagarosidade (3D) em coordenadas cartesianas.

**Tabela 5.2- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.**

<b>Parâmetros de busca e variograma</b>	
Mínimo de dados para krigagem	3
Máximo de dados para krigagem	16
Máximo de dados por octante	2
Tipo de krigagem	Krigagem Ordinária
Máximo raio de busca (x, y, z)	1200m; 1200m; 2,5m
Variograma- número de estruturas	2
Variograma- efeito pepita	26
Variograma- modelos (2)	Esférica
Variograma- primeira estrutura - patamar	180
Variograma- primeira estrutura – alcance (x,y,z)	200; 200; 3m
Variograma- segunda estrutura – patamar	50
Variograma- segunda estrutura – alcance (x,y,z)	100000m; 100000m; 120m

Os seguintes comentários podem ser feitos a respeito das duas validações cruzadas realizadas para cada banco de dados (em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas): a média do erro resultante da segunda validação cruzada, foi mais próxima de zero do que a média do erro da primeira validação cruzada. Isso ocorreu ao contrário do que se esperava, visto que, a segunda validação cruzada usou parâmetros de busca mais conservadores. Porém, isso pode ser facilmente explicado. A ordem de grandeza da média do erro é muito pequena e facilmente influenciada por alguns valores extremos, logo, uma diferença de erro na segunda casa decimal não deve ser considerada uma grande diferença. As duas validações cruzadas apresentaram a proporção de erros positivos e negativos quase igual, porém, de um modo geral, a ordem de grandeza dos erros positivos e negativos resultantes da segunda validação cruzada foi um pouco maior do que aqueles resultantes da primeira, resultando em um desvio padrão maior dos valores de erro da segunda validação. Por isso, a segunda validação cruzada ainda pode ser considerada mais conservadora e melhor para análise do desempenho dos parâmetros de busca e variograma escolhidos.

Utilizando-se a segunda validação cruzada para análise do desempenho dos parâmetros de busca e variograma escolhidos para a krigagem de cada banco de dados, pode-se ainda dizer que esses parâmetros foram bem escolhidos.

A diferença dos resultados das validações cruzadas para os bancos de dados em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas não foi significativa, portanto os resultados dessas validações não podem ser usados para a escolha do banco de dados que fornecerá as melhores estimativas de vagarosidade.

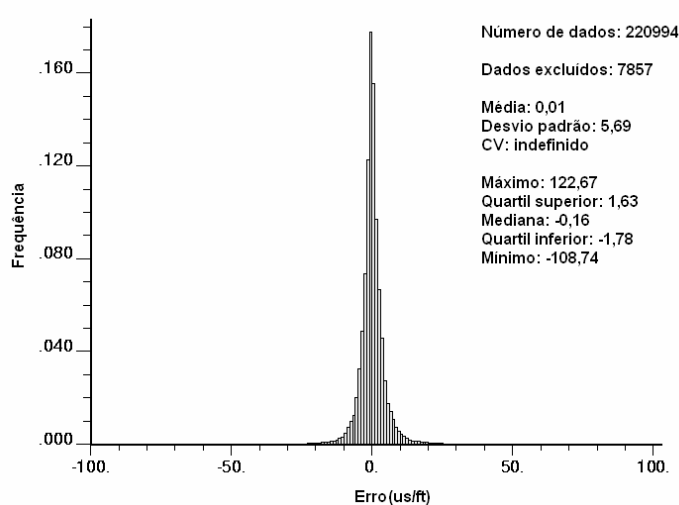


Figura 5.20- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica, utilizando amostras em coordenadas estratigráficas (usando um mínimo de separação entre amostras).

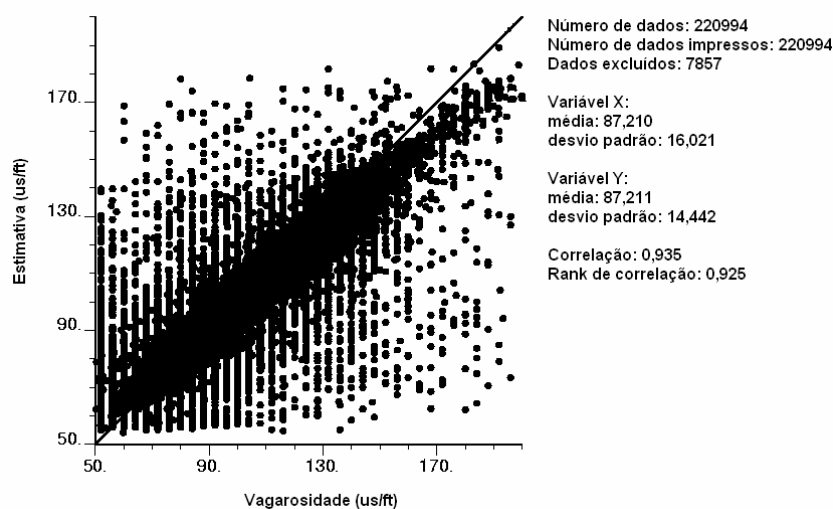


Figura 5.21- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas estratigráficas).

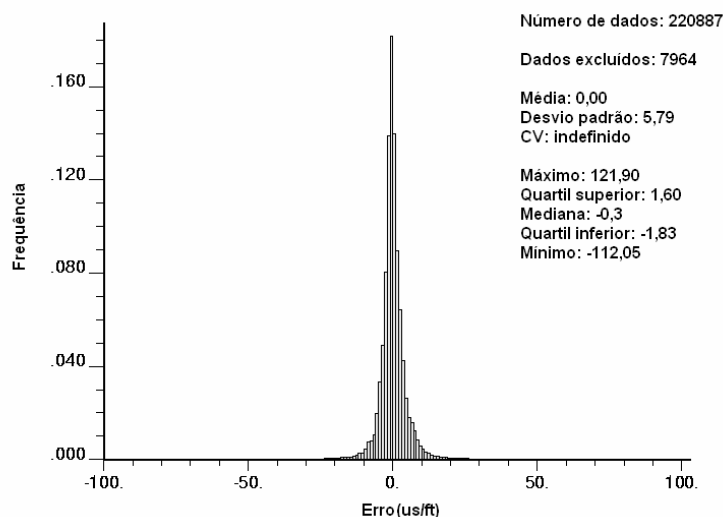


Figura 5.22- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade de onda acústica, utilizando amostras em coordenadas cartesianas (usando um mínimo de separação entre amostras).

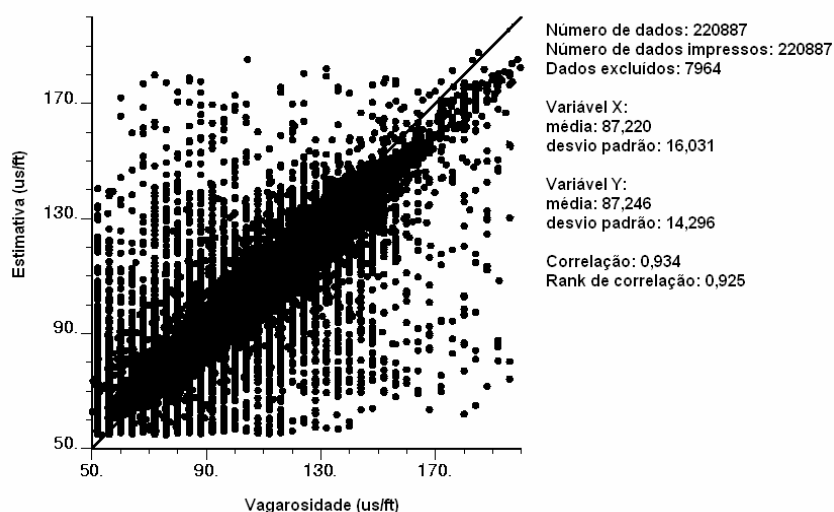


Figura 5.23- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade de onda acústica e suas estimativas. (amostras em coordenadas cartesianas).

### 5.4.3 Resultados da Krigagem Ordinária

Nesta seção, serão apresentados os resultados da krigagem ordinária dos dados de vagarosidade (3D) de onda acústica utilizando dados em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas. Esses resultados serão, também,

comparados, a fim de que se possa escolher o banco de dados que produz melhores estimativas do atributo em estudo.

#### **5.4.3.1 Krigagem Ordinária Utilizando Banco de Dados em Coordenadas Estratigráficas**

A realização da krigagem ordinária de bloco, utilizando banco de dados em coordenadas estratigráficas, gerou estimativas para 2205450 blocos de 50 x 50 x 0,5 m orientados ao longo das direções leste, norte e vertical, respectivamente (65 nós na direção leste x 58 nós na direção norte x 585 nós na direção vertical). Esses blocos formam o chamado modelo de blocos da krigagem ordinária, o qual a origem, no canto inferior esquerdo do modelo, possui as coordenadas 654175 m, 7443375 m e -66,25 metros.

A Figura 5.24 mostra o histograma para as estimativas, o qual é semelhante (desconsiderando o conhecido efeito de suavização da krigagem) ao histograma para as amostras desagrupadas (em coordenadas estratigráficas) de vagarosidade de onda acústica (ver capítulo 4). Os valores krigados no modelo reproduzem a estatística dos dados originais (o banco de dados original e o modelo interpolado dividem estatísticas semelhantes).

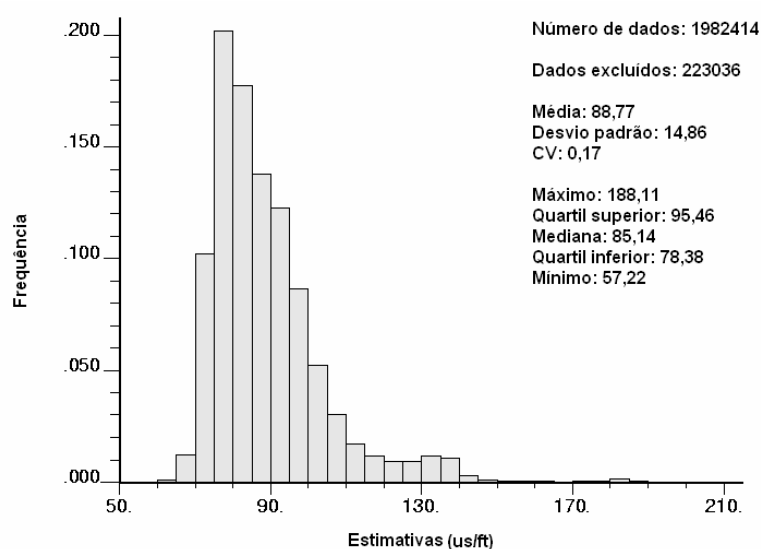
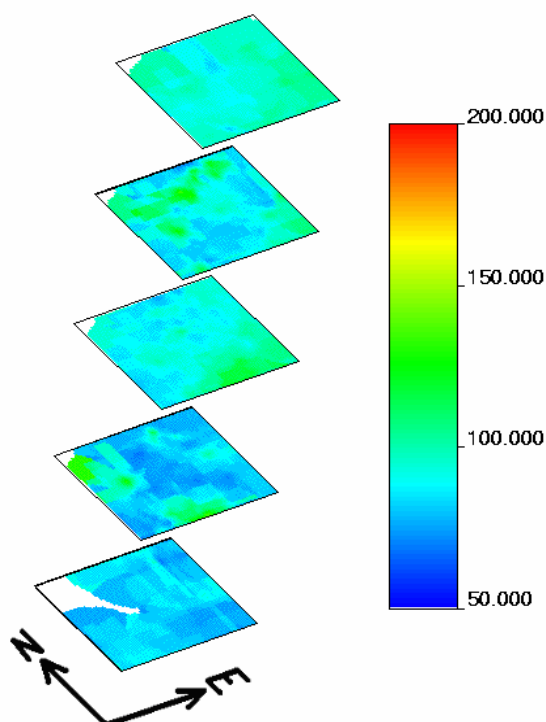


Figura 5.24- Histograma para os blocos krigados.

*Nota: O número de dados excluídos nos histogramas construídos com os valores krigados e simulados (capítulo 6) referem-se aos valores iguais a -999,000, que são os valores atribuídos aos nós onde não ocorreram estimativas ou simulação.*

As Figuras 5.25 a 5.27 mostram seções do modelo de blocos resultante da krigagem em várias direções, em coordenadas estratigráficas. O conhecido efeito de suavização do algoritmo de krigagem é fortemente observado nessas figuras.

A principal camada de carvão do depósito em estudo (GCWS) pode ser bem visualizada nas figuras das seções do modelo de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas, visto que os valores de vagarosidade atribuídos as camadas de carvão do depósito são diferentes dos valores de vagarosidade atribuídos as outras camadas, aproximadamente  $125\mu\text{s}/\text{ft}$  (ver seção 5.4.4). A Figura 5.28 mostra uma dessas seções ampliada.



**Figura 5.25- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.**

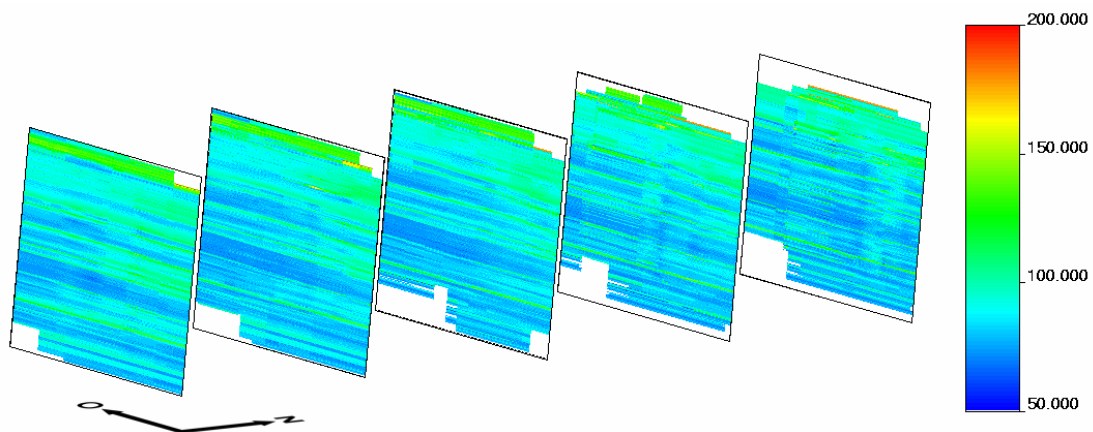


Figura 5.26- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

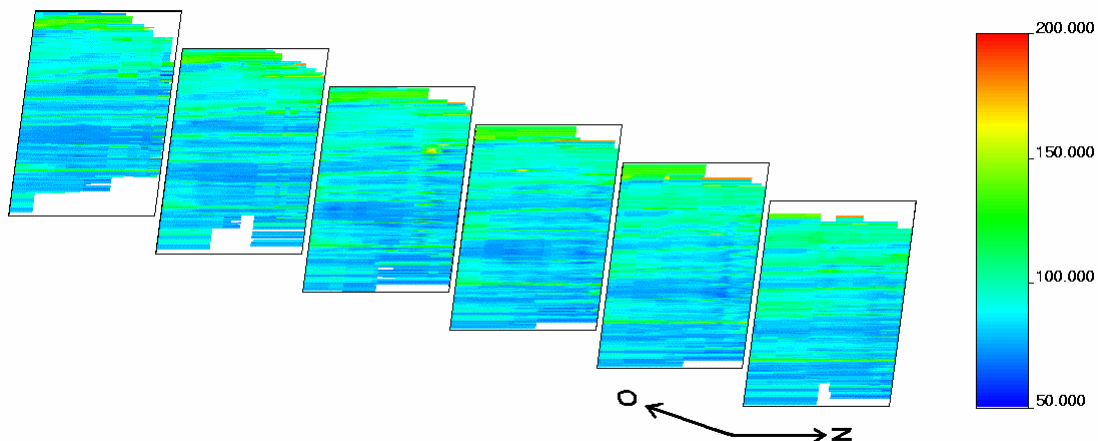
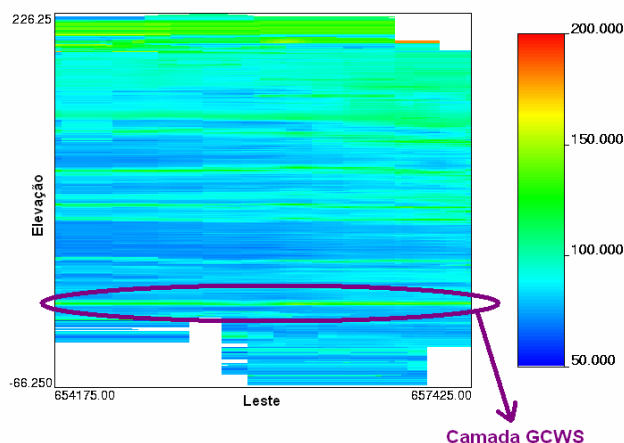


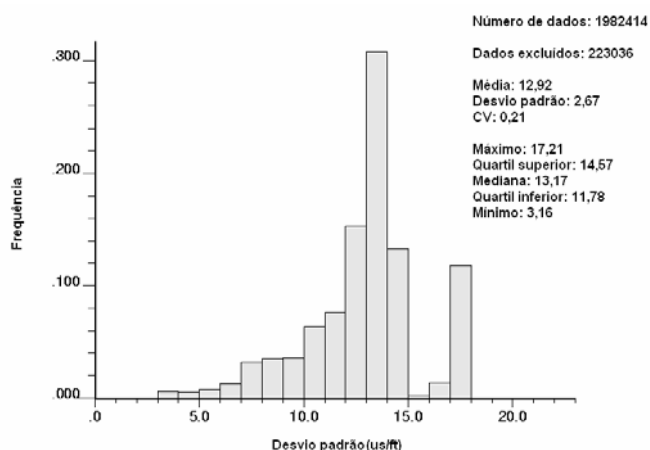
Figura 5.27- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos resultante da krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.



**Figura 5.28-** Seção vertical (vista do plano XZ) na coordenada 744850 na direção norte, mostrando a posição aproximada da principal camada de carvão do depósito.

A Figura 5.29 mostra o histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de *grid*, enquanto as Figuras 5.30 a 5.32 mostram seções do modelo de blocos das estimativas de desvio padrão de krigagem ao longo de várias direções.

O desvio padrão de krigagem depende da distância variográfica (depende dos valores de covariância entre as amostras utilizadas e o ponto que foi estimado) dos dados. Logo, o desvio padrão calculado em nós de *grid* próximos (geoestatisticamente) aos dados, serão valores mais baixos do que em outras posições. Este efeito pode ser observado nas Figuras 5.30 a 5.32 onde as manchas azuis (valores mais baixos de desvio padrão) coincidem com as localizações dos furos perfilados (localizações das amostras).



**Figura 5.29-** Histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de *grid*.



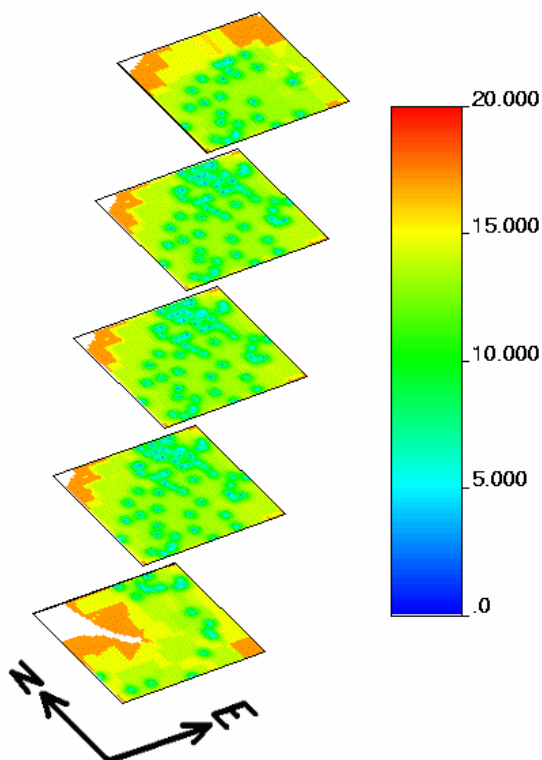


Figura 5.30- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

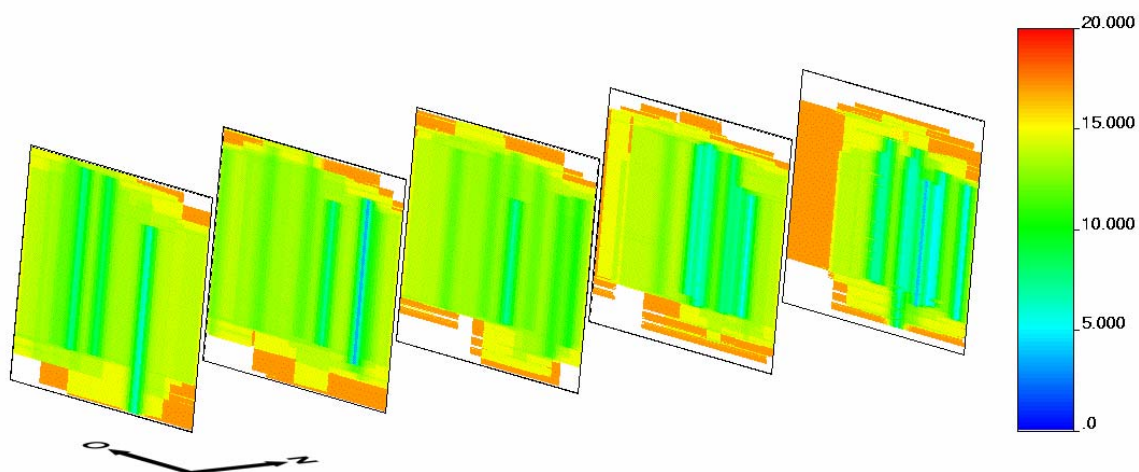


Figura 5.31- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

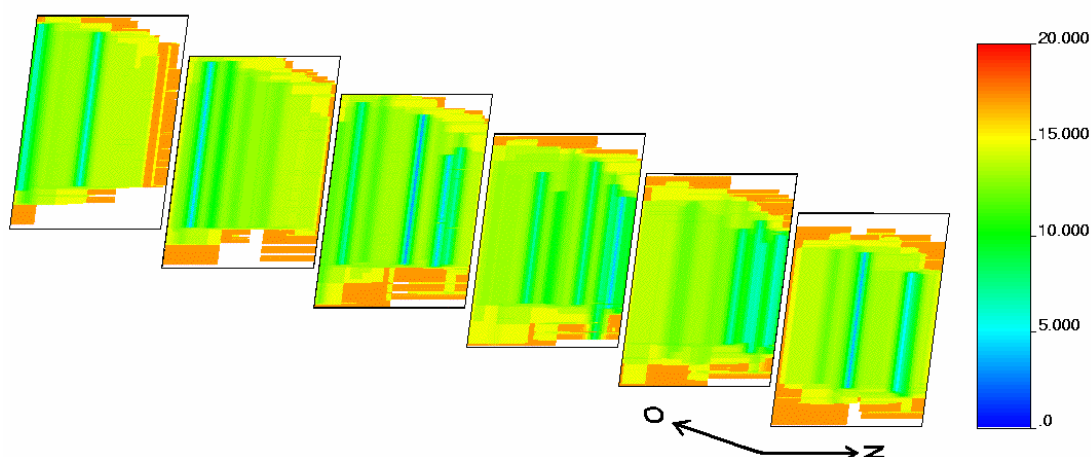


Figura 5.32- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem (coordenadas estratigráficas). A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

#### **5.4.3.2 Krigagem Ordinária Utilizando Banco de Dados em Coordenadas Cartesianas**

A realização da krigagem ordinária de bloco, utilizando banco de dados em coordenadas cartesianas, gerou estimativas para 2205450 blocos de 50 x 50 x 0,5 m orientados ao longo das direções leste, norte e vertical, respectivamente (65 nós na direção leste x 58 nós na direção norte x 585 nós na direção vertical). Esses blocos formam o chamado modelo de blocos da krigagem ordinária, o qual a origem, no canto inferior esquerdo do modelo, possui as coordenadas 654175 m, 7443375 m e 1889,75 metros.

A Figura 5.33 mostra o histograma para as estimativas. Esse possui menor semelhança com o histograma para as amostras desagrupadas (em coordenadas cartesianas) de vagarosidade de onda acústica (ver capítulo 4) do que o histograma para os valores krigados com banco de dados em coordenadas estratigráficas, visto que apresenta maior frequência dos valores próximos da média e menor frequência de valores altos do que os outros dois histogramas. A explicação para essa diferença será comentada na próxima seção.

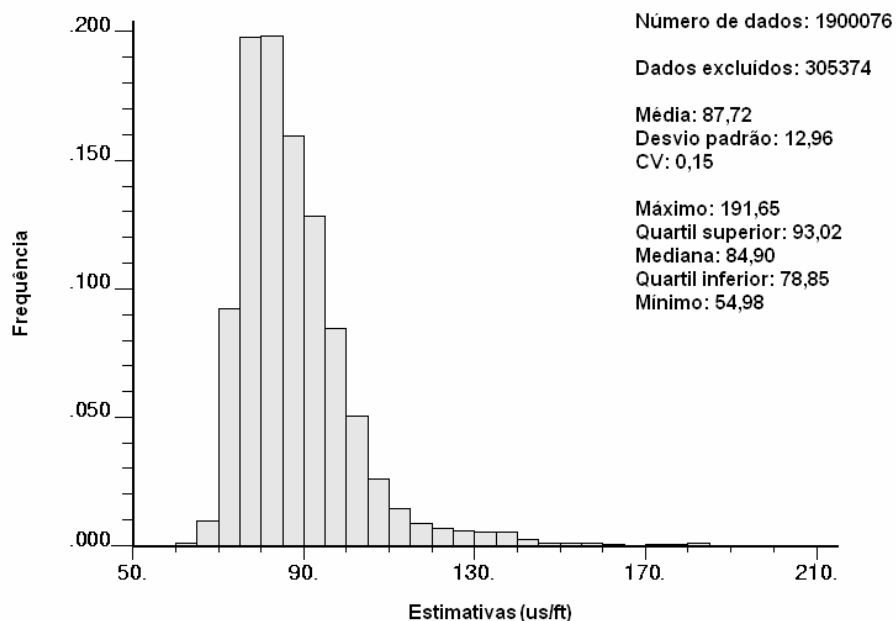


Figura 5.33- Histograma para os blocos krigados.

As Figuras 5.34 a 5.36 mostram seções do modelo de blocos resultante da krigagem em várias direções.

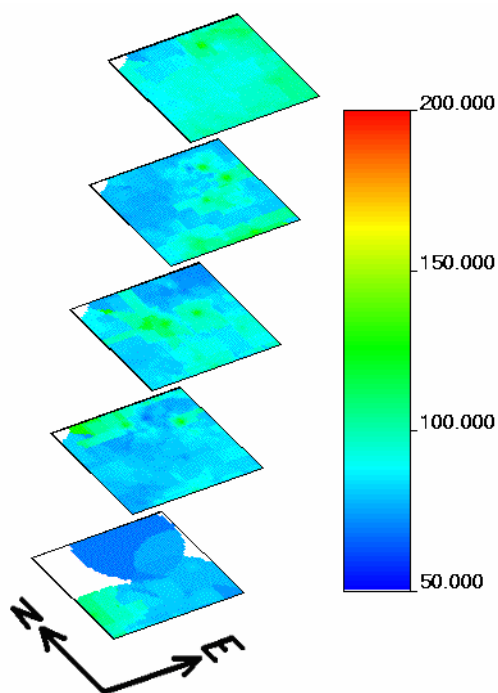


Figura 5.34- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagariedade de onda acústica.

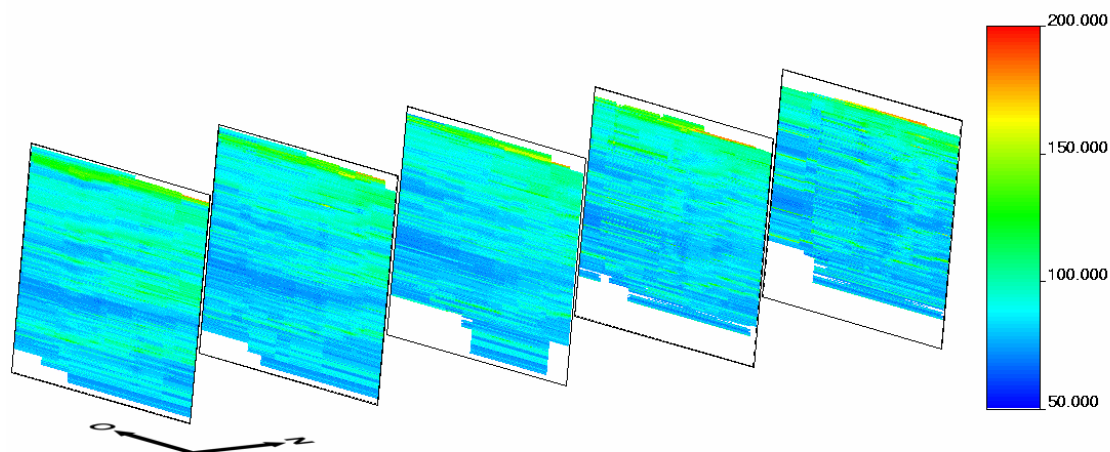


Figura 5.35- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

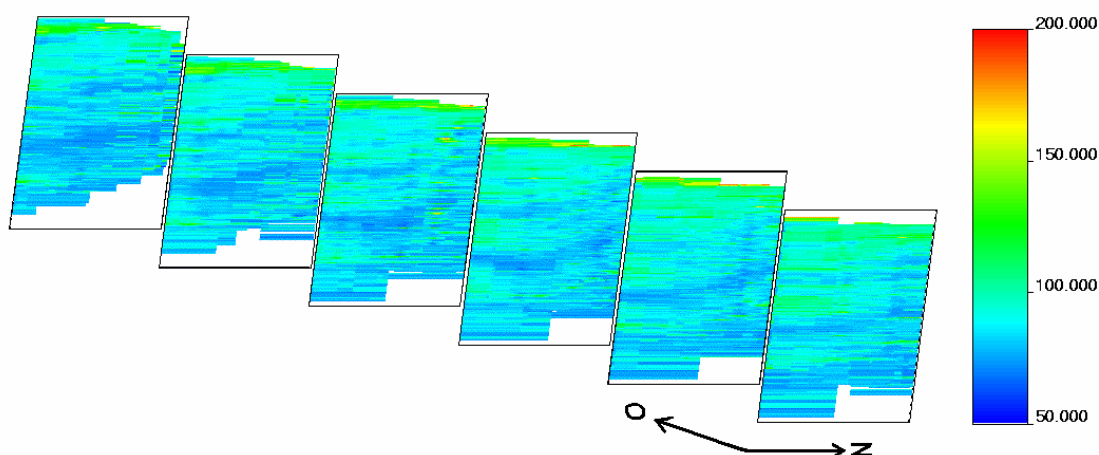


Figura 5.36- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos resultante da krigagem. A escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

A Figura 5.37 mostra o histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de *grid*, enquanto as Figuras 5.38 a 5.40 mostram seções do modelo de blocos das estimativas de desvio padrão de krigagem ao longo de várias direções.

Os valores de desvio padrão resultantes da krigagem com coordenadas estratigráficas foram, em média, inferiores aos valores de desvio padrão resultantes da krigagem com coordenadas cartesianas, devido a diferença entre os valores de

covariância das amostras em coordenadas cartesianas e das amostras em coordenadas estratigráficas (ver seção 5.4.1).

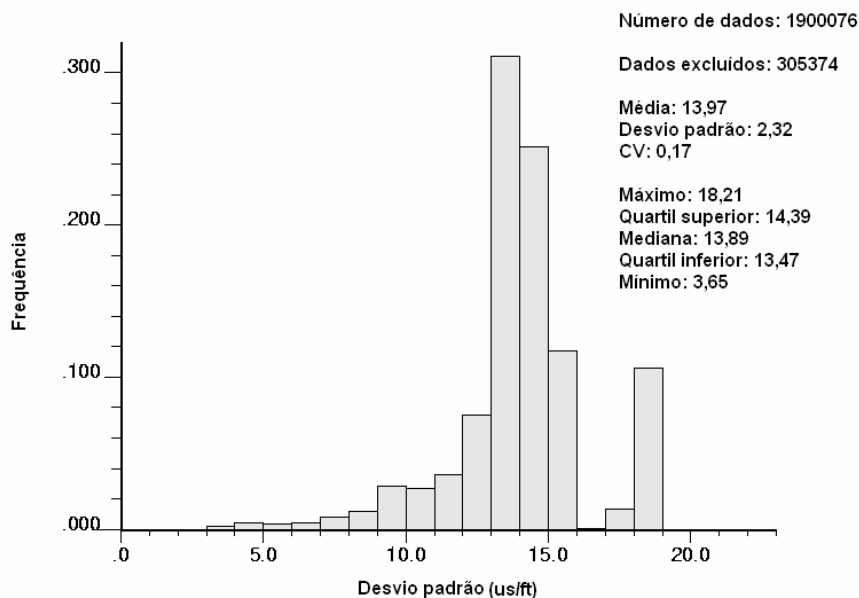


Figura 5.37- Histograma das estimativas de desvio padrão de krigagem em cada nó de *grid*.

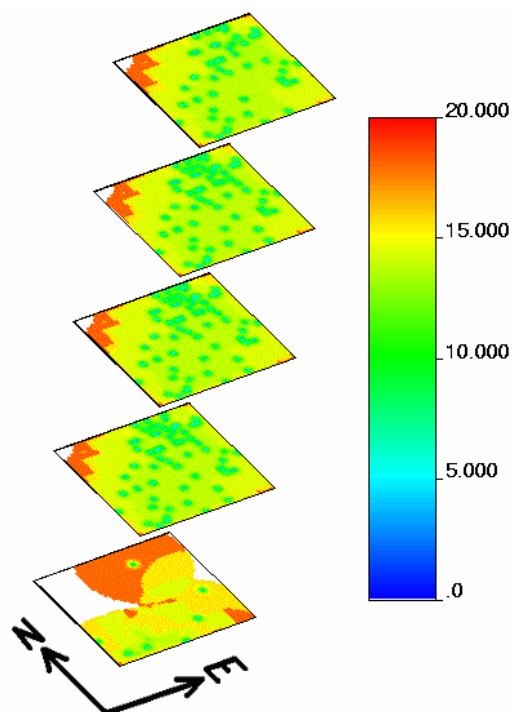


Figura 5.38- Seções horizontais (vista dos planos XY) em várias elevações (Z) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

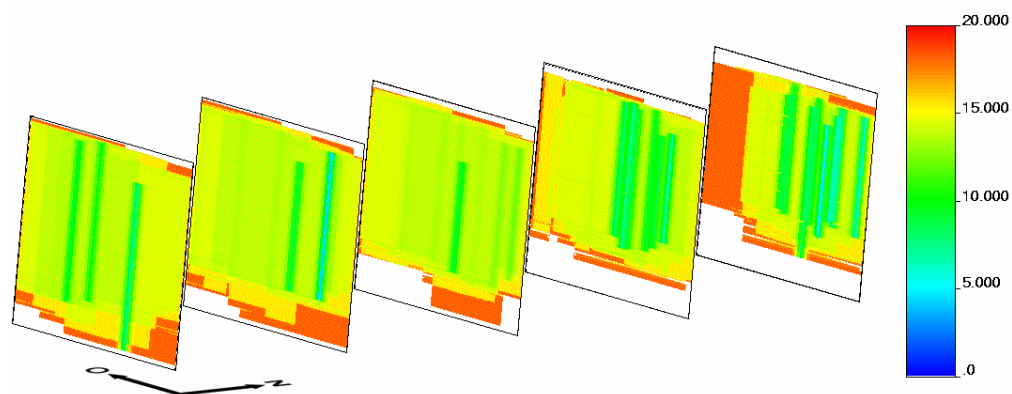


Figura 5.39- Seções verticais (vista dos planos XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

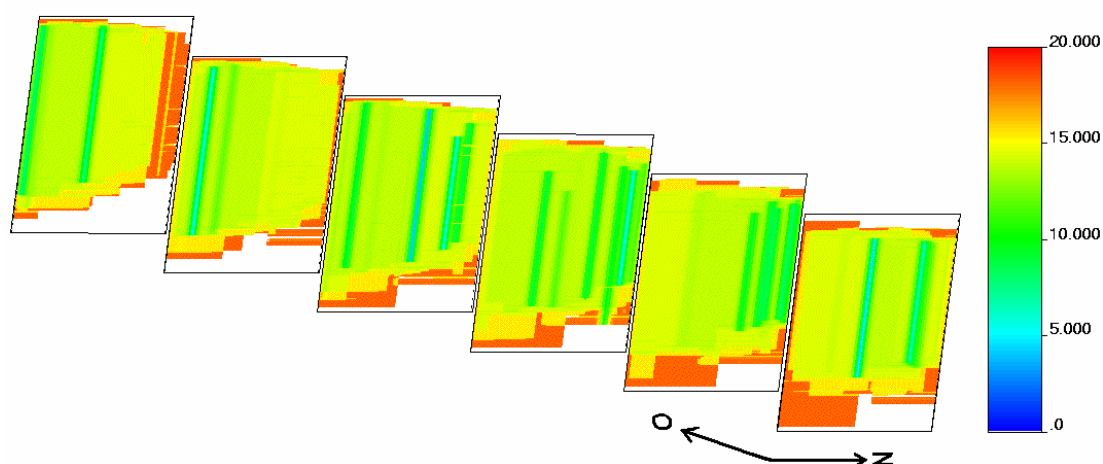


Figura 5.40- Seções verticais (vista dos planos YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos do desvio padrão de krigagem. A escala de cores representa valores de desvio padrão de vagarosidade de onda acústica.

#### **5.4.4 Comparação Entre Estimativas de Vagarosidade Utilizando Amostras em Coordenadas Estratigráficas e Cartesianas**

A fim de verificar a validade das estimativas de vagarosidade de onda acústica, realizadas com a utilização de amostras desse atributo em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas, o seguinte procedimento foi realizado:

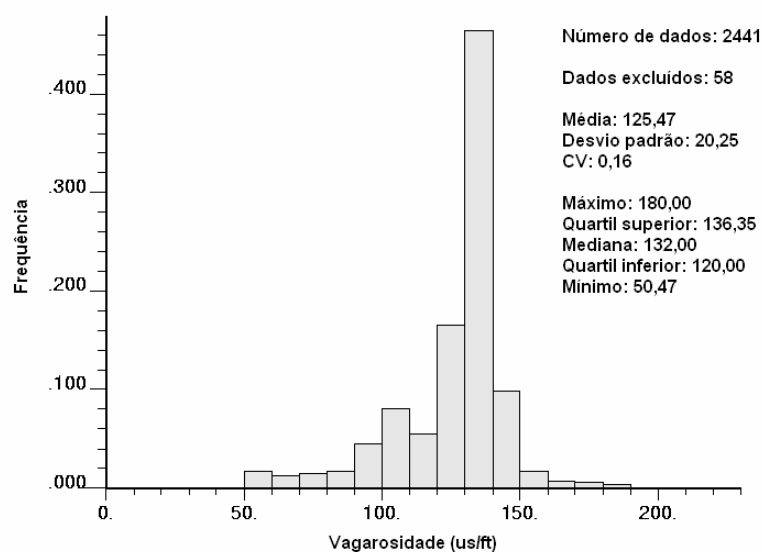
- análise estatística dos dados de vagarosidade pertencentes a camada de carvão GCWS;
- desagrupamento das amostras de vagarosidade pertencentes à camada GCWS, a fim de se obter uma estatística mais representativa do atributo vagarosidade dentro da camada de carvão;
- estatística básica das estimativas de vagarosidade, realizadas com a utilização do banco de dados em coordenadas estratigráficas, dentro do modelo geológico (em coordenadas estratigráficas) da camada GCWS;
- estatística básica das estimativas de vagarosidade, realizadas com a utilização do banco de dados em coordenadas cartesianas, dentro do modelo geológico (em coordenadas cartesianas) da camada GCWS;
- comparação dos resultados das análises estatísticas realizadas.

Amostras de furos de sonda também foram realizadas ao longo do depósito de carvão em estudo. Essas amostras foram coletadas nos mesmos 60 furos que foram perfilados, conforme havia sido comentado no Capítulo 3.

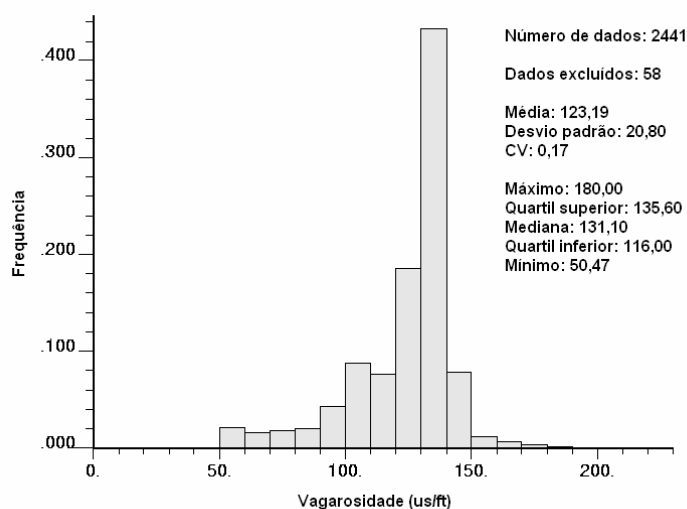
A camada GCWS foi descrita nos 60 furos perfilados e as posições, onde essa camada foi descrita, foram comparadas com as coordenadas das amostras de vagarosidade de onda acústica. As amostras de vagarosidade que apresentavam coordenadas cartesianas iguais às coordenadas da camada de carvão descrita foram escolhidas para formar o banco de dados das amostras de vagarosidade dentro da camada GCWS. A estatística dessas amostras é apresentada na Figura 5.41.

Conforme o histograma da Figura 5.41, a média dos valores de vagarosidade pertencentes a camada GCWS é igual a aproximadamente  $125\mu\text{s}/\text{ft}$ .

O histograma para as amostras desagrupadas de vagarosidade de onda acústica pertencentes a camada GCWS é apresentado na Figura 5.42.



**Figura 5.41- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica pertencentes a camada de carvão GCWS.**



**Figura 5.42- Histograma para as amostras desagrupadas de vagarosidade de onda acústica pertencentes a camada GCWS.**

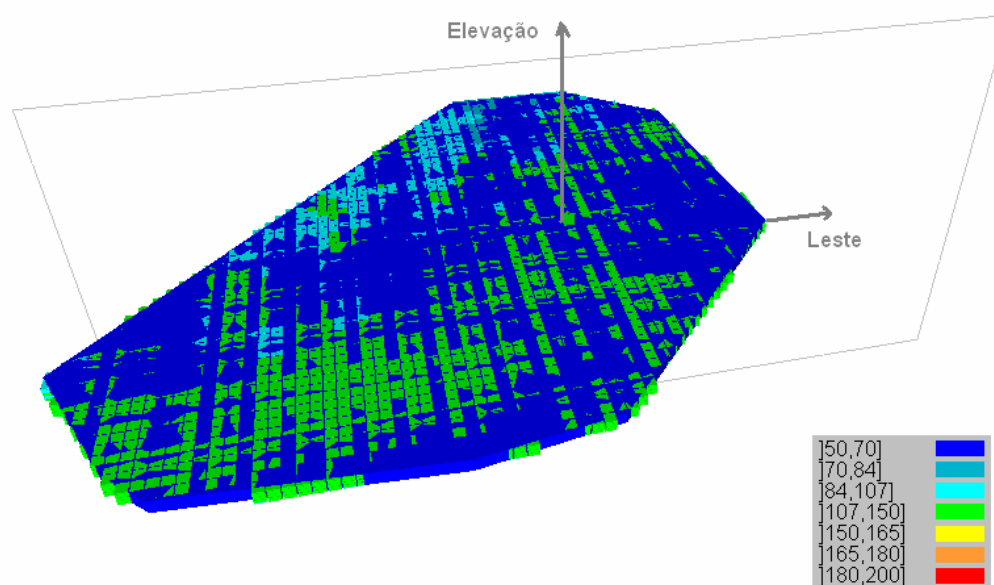
Com objetivo de se obter as estimativas de vagarosidade de onda acústica dentro da camada GCWS, os modelos das estimativas de vagarosidade em coordenadas estratigráficas e em coordenadas cartesianas foram interceptados pelos modelos geológicos da camada GCWS nas respectivas coordenadas. Os blocos que foram “envelopados” pelo modelo geológico, em ambos os casos, foram



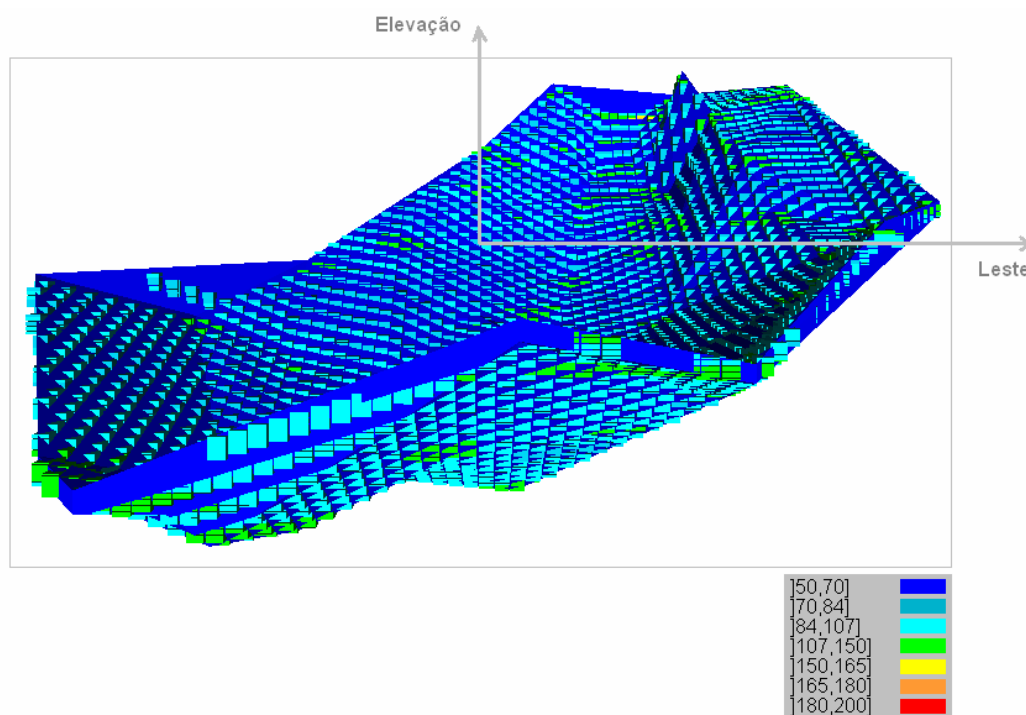
escolhidos para fornecer a estatística básica dos valores de vagarosidade krigados pertencentes à camada GCWS.

Os modelos geológicos foram aproximados a partir da triangulação dos pontos da capa e lapa da camada GCWS demarcados nos furos de sonda. O modelo geológico em coordenadas estratigráficas foi construído a partir da triangulação dos mesmos pontos de capa e lapa da camada GCWS utilizados para a construção do modelo em coordenadas cartesianas, porém para o modelo estratigráfico as coordenadas desses pontos foram transformadas em coordenadas estratigráficas (utilizando-se o mesmo critério apresentado no capítulo 3) antes da triangulação.

A Figuras 5.43 a 5.44 apresentam vistas em perspectiva dos modelos geológicos da camada GCWS, em coordenadas estratigráficas e cartesianas, formando envelopes ao redor dos blocos krigados, considerados pertencentes a camada.

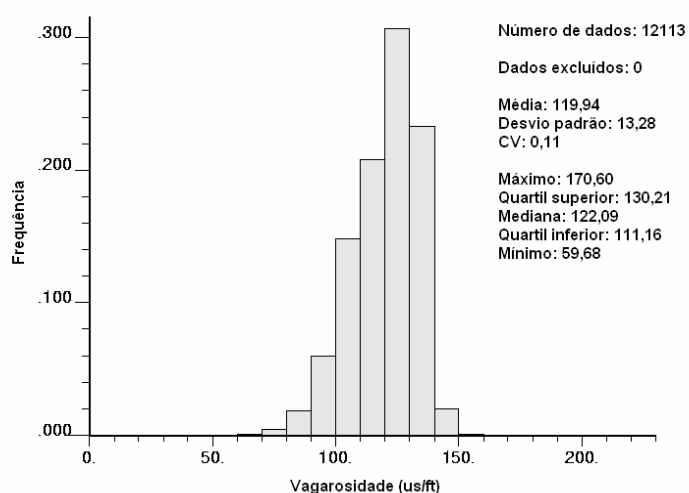


**Figura 5.43- Vista em perspectiva do modelo geológico da camada GCWS, em coordenadas estratigráficas, formando um envelope ao redor dos blocos krigados (exagero vertical). A legenda representa valores de vagarosidade de onda acústica.**

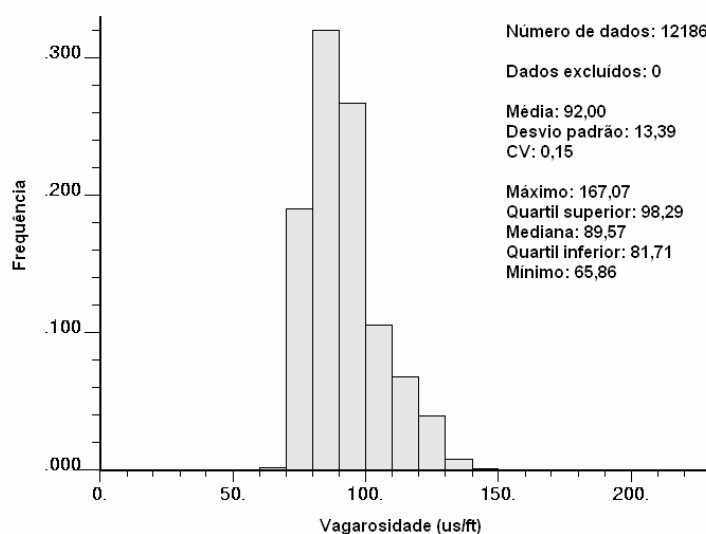


**Figura 5.44-** Vista em perspectiva do modelo geológico da camada GCWS, em coordenadas cartesianas, formando um envelope ao redor dos blocos krigados (exagero vertical). A legenda representa valores de vagarosidade de onda acústica.

A Figura 5.45 apresenta o histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenada estratigráficas pertencentes à camada GCWS, enquanto a Figura 5.46 apresenta o histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas pertencentes à camada GCWS.



**Figura 5.45-** Histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenada estratigráficas pertencentes a camada GCWS.



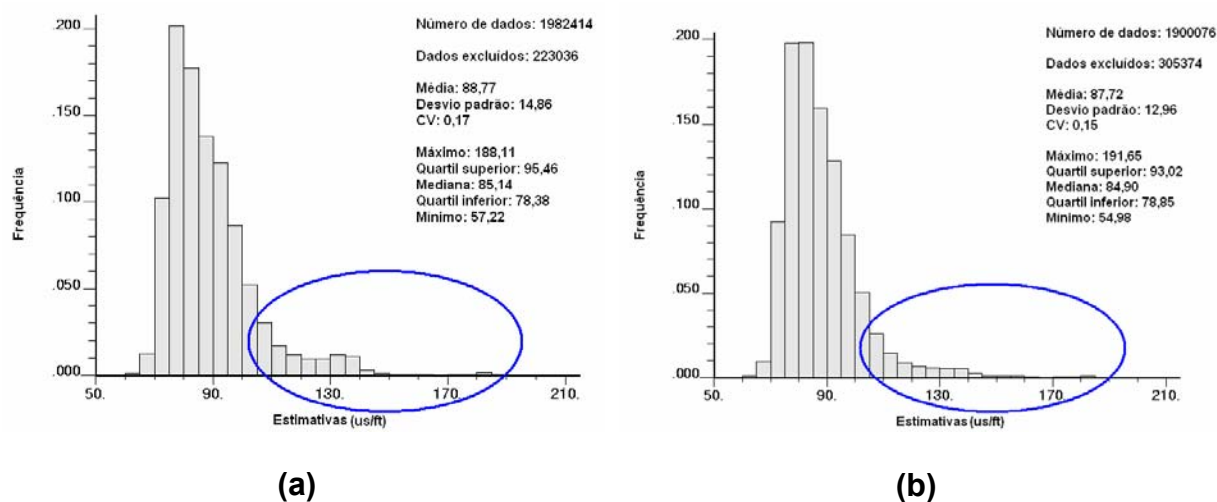
**Figura 5.46- Histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas pertencentes a camada GCWS.**

Analisando-se os histogramas da Figura 5.45 e da Figura 5.46 pode-se dizer que o histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas estratigráficas pertencentes a camada GCWS, apesar de apresentar menor frequência de valores extremos (como é esperado nos resultados da krigagem) é semelhante ao histograma das amostras desagrupadas pertencentes a camada GCWS. No entanto, o histograma para as estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas, pertencentes a camada GCWS, é significativamente diferente do histograma das amostras desagrupadas pertencentes a camada GCWS.

A utilização de amostras de domínios geológicos diferentes na estimativa de um mesmo ponto causou a nítida diferença entre os histogramas das estimativas dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas pertencentes à camada GCWS e das amostras desagrupadas pertencentes à camada GCWS. Isso deve-se ao fato que os valores das amostras de vagarosidade de onda acústica pertencentes à camada de carvão são muito maiores do os valores das amostras pertencentes a outras camadas (o histograma das amostras desagrupadas originais apresenta média menor do que o histograma das amostras de carvão da camada GCWS) e a combinação desses valores provocou uma diminuição na média das estimativas dentro da camada GCWS. A utilização de amostras de domínios geológicos distintos ocorreu por uma soma de fatores:

- o depósito em estudo apresenta um leve dobramento, mas a quantidade de amostras na direção vertical é significativamente grande, o que facilitou a utilização de amostras de diferentes domínios geológicos na estimativa de um mesmo ponto;
- a pequena espessura da camada de carvão em relação à distância que amostras foram procuradas fez com que um leve dobramento provocasse o alcance de amostras de diferentes domínios geológicos em uma mesma direção horizontal;

A diferença entre os histogramas para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas estratigráficas e para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas cartesianas, pode ser, agora, melhor observada. O histograma dos dados em coordenadas estratigráficas apresenta uma frequência maior de valores extremos (pertencentes a camada de carvão GCWS) do que o histograma dos dados em coordenadas cartesianas, que apresenta maior frequência de valores medianos. A Figura 5.47 destaca essa diferença.

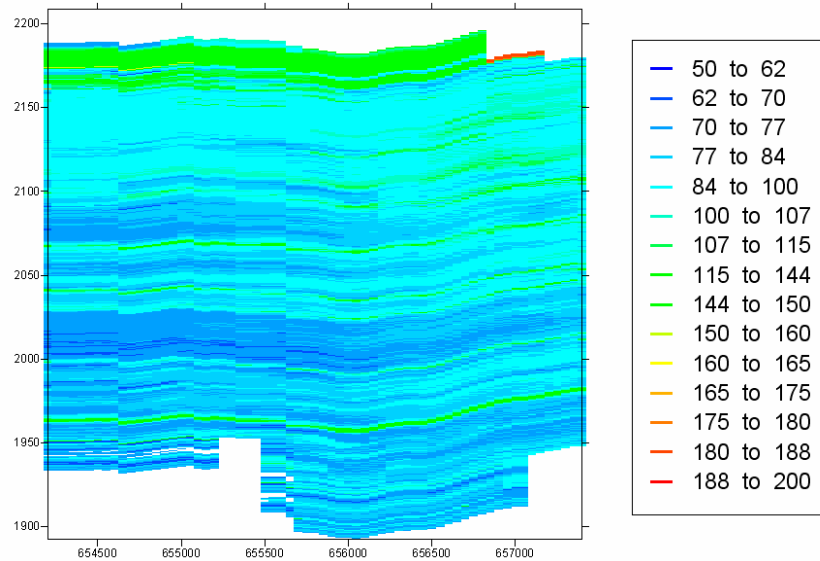


**Figura 5.47-** (a) Histogramas para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas estratigráficas. (b) Histograma para as estimativas de krigagem utilizando banco de dados em coordenadas cartesianas.

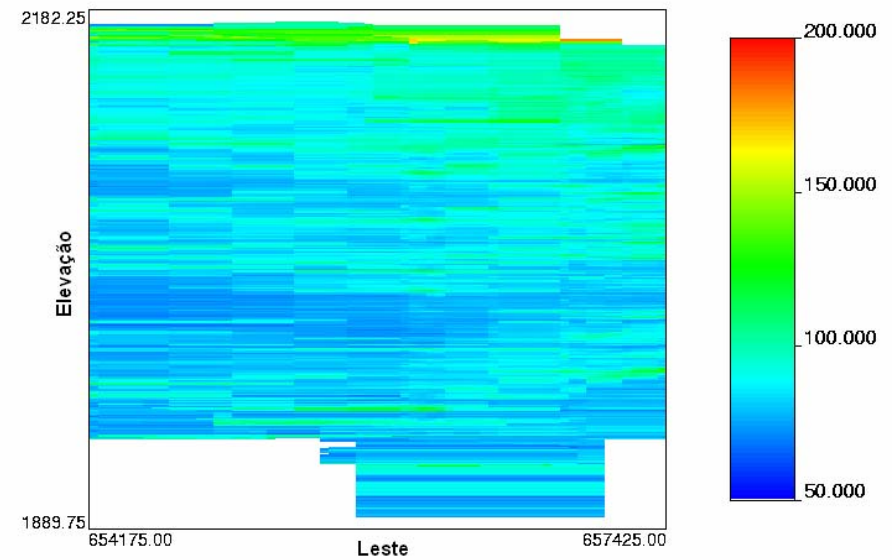
A transformação das coordenadas do banco de dados original em coordenadas estratigráficas diminuiu a utilização de amostras de diferentes domínios geológicos na estimativa de um mesmo ponto. Assim, as estimativas produzidas

com a utilização do banco de dados em coordenadas estratigráficas foram escolhidas como mais próximas da realidade.

A Figura 5.48 mostra as mesmas seções retiradas do modelo de blocos dos valores de vagarosidade em coordenadas cartesianas e em coordenadas retro-transformadas (resultantes da krigagem utilizando banco de dados em coordenadas estratigráficas), a fim de mostrar que a camada GCWS é mais evidenciada neste último modelo.



(a)

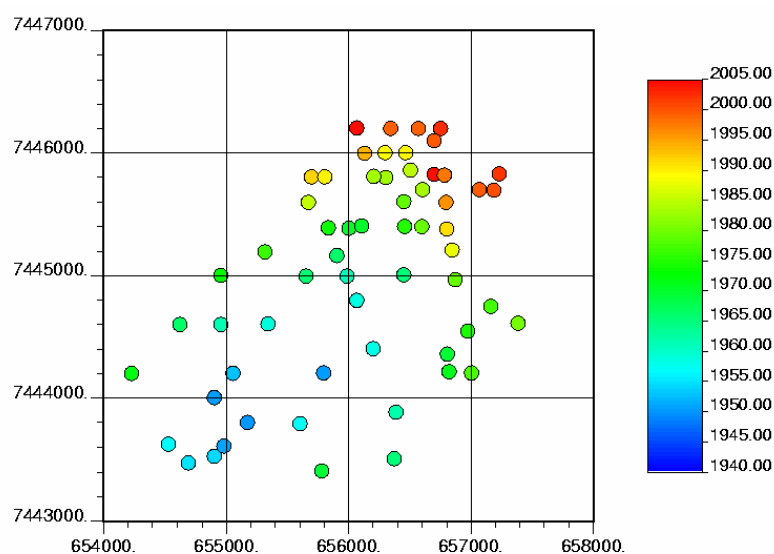


(b)

Figura 5.48- (a) Seção vertical (vista do plano XZ), do modelo de vagarosidade de onda acústica em coordenadas retro-transformadas, na coordenada Y igual a 7444850. (b) Seção vertical (vista do plano XZ), do modelo de vagarosidade de onda acústica em coordenadas cartesianas, na coordenada Y igual a 7444850.

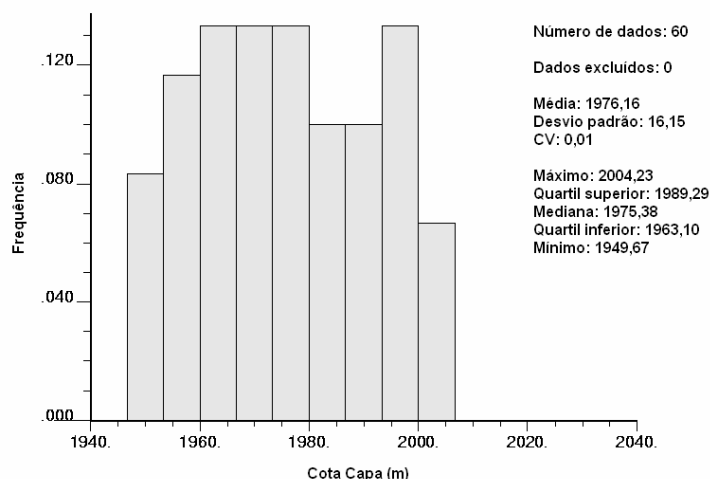
## 5.5 Krigagem da Cota Capa

Conforme havia sido comentado no Capítulo 3, a krigagem dos valores de cota da capa da camada de carvão deve ser realizada para permitir a retro-transformação das estimativas de vagarosidade obtidas com banco de dados em coordenadas estratigráficas. As amostras de valores de cota da capa da camada de carvão foram obtidas por furos de sonda e estão localizadas nas mesmas posições XY (Leste-Norte) dos furos perfilados, perfazendo um total de 60 amostras. A Figura 5.49 mostra o mapa de localização das amostras de valores de cota da capa da camada GCWS.

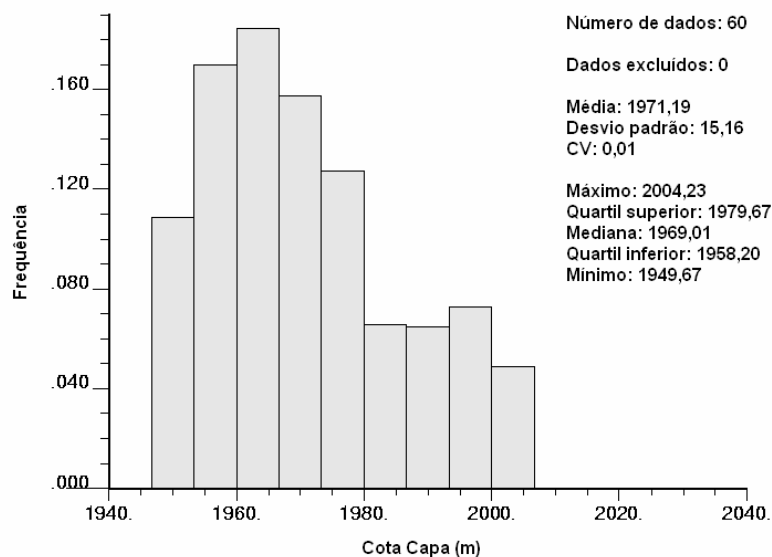


**Figura 5.49-** Mapa de localização das amostras de valores de cota da capa da camada GCWS. A escala de cores representa valores de elevação da capa da camada de carvão.

A Figura 5.50 apresenta o histograma para as amostras de valores de cota da capa da camada de carvão, enquanto a Figura 5.51 apresenta o histograma para as amostras desagrupadas de valores de cota da capa. As amostras foram desagrupadas pelo método das células móveis (Journel, 1983; Isaaks e Srivastava, 1989; Deutsch, 1989; Deutsch e Journel, 1998).



**Figura 5.50-** Histograma para as amostras de valores de cota da capa da camada de carvão.



**Figura 5.51-** Histograma para as amostras desagrupadas de valores de cota da capa da camada de carvão.

As amostras de cota da capa da camada de carvão indicam que a capa da camada GCWS apresenta forma levemente parecida com uma bacia, conforme mostrado no Capítulo 3.

O variograma superficial é usado para se obter uma primeira avaliação da direção de maior continuidade do atributo em estudo, já que apresenta valores de variograma em diferentes direções e diferentes valores de  $h$ . O variograma superficial construído com as amostras de cota da capa é apresentado na Figura 5.52, enquanto os variogramas experimentais direcionais nas direções de maior e



menor continuidade são apresentados nas Figuras 5.53 e 5.54, respectivamente. A direção de maior continuidade das amostras de cota da capa é próxima a direção azimutal de  $112,5^\circ$ .

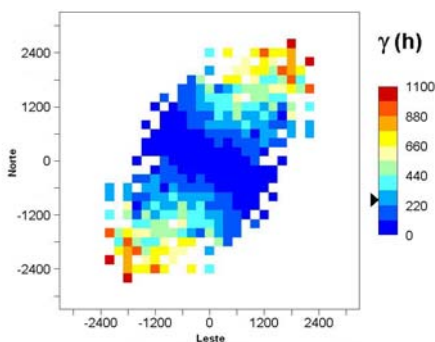


Figura 5.52- Variograma superficial construído com as amostras de cota da capa.

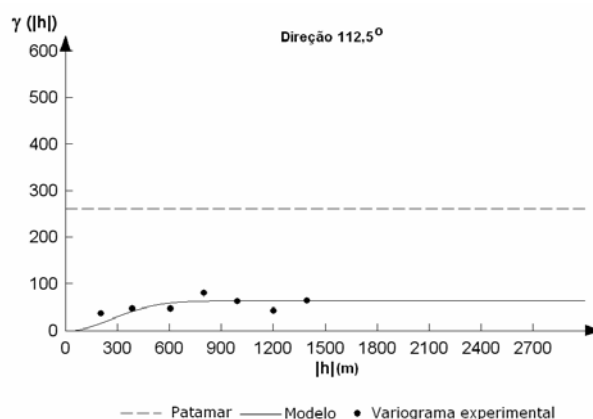


Figura 5.53- Variogramas experimental construído com as amostras de cota da capa na direção azimutal de  $112,5^\circ$  e o modelo ajustado a esse variograma.

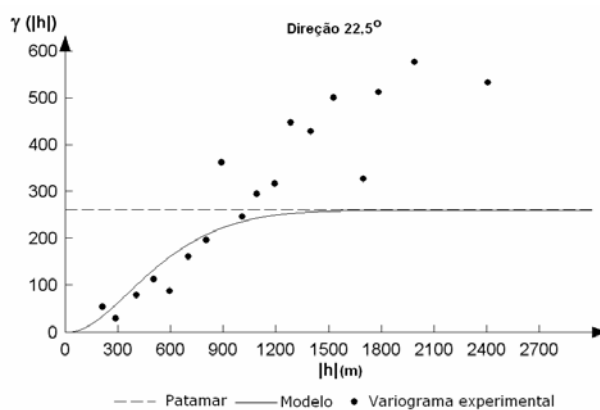


Figura 5.54- Variogramas experimental construído com as amostras de cota da capa na direção azimutal de  $22,5^\circ$  e o modelo ajustado a esse variograma.

A função variograma ajustada para os variogramas pode ser escrita da seguinte forma:

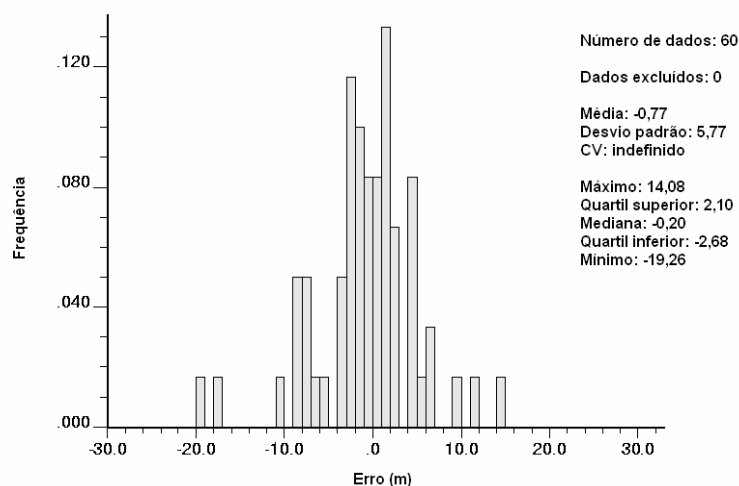
$$\gamma(\mathbf{h}) = 0 + 65 \times \text{Gaussiano}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}112,5^\circ}}{651}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}22,5^\circ}}{650}\right) + 195,82 \times \text{Gaussiano}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}112,5^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}22,5^\circ}}{1200}\right)$$

(5.24)

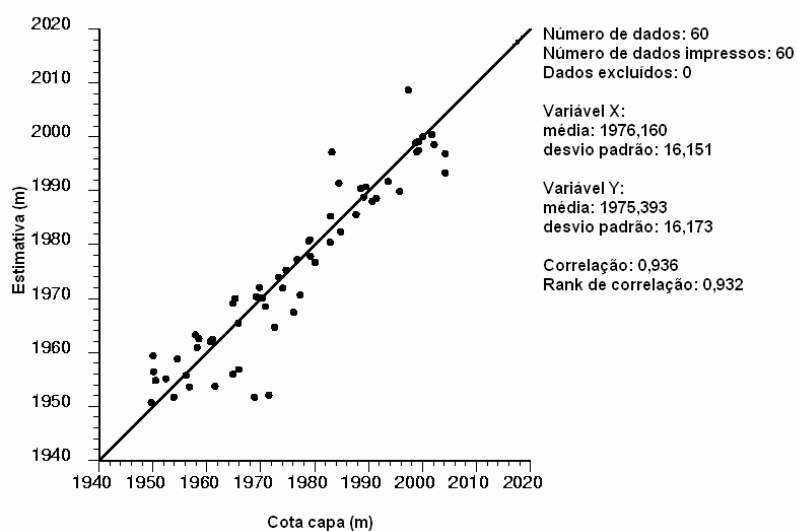
Analisando-se o variograma experimental na direção de menor continuidade, observa-se que o variograma não estabiliza quando alcança o patamar. Isso ocorre, porque a variável cota da capa apresenta uma tendência de seus valores continuarem aumentando ou diminuindo em uma certa direção. Ou seja, a estacionariedade de segunda ordem não é respeitada para todos valores de  $h$ . Por isso, a krigagem universal (Matheron e Huijbregts, 1970) poderia ser aplicada neste caso. Contudo, conforme Rossi e Journel (1989), estimativas obtidas por krigagem ordinária com a utilização de uma distância de busca dentro do limite de estacionariedade são, na prática, iguais as estimativas obtidas por krigagem universal. Por isso, a krigagem do atributo cota da capa foi realizada por krigagem ordinária com a utilização de uma distância de busca dentro do limite de estacionariedade, esse limite foi definido onde o valor do variograma alcança o valor da variância *a priori* das amostras.

As Figuras 5.55 e 5.56 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de cota da capa e suas estimativas, resultantes da validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de cota da capa. Os parâmetros de busca e variograma utilizados nessa validação cruzada estão listadas na Tabela 5.3.

A média do erro e a correlação entre os dados de cota da capa e suas estimativas, resultantes da verificação feita por validação cruzada mostram que o tipo de krigagem (ordinária), parâmetros de busca e variograma que serão utilizados na krigagem produzem estimativas satisfatórias.



**Figura 5.55- Validação cruzada do atributo cota da capa da camada GCWS.**



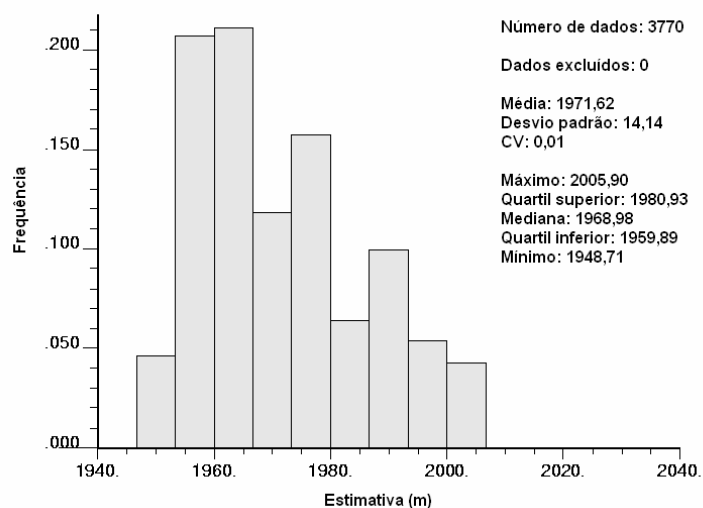
**Figura 5.56- Mapa de correlação entre valores de cota da capa e suas estimativas.**

A realização da krigagem ordinária de bloco gerou estimativas para 3770 blocos de 50 x 50 m orientados ao longo das direções leste e norte, respectivamente (65 nós na direção leste x 58 nós na direção norte). Esses blocos formam o chamado modelo de blocos da krigagem ordinária, o qual a origem, no canto inferior esquerdo do modelo, possui as coordenadas 654175 m e 7443375 metros.

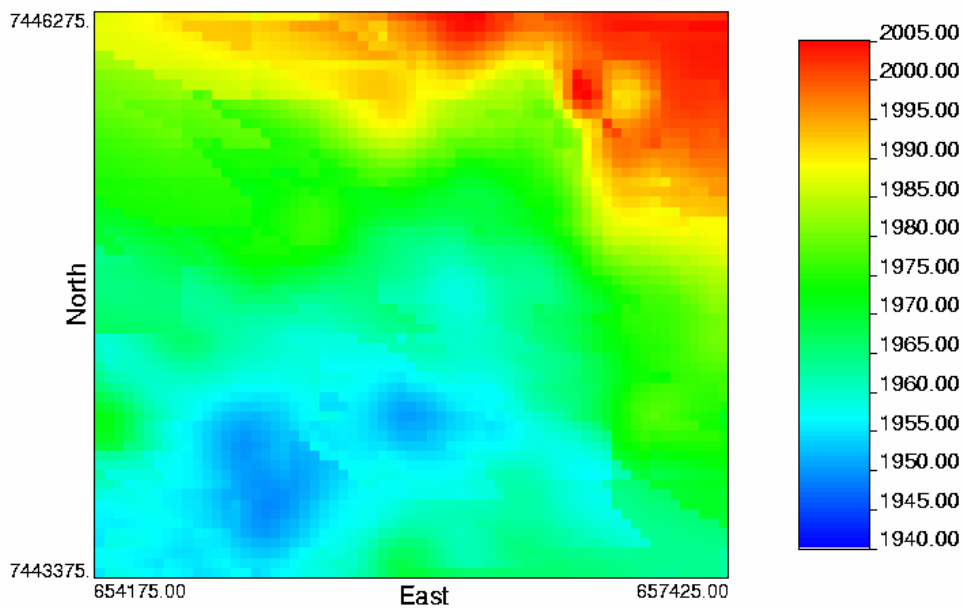
A Figura 5.57 apresenta o histograma para as estimativas de valores de cota da capa, o qual é semelhante (desconsiderando o efeito de suavização intrínseco aos algoritmos de krigagem), ao histograma das amostras desagrupadas de cota da capa.

**Tabela 5.3- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.**

Parâmetros de busca e variograma	
Mínimo de dados para krigagem	2
Máximo de dados para krigagem	16
Máximo de dados por octante	2
Tipo de krigagem	Krigagem ordinária
Máximo raio de busca (112,5°; 22,5°)	3000,1200
Variograma- número de estruturas	2
Variograma- efeito pepita	0
Variograma- modelos (2)	Gaussiano
Variograma- primeira estrutura - patamar	65
Variograma- primeira estrutura – alcance (112,5°; 22,5°)	651,650
Variograma- segunda estrutura – patamar	195,82
Variograma- segunda estrutura – alcance (112,5°; 22,5°)	100000,1200

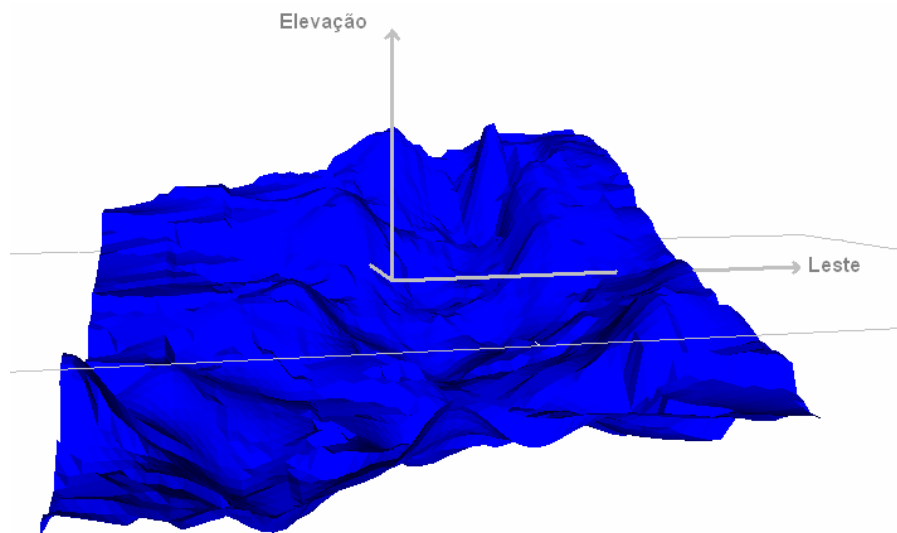
**Figura 5.57- Histograma para as estimativas de valores de cota da capa.**

A Figura 5.58 apresenta o mapa das estimativas de cota da capa obtidas por krigagem ordinária, esse algoritmo aliado aos parâmetros de busca escolhidos permitiu que todos os nós de *grid*, onde eram necessários valores de cota da capa, fossem estimados.



**Figura 5.58-** Mapa das estimativas de cota da capa obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de elevação da capa da camada GCWS.

A Figura 5.59 apresenta uma vista em perspectiva da capa da camada de carvão com os valores de elevação krigados.



**Figura 5.59-** Vista em perspectiva da capa da camada de carvão com os valores de elevação krigados.

## **5.6 Krigagem em Duas Dimensões (2D)**

Esta seção apresenta a krigagem ordinária realizada em um *grid* bidimensional, utilizando valores de vagarosidade média ( $\mu\text{s/m}$ ) em cada furo perfilado e a krigagem ordinária realizada em um *grid* bidimensional, utilizando valores de velocidade média ( $\text{m/s}$ ) em cada furo perfilado. Essas krigagens foram realizadas visando a obtenção de valores de vagarosidade média e velocidade média em pontos de um *grid* que cobre a área superficial mapeada pela sísmica e pela perfilagem acústica.

A análise das diferenças entre valores das estimativas de vagarosidade média e velocidade média será utilizada para verificar a acuracidade das estimativas feitas com a variável vagarosidade para obtenção de profundidades (m). Essa diferença deve ser analisada devido a não linearidade das operações de inversão, já que a vagarosidade é o inverso da velocidade.

Os valores de vagarosidade média e velocidade média utilizados nas interpolações consideraram as medidas de vagarosidade obtidas por perfilagem geofísica até a capa da camada de carvão GCWS, visto que esse estudo visa comparar resultados de vagarosidade média e velocidade média, que uma onda acústica leva para propagar-se da superfície do terreno até a capa dessa camada.

### **5.6.1 Krigagem do Atributo Vagarosidade Média**

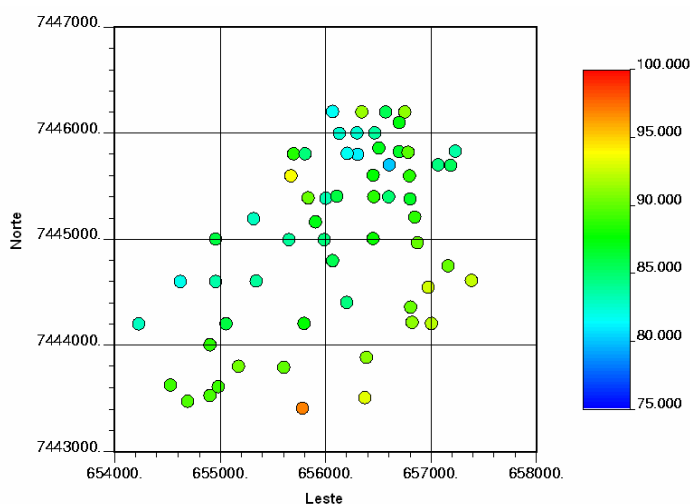
Os valores de vagarosidade média utilizados na krigagem ordinária foram obtidos em cada localização leste-norte (XY) onde se encontrava a boca de cada furo perfilado. Os valores de vagarosidade média foram obtidos por meio da média aritmética<sup>2</sup> dos valores de vagarosidade medidos da superfície do terreno até a capa

---

<sup>2</sup> A vagarosidade média de uma onda acústica até a camada GCWS é igual a média aritmética das vagarosidades medidas ao longo do furo, quando as distâncias dos trechos medidos até a camada GCWS são iguais. Nesse estudo de caso, as distâncias dos trechos medidos eram todas iguais a 5cm (medidas excluídas tornaram alguns trechos maiores, porém esse fator foi considerado irrelevante no

da camada de carvão GCWS (ver capítulo 3) em cada furo perfurado. Portanto, a krigagem ordinária apresentada nessa seção utilizou 60 amostras de vagarosidade média.

A Figura 5.60 mostra o mapa de localização das amostras de valores de vagarosidade média até a camada GCWS.

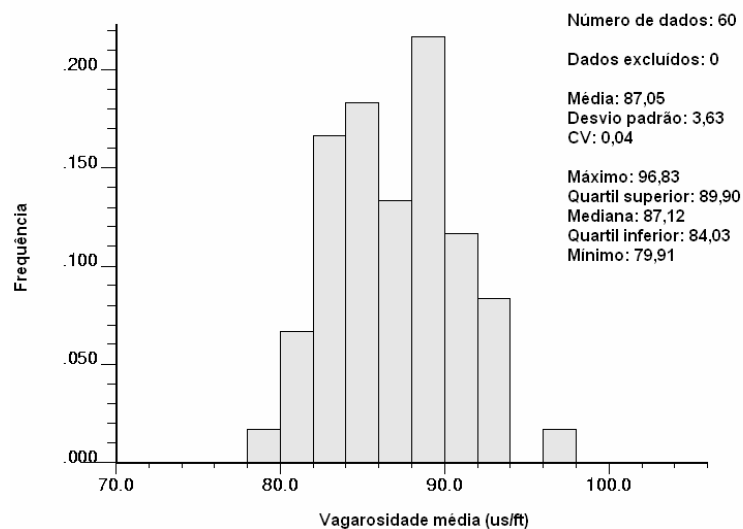


**Figura 5.60- Valores de vagarosidade média até a camada GCWS.**

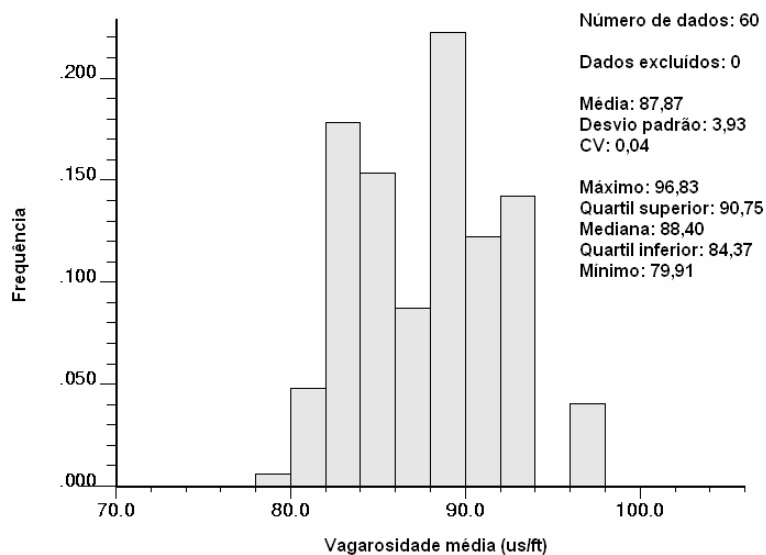
A Figura 5.61 apresenta o histograma para as amostras de valores de vagarosidade média até a camada GCWS, enquanto a Figura 5.62 apresenta o histograma para as mesmas amostras desagrupadas. As amostras foram desagrupadas pelo método das células móveis.

Os variogramas construídos com as amostras de vagarosidade média não se apresentaram muito bem definidos devido a pouca quantidade de amostras, o que mostra uma desvantagem da krigagem de vagarosidade média em duas dimensões em relação a krigagem do atributo vagarosidade em três dimensões para obtenção de valores de vagarosidade média. A direção de maior continuidade da variável vagarosidade média é próxima a direção azimutal de  $45^\circ$ . O variograma superficial construído com as amostras de vagarosidade média é apresentado na Figura 5.63, enquanto o variograma omnidirecional e os variogramas experimentais

direcionais nas direções azimutais de 22,5°, 45°, 67,5°, 90°, 112,5°, 135°, 157,5° e 180° são apresentados nas Figuras 5.64 a 5.72, respectivamente.



**Figura 5.61- Histograma para as amostras de valores de vagarosidade média até a camada GCWS.**



**Figura 5.62- Histograma para as amostras desagrupadas de valores de vagarosidade média até a camada GCWS.**



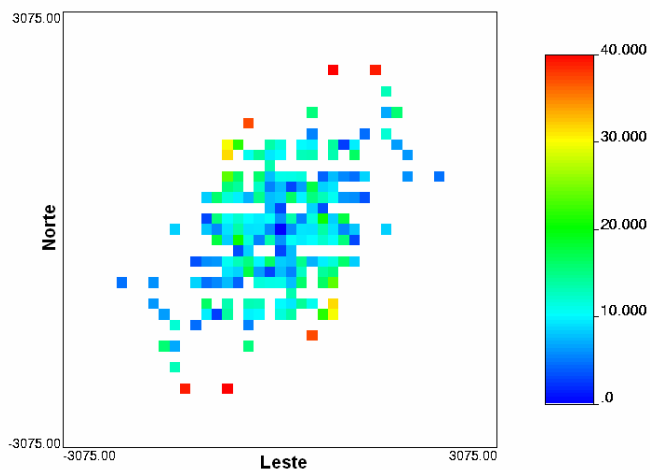


Figura 5.63- Variograma superficial construído com as amostras de vagarosidade média.

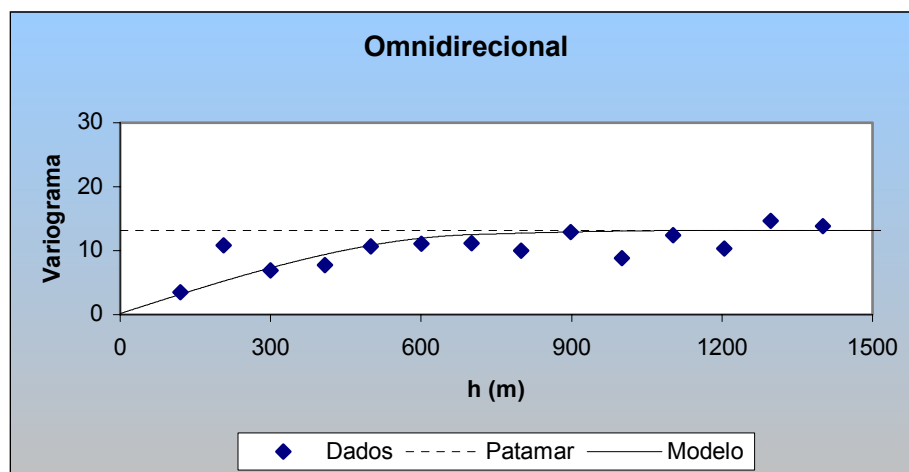


Figura 5.64- Variograma omnidirecional construído com as amostras de vagarosidade média e o modelo ajustado a esse variograma.

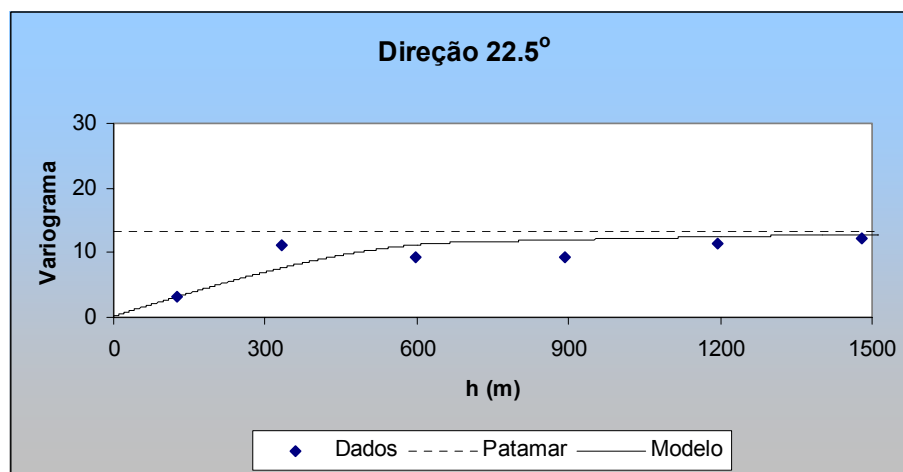


Figura 5.65- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 22,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

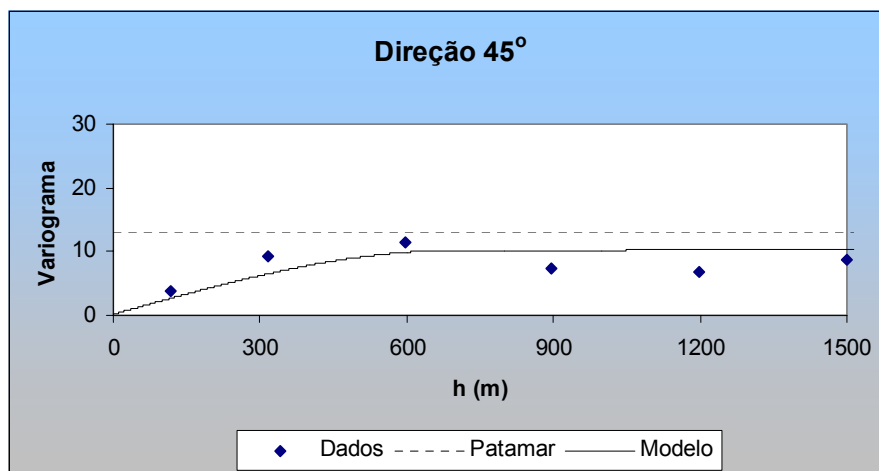


Figura 5.66- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média direção azimutal de 45° e o modelo ajustado a esse variograma.

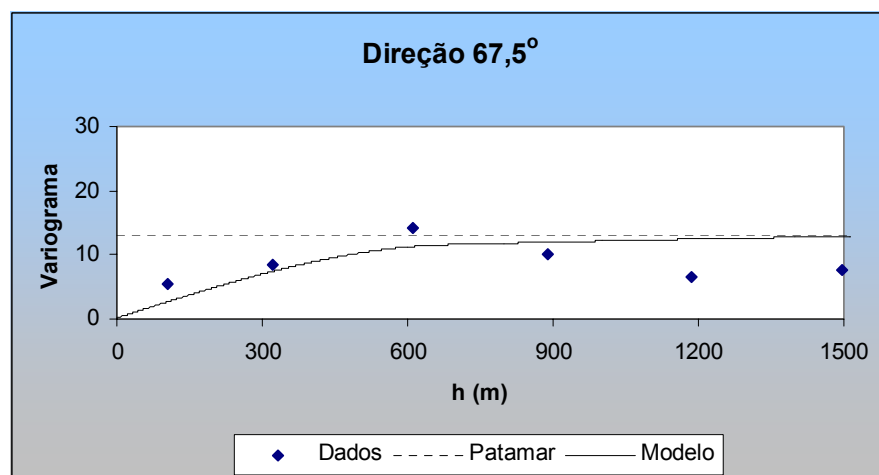


Figura 5.67- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 67,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

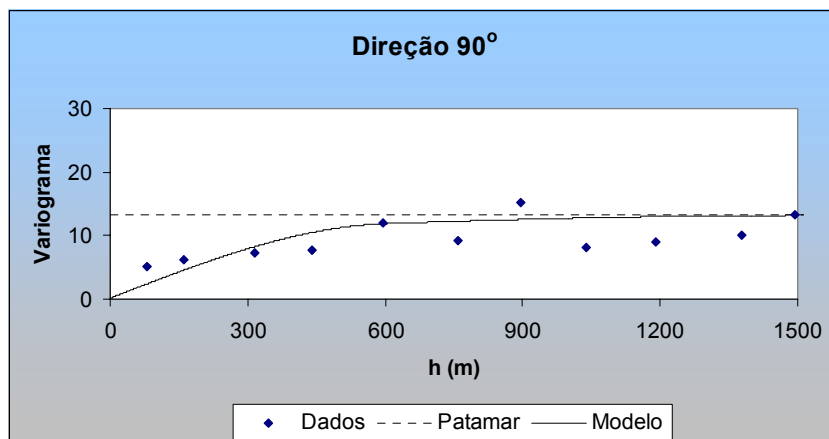


Figura 5.68- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 90° e o modelo ajustado a esse variograma.

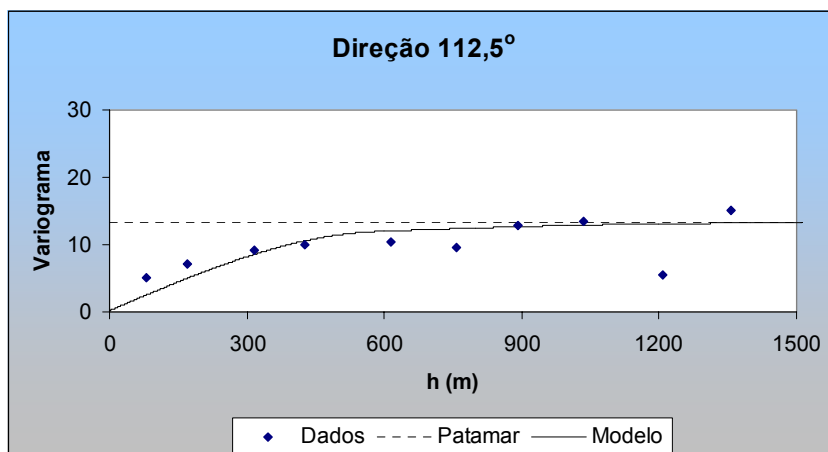


Figura 5.69- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 112,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

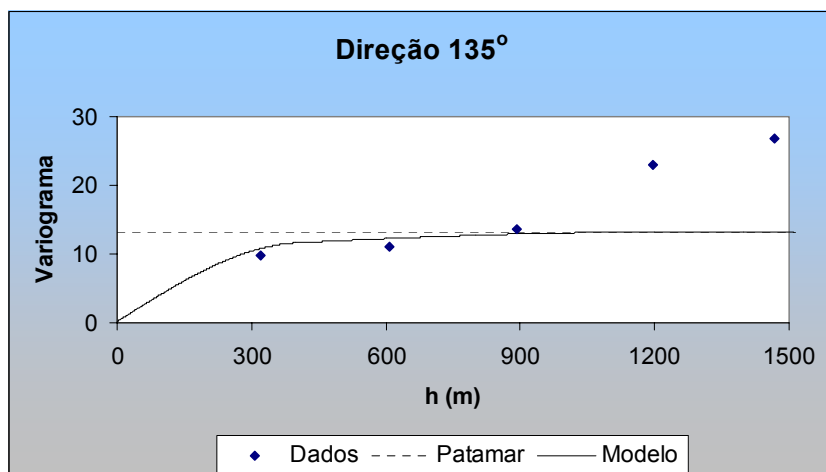


Figura 5.70- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 135° e o modelo ajustado a esse variograma.

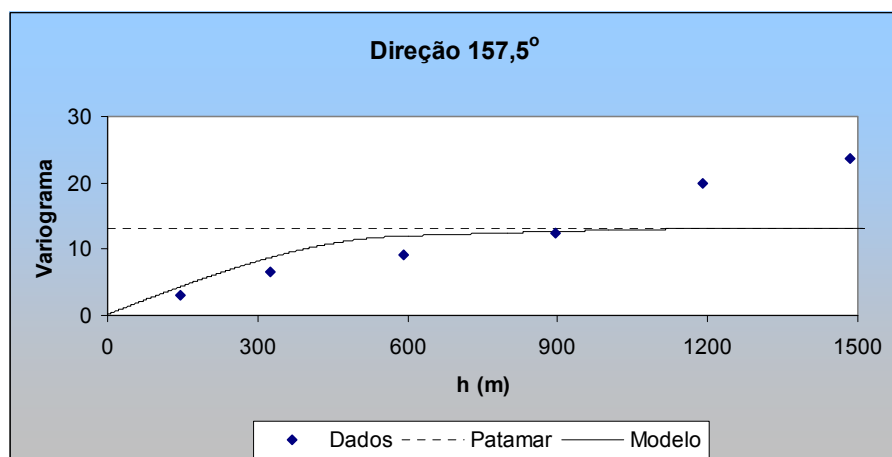


Figura 5.71- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 157,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

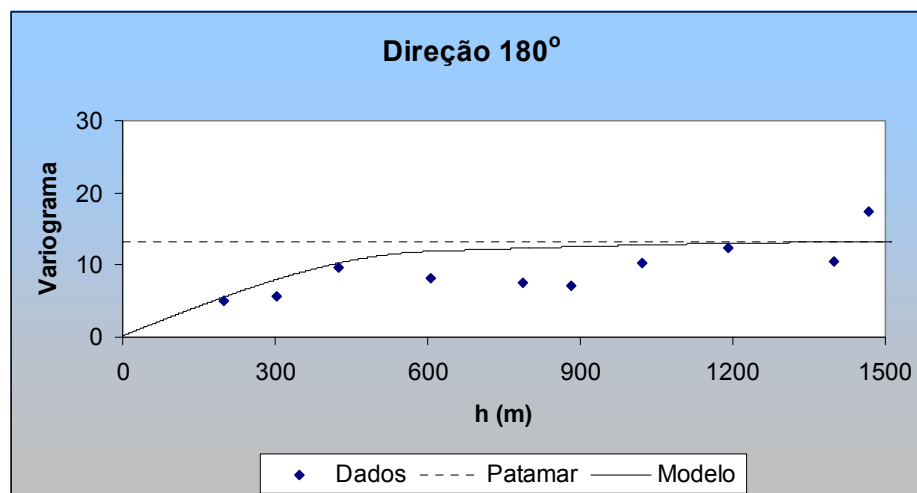


Figura 5.72- Variograma experimental construído com as amostras de vagarosidade média na direção azimutal de 180° e o modelo ajustado a esse variograma.

A função variograma ajustada para os variogramas pode ser escrita da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 0,18 + 10 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}45^\circ}}{700}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}135^\circ}}{400}\right) + 3 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}45^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}135^\circ}}{1200}\right) \quad (5.25)$$

Analisando-se o variograma direcional na direção de maior continuidade, observa-se que o variograma não alcança o patamar, pelo menos para valores de  $h$  menores que a máxima distância entre amostras na mesma direção. Isso ocorre, porque a variável vagarosidade média apresenta uma grande continuidade nessa direção.

As Figuras 5.73 e 5.74 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de vagarosidade média e suas estimativas, resultantes da validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de vagarosidade média. Os parâmetros de busca e variograma utilizados nessa validação cruzada estão listadas na Tabela 5.4.

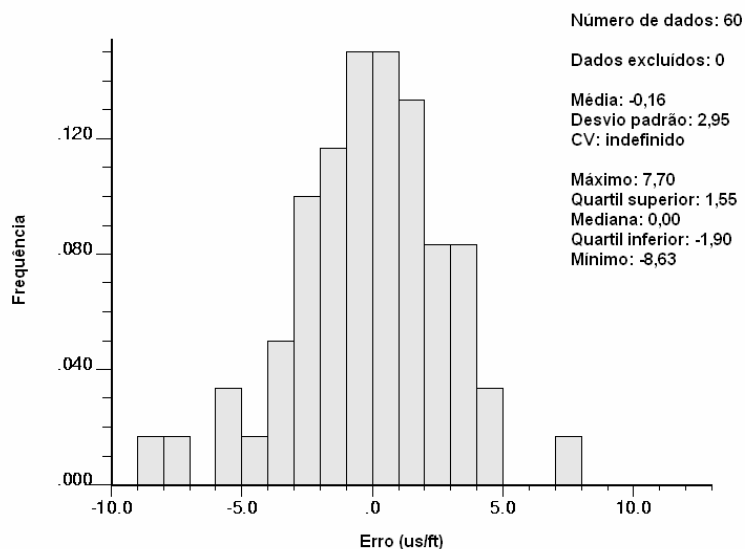


Figura 5.73- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo vagarosidade média.

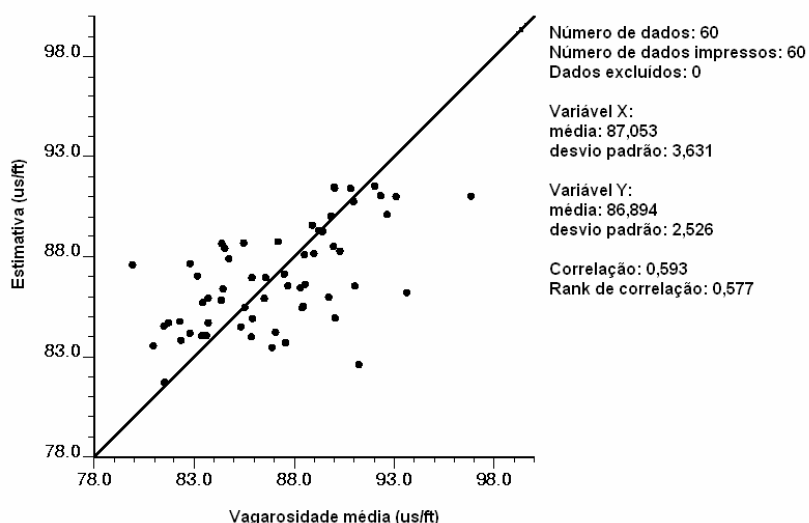


Figura 5.74- Mapa de correlação entre valores de vagarosidade média e suas estimativas.

Apesar da média dos erros obtidos por validação cruzada do atributo vagarosidade média ser satisfatória, a correlação entre os dados de vagarosidade média e suas estimativas, resultantes da validação cruzada atentam para o fato de que os parâmetros que serão utilizados na krigagem podem não produzir estimativas tão satisfatórias quanto aquelas obtidas na krigagem de vagarosidade em três dimensões. A pouca definição dos variogramas experimentais direcionais prejudicou o ajuste variográfico para o atributo vagarosidade média (2D) e conseqüentemente os futuros resultados da krigagem.

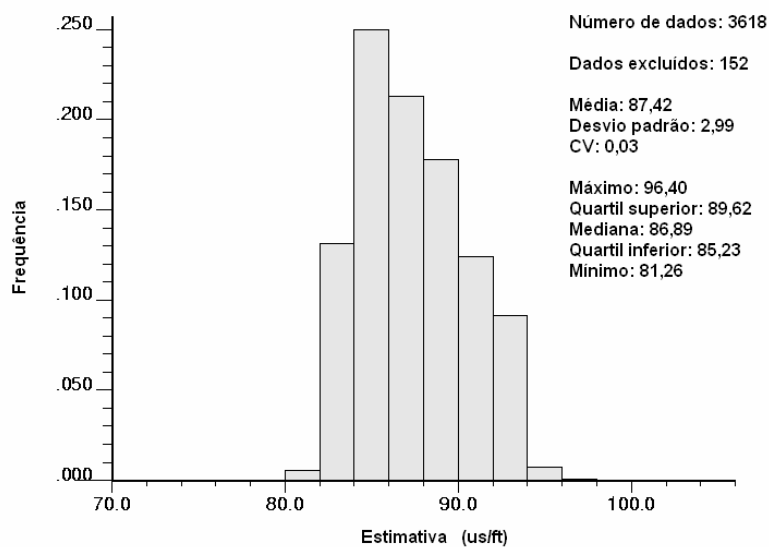
Tabela 5.4- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.

Parâmetros de busca e variograma	
Mínimo de dados para krigagem	3
Máximo de dados para krigagem	16
Máximo de dados por octante	2
Tipo de krigagem	Krigagem ordinária
Máximo raio de busca (45°; 135°)	1400,1200
Variograma- número de estruturas	2
Variograma- efeito pepita	0,18
Variograma- modelos (2)	Esférico
Variograma- primeira estrutura - patamar	10
Variograma- primeira estrutura – alcance (45°; 135°)	700,400
Variograma- segunda estrutura – patamar	3
Variograma- segunda estrutura – alcance (45°; 135°)	100000,1200

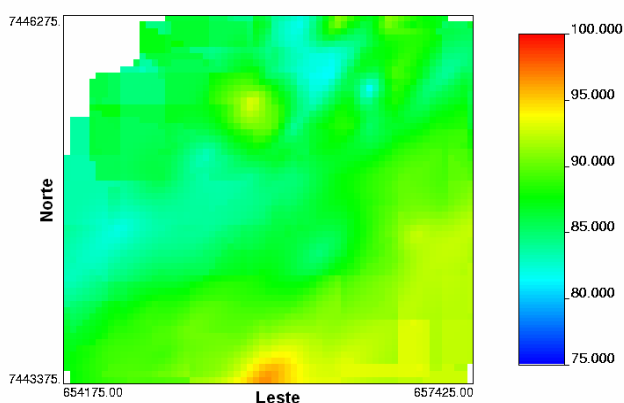
A realização da krigagem ordinária de bloco gerou estimativas para 3770 blocos de 50 x 50 m orientados ao longo das direções leste e norte, respectivamente (65 nós na direção leste x 58 nós na direção norte). Esses blocos formam o chamado modelo de blocos da krigagem ordinária, o qual a origem, no canto inferior esquerdo do modelo, possui as coordenadas 654175 m e 7443375 m.

A Figura 5.75 apresenta o histograma para as estimativas de valores de vagarosidade média, o qual é semelhante (desconsiderando o efeito de suavização intrínseco aos algoritmos de krigagem) ao histograma das amostras desagrupadas de vagarosidade média.

A Figura 5.76 apresenta o mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem ordinária.



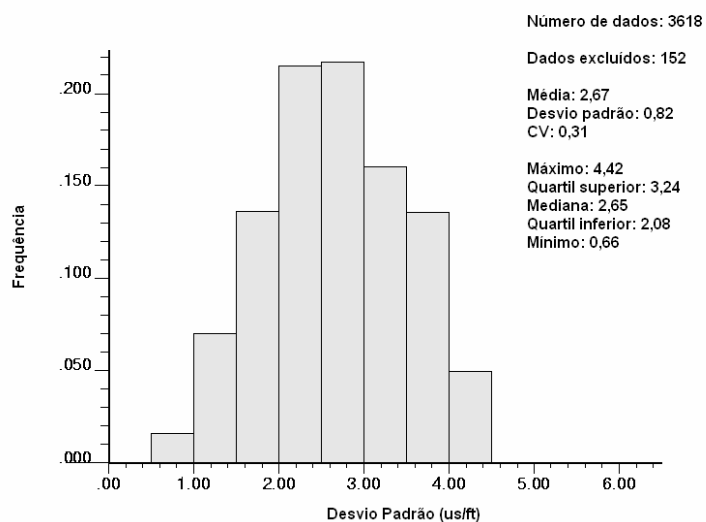
**Figura 5.75- Histograma para as estimativas de valores de vagarosidade média.**



**Figura 5.76- Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de vagarosidade média até a capa da camada GCWS.**

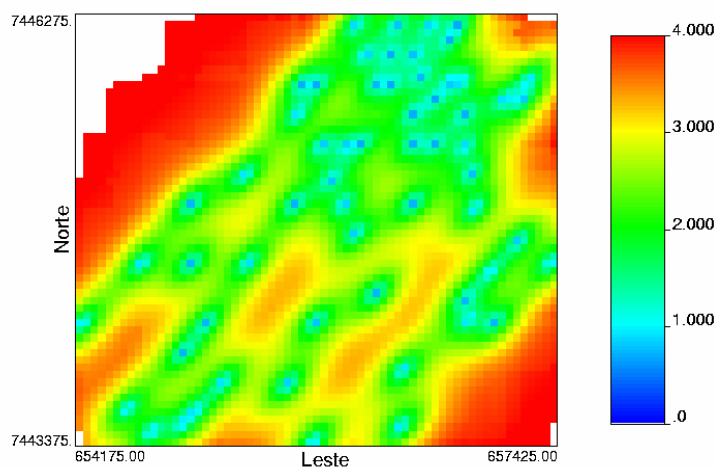
A incerteza de cada estimativa de vagarosidade média, que será utilizada para a medida de incerteza na determinação da profundidade da camada GCWS, pode ser obtida por meio dos valores de desvio padrão de krigagem. Esses valores são obtidos pela variância de krigagem (ver equação 5.20), visto que o valor de desvio padrão é a raiz quadrada da variância.

A Figura 5.77 apresenta o histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.



**Figura 5.77- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de vagariedade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.**

A Figura 5.78 apresenta o mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de vagariedade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.



**Figura 5.78- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de vagariedade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.**

Conforme discutido anteriormente, os valores de desvio padrão de krigagem consideram as distâncias variográficas entre as amostras e o ponto que está sendo estimado. Quanto maior a covariância entre as amostras, que são usadas na estimativa, e o ponto a ser estimado, menor o valor do desvio padrão naquele ponto.



### 5.6.2 Krigagem do Atributo Velocidade Média

Os valores de velocidade média utilizados na krigagem ordinária foram obtidos em cada localização leste-norte (XY) onde se encontrava a boca de cada furo perfilado. Os valores de velocidade média<sup>3</sup> foram obtidos por meio da inversão dos valores de vagarosidade média até a capa da camada de carvão GCWS (ver capítulo 3) em cada furo perfilado, visto que o inverso da vagarosidade média é a velocidade média. Os valores de vagarosidade média apresentavam-se nas seguintes unidades:  $\mu\text{s}/\text{ft}$ . Por isso, a obtenção dos valores de velocidade média em m/s foi conseguida por meio da divisão da constante 304800 pelo valor da vagarosidade média. Assim, a krigagem ordinária apresentada nessa seção utilizou 60 amostras de velocidade média.

A Figura 5.79 mostra o mapa de localização das amostras de velocidade média até a camada GCWS.

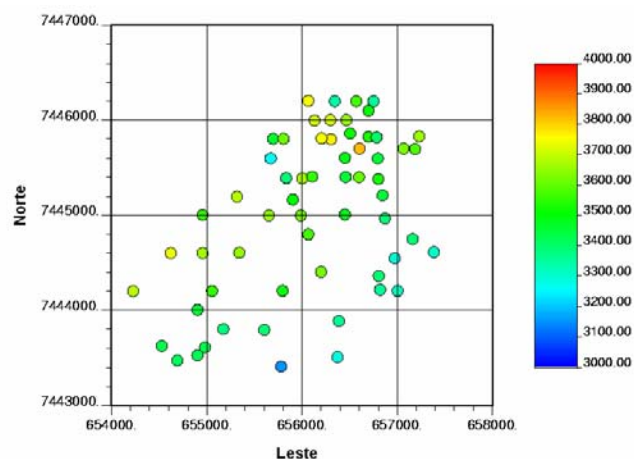
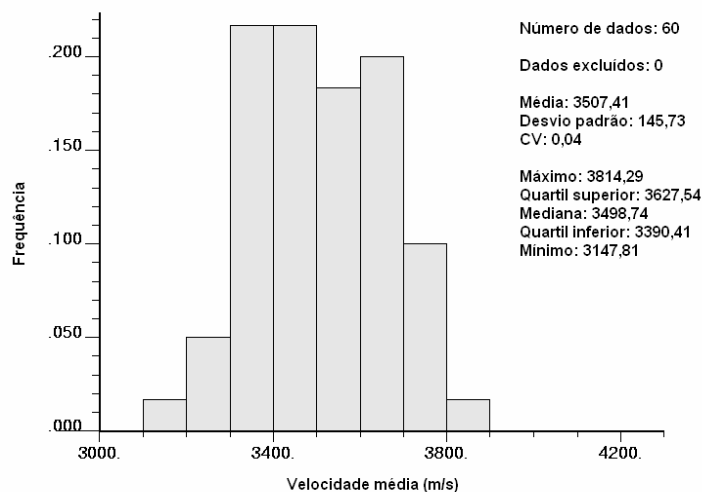


Figura 5.79- Valores de velocidade média até a camada GCWS.

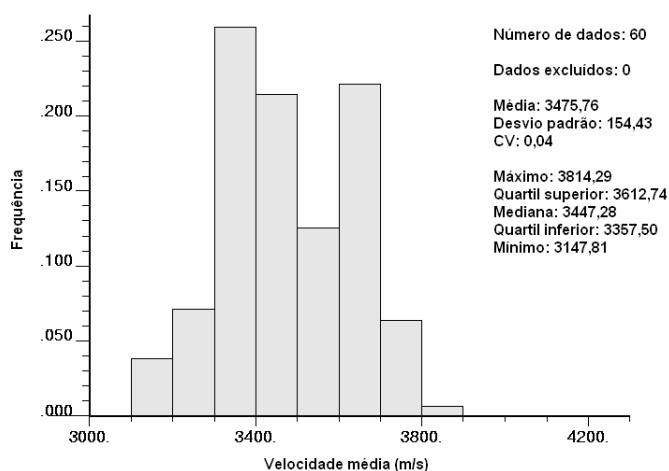
A Figura 5.80 apresenta o histograma para as amostras de valores de velocidade média até a camada GCWS, enquanto a Figura 5.81 apresenta o

<sup>3</sup> A velocidade média de uma onda acústica até a camada GCWS é igual a média aritmética das velocidades medidas ao longo do furo, apenas, quando os tempos gastos pela onda para percorrer os trechos medidos até a camada GCWS são iguais. Por isso, a velocidade média até a camada de carvão GCWS não é igual a média aritmética das velocidades.

histograma para as mesmas amostras desagrupadas. As amostras foram desagrupadas pelo método das células móveis.



**Figura 5.80-** Histograma para as amostras de valores de velocidade média até a camada GCWS.



**Figura 5.81-** Histograma para as amostras desagrupadas de valores de velocidade média até a camada GCWS.

Os variogramas construídos com as amostras de velocidade média apresentaram-se muito parecidos com os variogramas construídos com as amostras de vagarosidade média, o que indica que a mudança da variável vagarosidade pela variável velocidade tem pouca influência na etapa de determinação da continuidade. A direção de maior continuidade dos valores das amostras de velocidade média

também é próxima da direção azimutal de  $45^\circ$ . O variograma superficial construído com as amostras de velocidade média é apresentado na Figura 5.82 enquanto o variograma omnidirecional e os variogramas experimentais direcionais nas direções azimutais de  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67,5^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $112,5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157,5^\circ$  e  $180^\circ$  são apresentados nas Figuras 5.83 a 5.91 respectivamente.

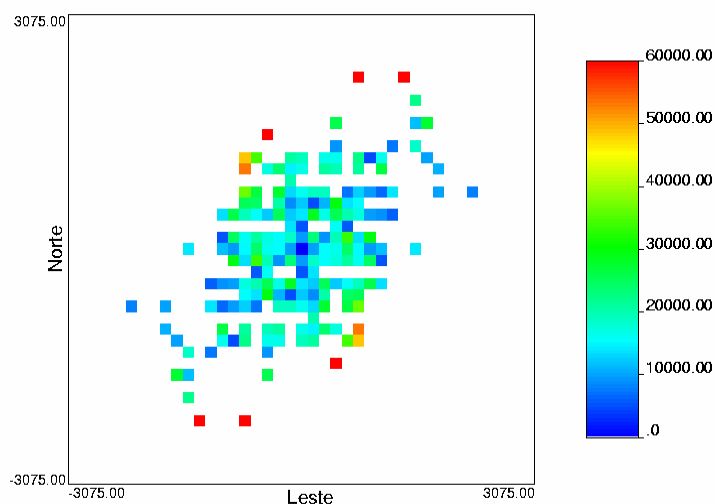


Figura 5.82- Variograma superficial construído com as amostras de velocidade média.

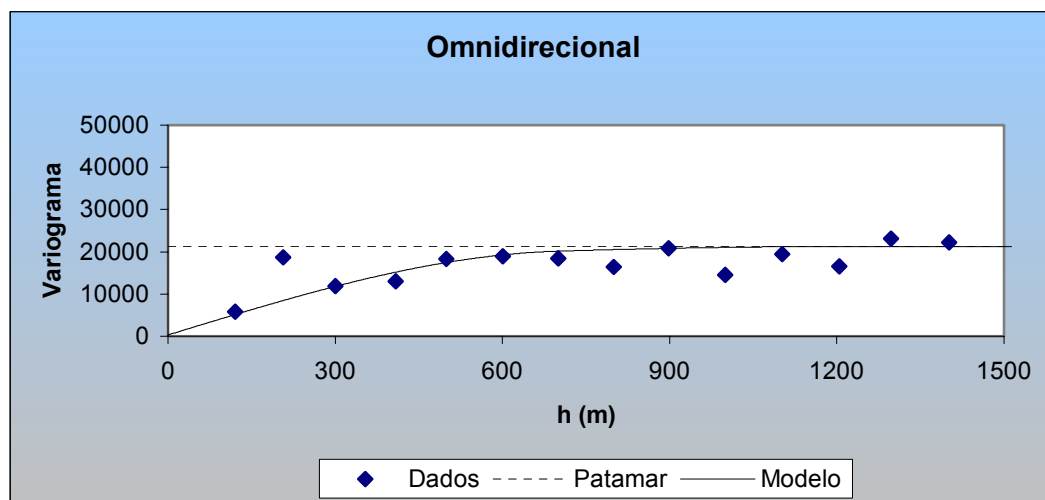


Figura 5.83- Variograma omnidirecional construído com as amostras de velocidade média e o modelo ajustado a esse variograma.

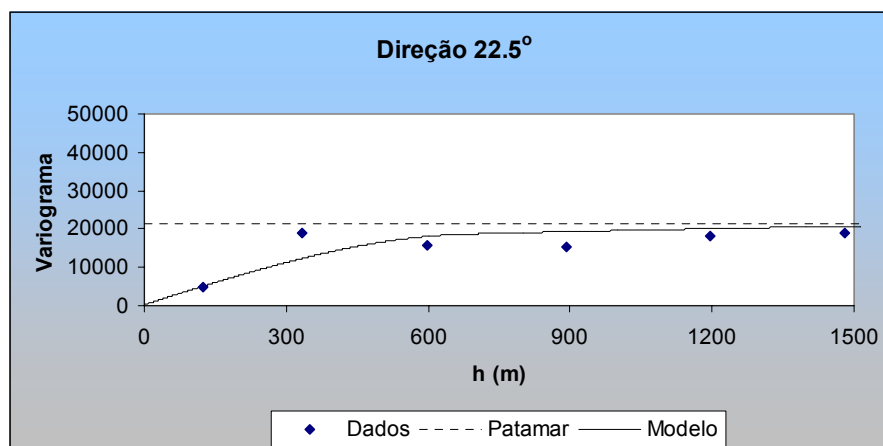


Figura 5.84- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 22,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

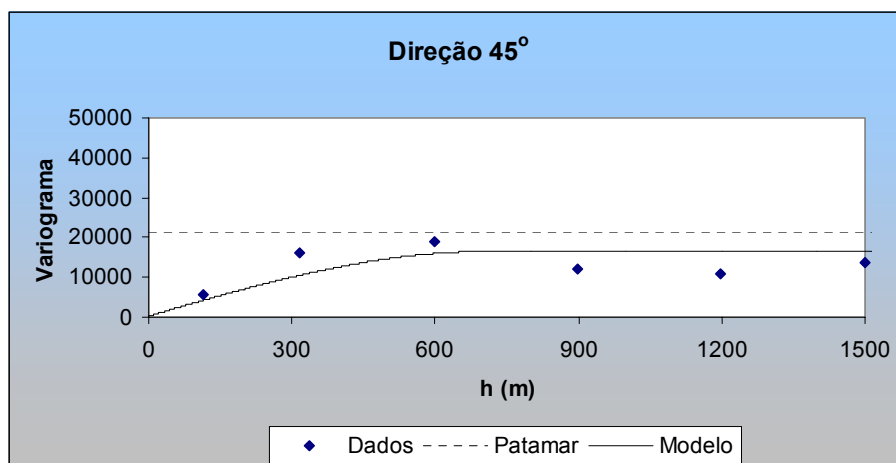


Figura 5.85- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média direção azimutal de 45° e o modelo ajustado a esse variograma.

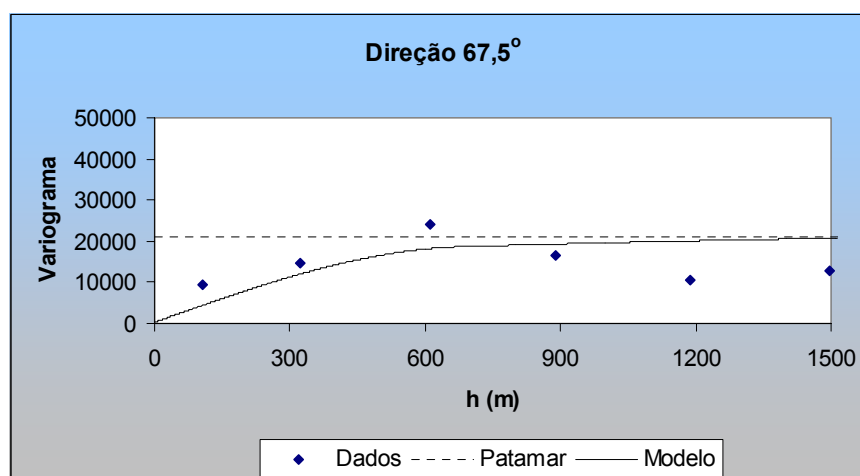


Figura 5.86- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 67,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

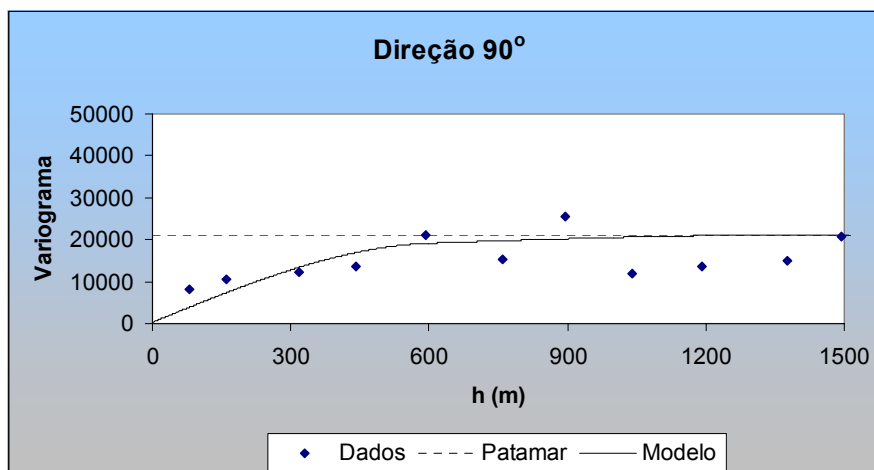


Figura 5.87- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 90° e o modelo ajustado a esse variograma.

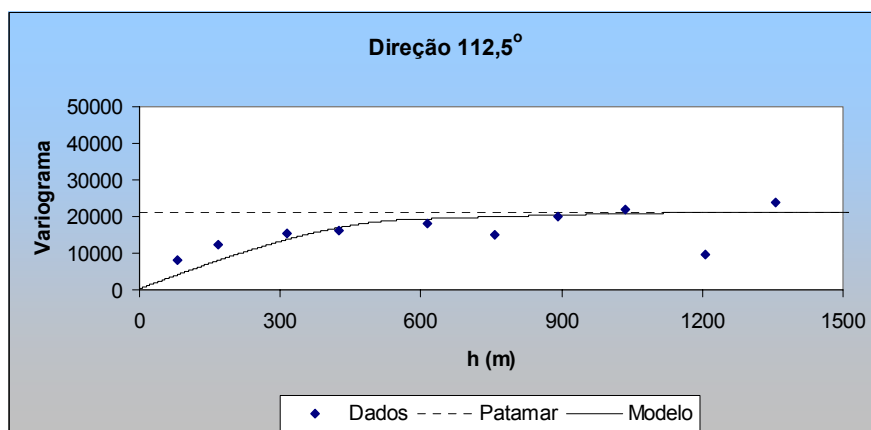


Figura 5.88- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 112,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

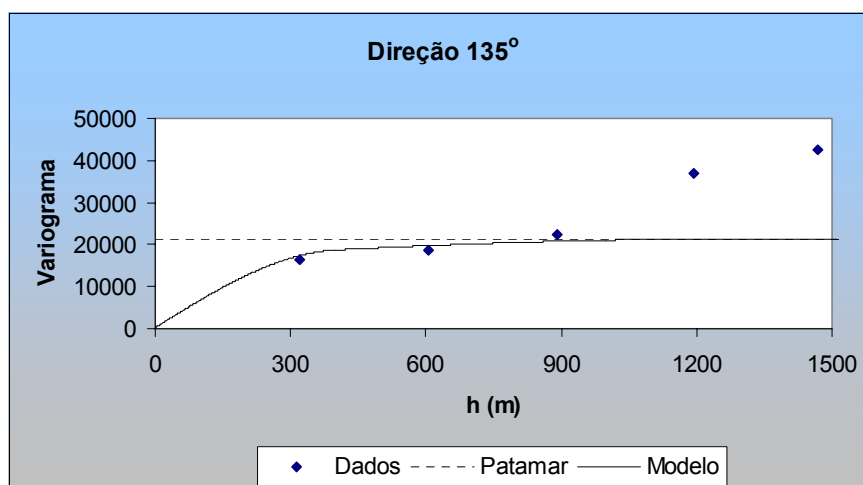


Figura 5.89- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 135° e o modelo ajustado a esse variograma.

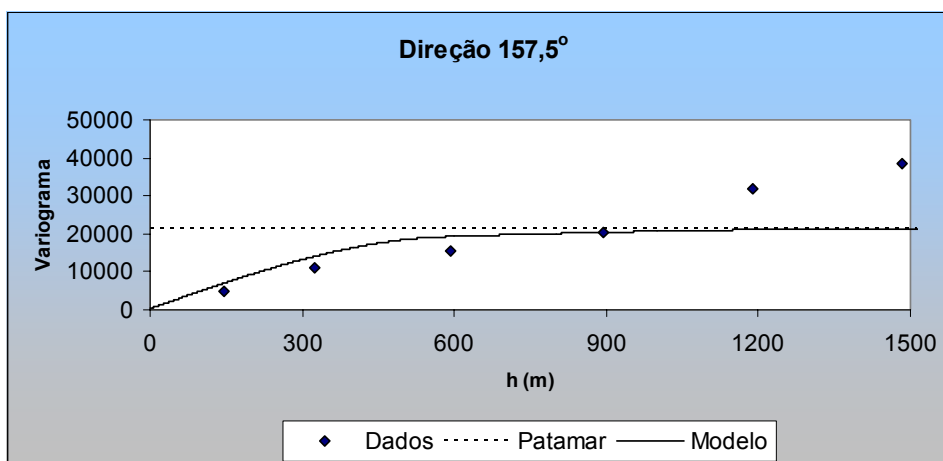


Figura 5.90- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 157,5° e o modelo ajustado a esse variograma.

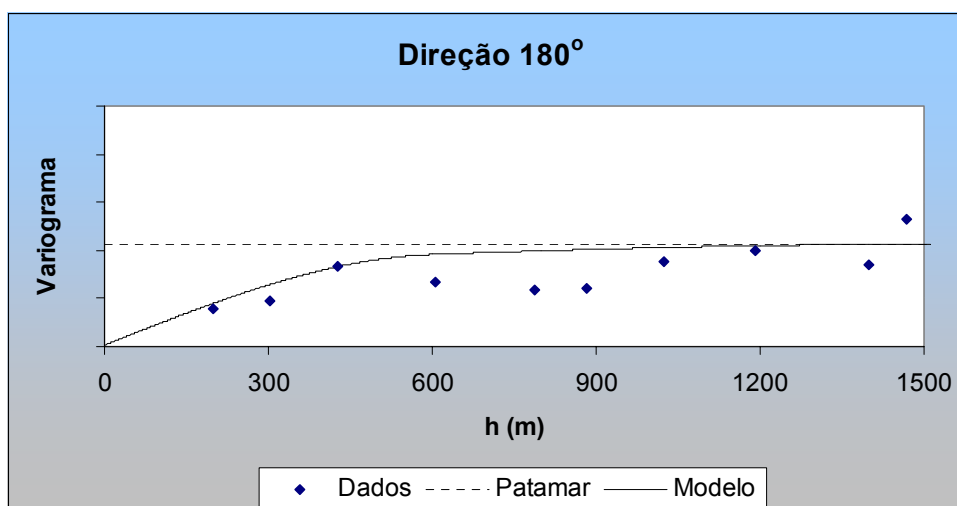


Figura 5.91- Variogramas experimental construído com as amostras de velocidade média na direção azimutal de 180° e o modelo ajustado a esse variograma.

A função variograma ajustada para os variogramas pode ser escrita da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 290 + 16113,23 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}45^\circ}}{700}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}135^\circ}}{400}\right) + 4834 \times \text{Sph}\left(\frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}45^\circ}}{100000}, \frac{\mathbf{h}_{\text{azimute}135^\circ}}{1200}\right) \quad (5.26)$$

As Figuras 5.92 e 5.93 mostram o histograma dos erros das estimativas e o mapa de correlação entre os dados de velocidade média e suas estimativas,

resultantes da validação cruzada realizada para a krigagem ordinária dos valores de velocidade média. Os parâmetros de busca e variograma utilizados nessa validação cruzada estão listadas na Tabela 5.5.

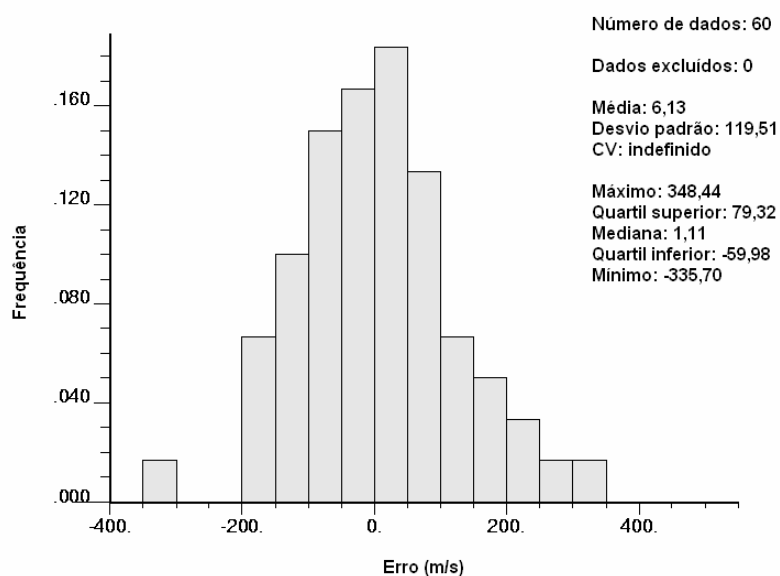


Figura 5.92- Histograma do erro obtido por validação cruzada do atributo velocidade média.

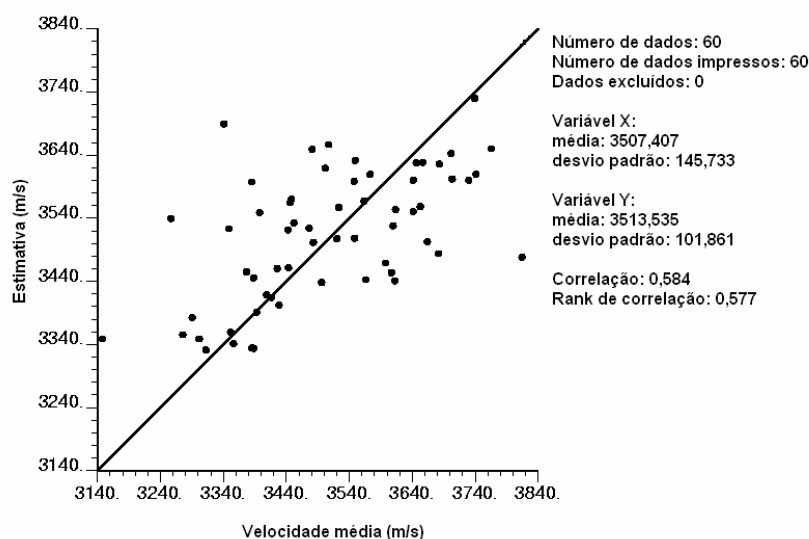


Figura 5.93- Mapa de correlação entre valores de velocidade média e suas estimativas.

Apesar da média dos erros obtidos por validação cruzada do atributo velocidade média ser satisfatória, a correlação entre os dados de velocidade média e suas estimativas, resultantes da validação cruzada atentam para o fato de que os

parâmetros que serão utilizados na krigagem podem não produzir estimativas satisfatórias. A pouca definição dos variogramas experimentais direcionais prejudicou o ajuste variográfico para o atributo velocidade média (2D) e conseqüentemente os futuros resultados da krigagem.

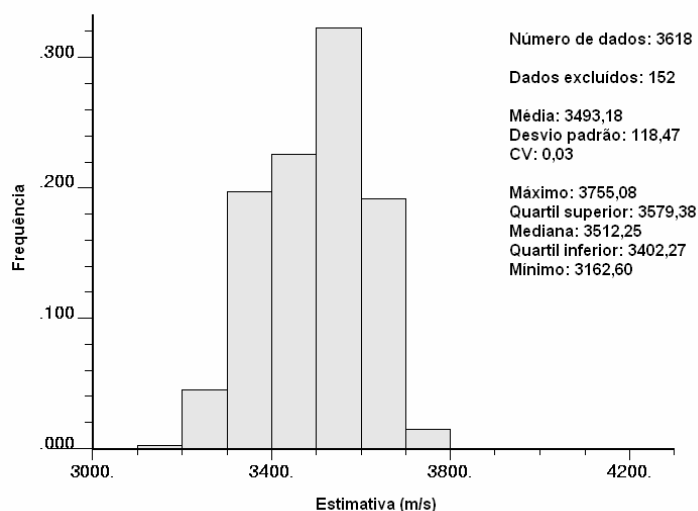
**Tabela 5.5- Parâmetros de busca e variograma usados na validação cruzada.**

<b>Parâmetros de busca e variograma</b>	
Mínimo de dados para krigagem	3
Máximo de dados para krigagem	16
Máximo de dados por octante	2
Tipo de krigagem	Krigagem ordinária
Máximo raio de busca (45°; 135°)	1400,1200
Variograma- número de estruturas	2
Variograma- efeito pepita	290
Variograma- modelos (2)	Esférico
Variograma- primeira estrutura - patamar	16113,23
Variograma- primeira estrutura – alcance (45°; 135°)	700,400
Variograma- segunda estrutura – patamar	4834
Variograma- segunda estrutura – alcance (45°; 135°)	100000,1200

A realização da krigagem ordinária de bloco gerou estimativas para 3770 blocos de 50 x 50 m orientados ao longo das direções leste e norte, respectivamente (65 nós na direção leste x 58 nós na direção norte). Esses blocos formam o chamado modelo de blocos da krigagem ordinária, o qual a origem, no canto inferior esquerdo do modelo, possui as coordenadas 654175 m e 7443375 m.

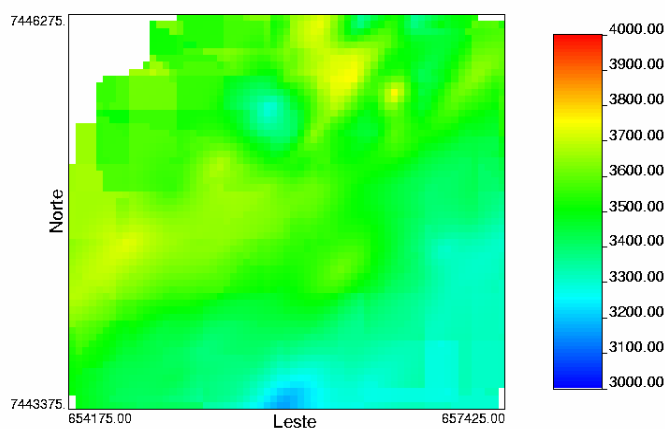
A Figura 5.94 apresenta o histograma para as estimativas de valores de velocidade média, o qual é semelhante (desconsiderando o efeito de suavização intrínseco aos algoritmos de krigagem), ao histograma das amostras desagrupadas de velocidade média.





**Figura 5.94-** Histograma para as estimativas de valores de velocidade média.

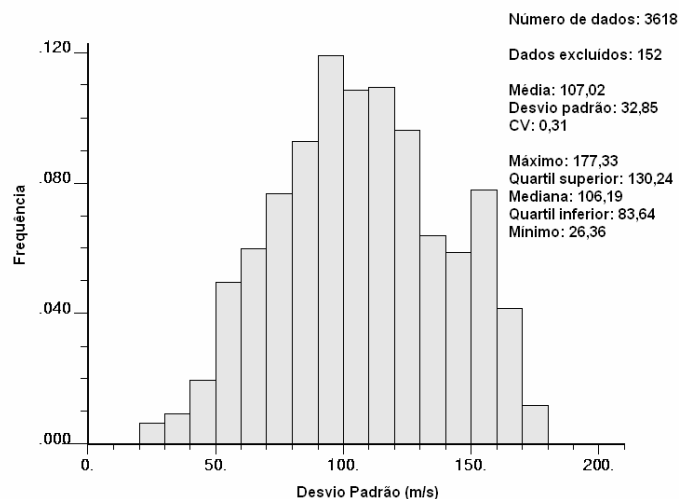
A Figura 5.95 apresenta o mapa das estimativas de velocidade média obtidas por krigagem ordinária.



**Figura 5.95-** Mapa das estimativas de velocidade média obtidas por krigagem ordinária. A escala de cores representa valores de velocidade média até a capa da camada GCWS.

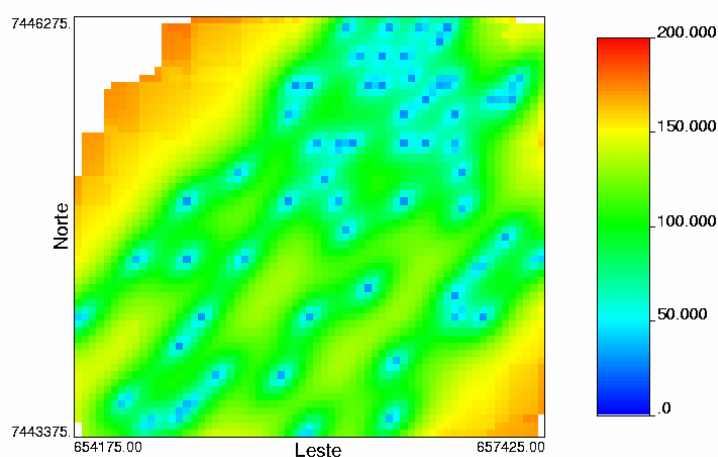
A incerteza de cada estimativa de velocidade média, que será utilizada para a medida de incerteza na determinação da profundidade da camada GCWS, pode ser obtida por meio dos valores de desvio padrão de krigagem. Esses valores são obtidos pela variância de krigagem (ver equação 5.20), visto que o valor de desvio padrão é a raiz quadrada da variância.

A Figura 5.96 apresenta o histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem.



**Figura 5.96- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.**

A Figura 5.97 apresenta o mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.

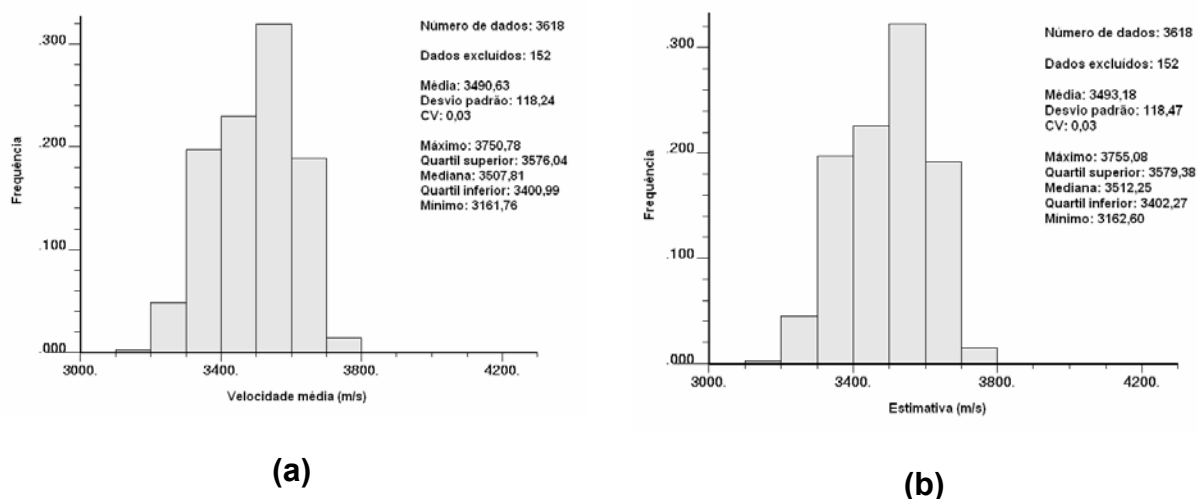


**Figura 5.97- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de velocidade média obtidos pela krigagem em duas dimensões.**

### 5.6.3 Krigagem do Atributo Vagarosidade Versus Krigagem do Atributo Velocidade

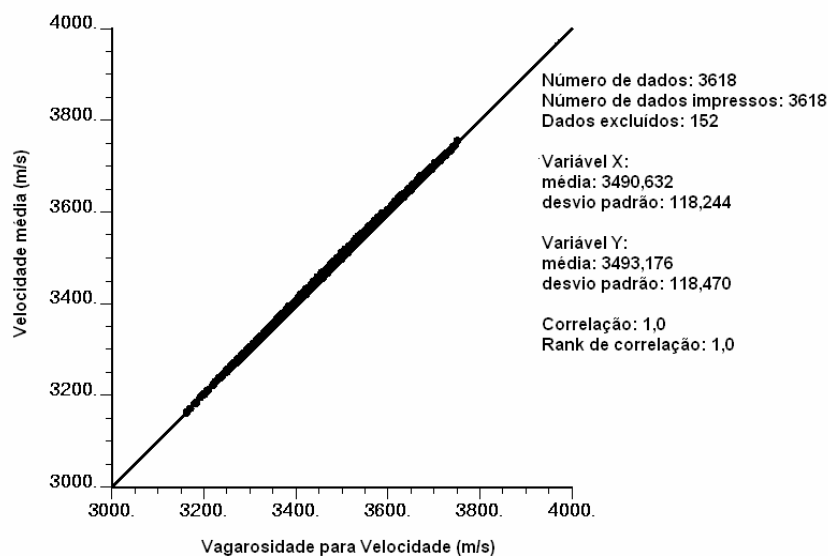
Os valores resultantes da krigagem do atributo vagarosidade média ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ ) foram transformados em valores de velocidade média (m/s) a fim de serem comparados com os valores resultantes da krigagem do atributo velocidade média.

A Figura 5.98 apresenta o histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo vagarosidade média, transformados em valores de velocidade média, e o histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo velocidade média.



**Figura 5.98- (a) Histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo vagarosidade média. (b) Histograma dos valores resultantes da krigagem do atributo velocidade média.**

A Figura 5.99 apresenta a correlação entre valores de velocidade média obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média.



**Figura 5.99- Correlação entre valores de velocidade média obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média.**

A análise da correlação entre valores de velocidade média obtidos pelos dois métodos e dos histogramas desses valores mostra que existe uma pequena diferença nos valores de velocidade média resultantes da krigagem do atributo vagarosidade média e da krigagem do atributo velocidade média. Porém, essa pequena diferença pode aumentar na medida que aumenta a variabilidade entre os valores amostrais. Além disso, quando a incerteza de cada estimativa é pequena, a diferença de valores resultantes das duas interpolações pode ser maior que essa incerteza. Por isso, quando o objetivo da interpolação de vagarosidades é a determinação de profundidades (necessidade de inversão da variável vagarosidade para obtenção dos resultados), deve-se considerar essa pequena diferença nas estimativas. Nesse caso, os valores estimados diferem em média 3 m/s (velocidade de onda acústica) o que poderia representar, por exemplo, uma incerteza de aproximadamente 18 cm na determinação da profundidade da camada GCWS considerando-se um tempo de propagação da onda sísmica, a partir da superfície do terreno até a capa dessa camada, de aproximadamente 0,065 s (ver capítulo 7).

Outro inconveniente da krigagem do atributo vagarosidade para obtenção de velocidade é a obtenção de valores de desvio padrão em unidades de velocidade, a fim de estimar-se a incerteza de cada estimativa. Uma maneira dos valores de desvio padrão serem obtidos em unidade m/s é ponderar o valor do desvio padrão pelo valor da estimativa, por exemplo:

$$\sigma_{vel} = \frac{\sigma_{vag}}{Z_{vag}} Z_{vel}$$

(5.27)

onde:

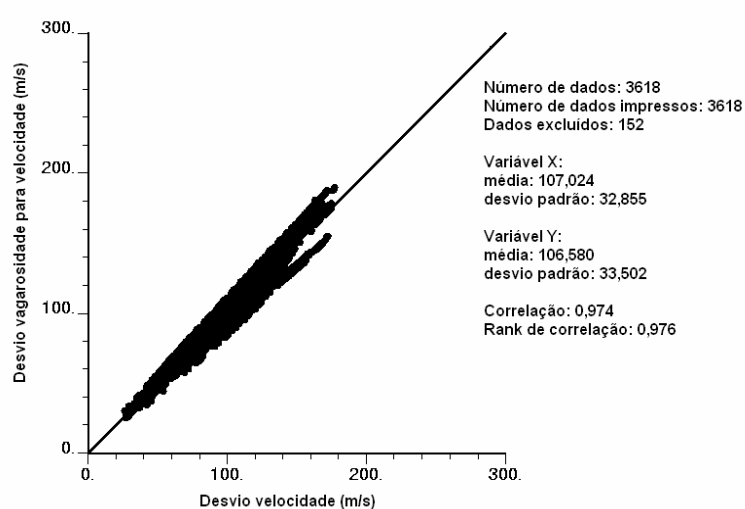
$\sigma_{vag}$  = desvio padrão da estimativa de vagarosidade;

$Z_{vag}$  = estimativa de vagarosidade;

$Z_{vel}$  = vagarosidade transformada em velocidade.

$\sigma_{vel}$  = desvio padrão da estimativa  $Z_{vel}$ .

A Figura 5.100 apresenta a correlação dos valores de desvio padrão em unidades m/s, obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média. A alta correlação entre esses valores mostra que o método ilustrado pela equação 5.27 é eficiente, porém, pequenos erros são agregados às medidas de incerteza.



**Figura 5.100- Correlação dos valores de desvio padrão (em m/s) obtidos pela krigagem do atributo vagarosidade média e pela krigagem do atributo velocidade média.**

A utilização de valores de vagarosidade na krigagem tridimensional, apresentada anteriormente, tem sua vantagem no fato de que o cálculo da vagarosidade média (inverso da velocidade média) que a onda leva para propagar-se por um “furo virtual”<sup>4</sup> até a camada GCWS (ver seção 5.7) seria facilmente calculada pela média aritmética dos valores resultantes da krigagem. Ao contrário da velocidade média, que não pode ser calculada pela média aritmética das velocidades, nesse caso, a distância total percorrida deveria ser dividida pelo tempo total gasto pela onda para propagar-se até a camada de carvão.

### **5.7 Krigagem 2D e 3D para Obtenção de Vagarosidade Média**

Na krigagem bidimensional de vagarosidade média, as estimativas são os próprios valores desejados: vagarosidade média. Os valores de desvio padrão de krigagem em cada nó estimado podem ser utilizados como uma medida de incerteza da vagarosidade média estimada no respectivo nó. Já na krigagem tridimensional de valores de vagarosidade obtidos por perfilagem, os valores de vagarosidade média são encontrados a partir da média aritmética dos valores de vagarosidade estimados em elevações superiores a elevação da camada de interesse, em cada furo virtual.

Os valores de vagarosidade estimados em elevações superiores a elevação da camada de interesse são facilmente reconhecidos nos resultados da krigagem tridimensional com o uso de coordenadas estratigráficas, como a que foi considerada neste estudo, por apresentarem valores de elevação positivos, visto que a capa da camada de interesse (GCWS) apresenta elevação igual a 0m ao longo de sua extensão. Outra maneira de delimitar os valores de vagarosidade acima ou abaixo da camada de interesse é por meio da diferença de valores estimados em camadas de diferentes propriedades físicas.

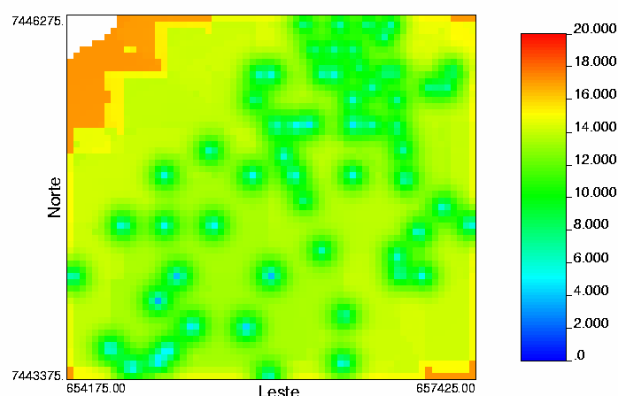
Um inconveniente da krigagem tridimensional para obtenção de valores de vagarosidade média é o fato de que a incerteza de cada estimativa de vagarosidade média pode ser apenas aproximada. A hipótese da utilização da média ponderada

---

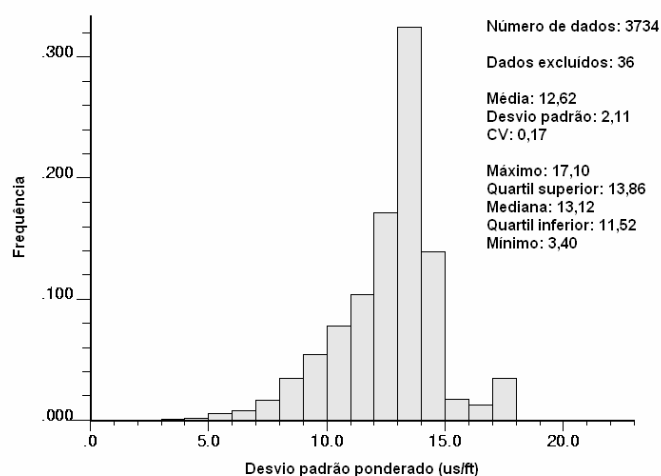
<sup>4</sup> A expressão “furo virtual” será utilizada neste trabalho como o conjunto de valores estimados que apresentam mesmos valores de coordenada Leste (x) e coordenada Norte (y), porém diferentes elevações.

(ponderando os valores de desvio padrão pelos valores das estimativas) dos valores de desvio padrão em cada nó krigado de um mesmo furo virtual, para obtenção da incerteza da vagarosidade média desse furo, pode ser sugerida (ver Figuras 5.101 e 5.102), contudo, essa metodologia pode ser usada apenas como uma aproximação, visto que os valores estimados em um mesmo furo virtual não são independentes (Souza, 2004).

A Figura 5.103 apresenta os mapas das estimativas de vagarosidade média obtidos por krigagem 2D e 3D. A Figura 5.104 apresenta os histogramas dessas estimativas enquanto a Figura 5.105 apresenta a correlação entre os valores obtidos por krigagem 2D e 3D em cada nó de *grid* interpolado.



**Figura 5.101- Mapa dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.**



**Figura 5.102- Histograma dos valores de desvio padrão das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.**

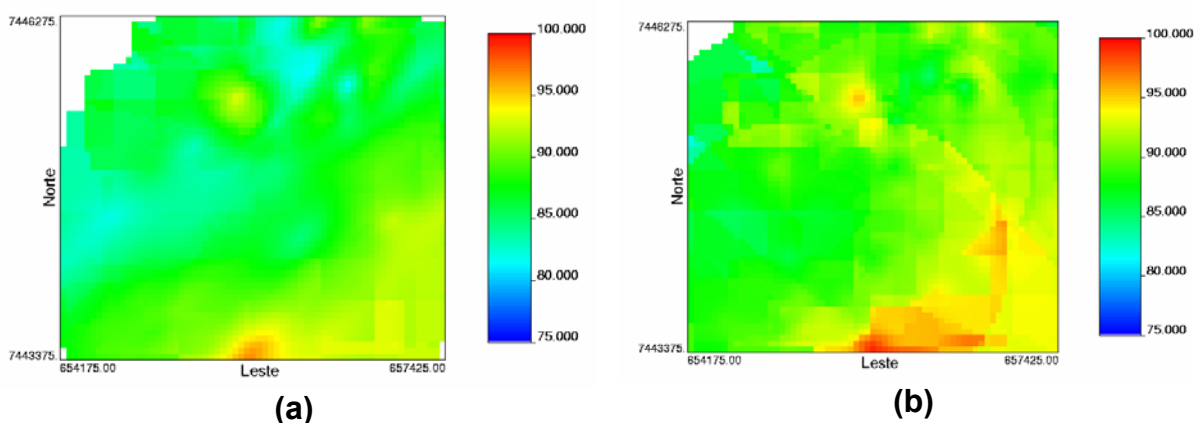


Figura 5.103- (a) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 2D. (b) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.

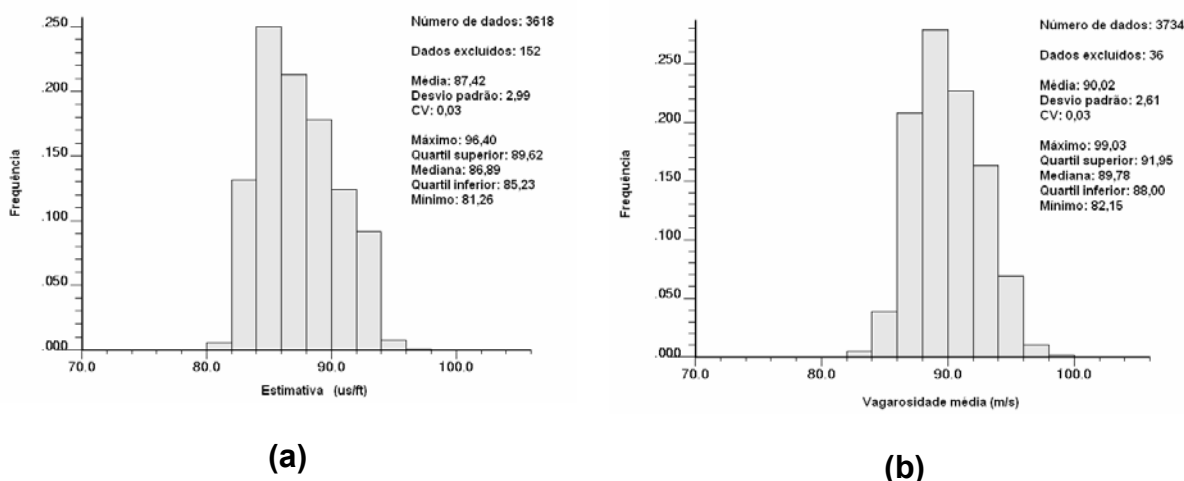


Figura 5.104- (a) Histograma das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 2D. (b) Histograma das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem 3D.

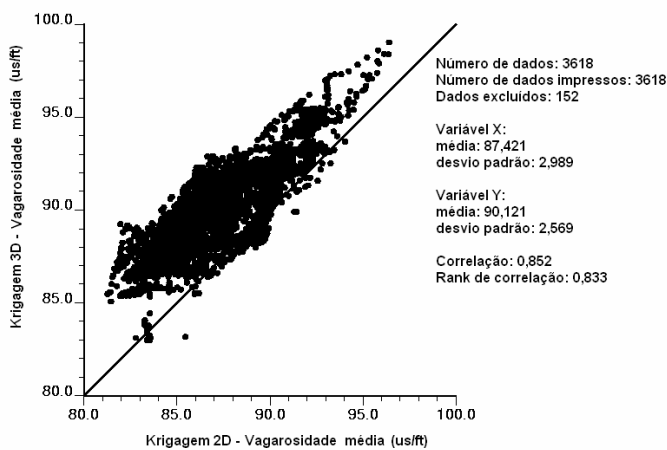
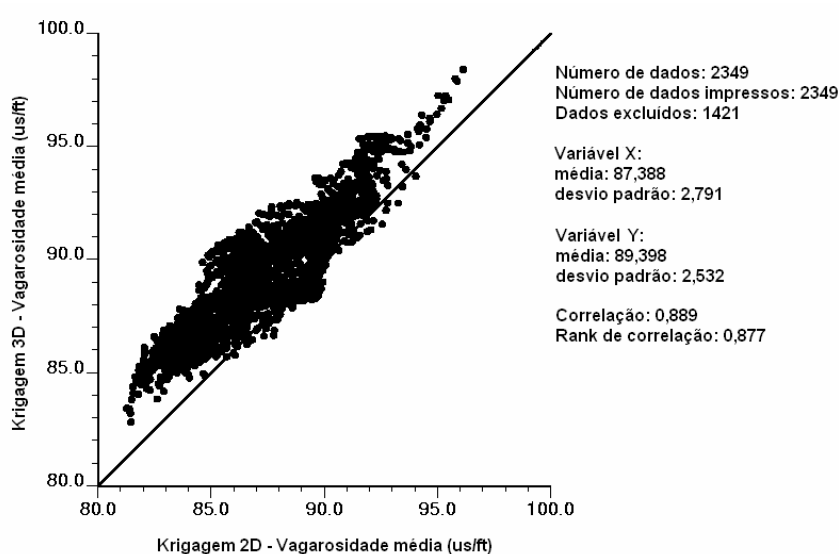


Figura 5.105- Correlação entre os valores obtidos por krigagem 2D e 3D em cada nó de *grid* interpolado.



Os valores obtidos pelos dois métodos apresentam significativa diferença, como é evidenciado na Figura 5.105. Contudo a correlação (Figura 5.106) mais adequada para comparação entre estimativas de vagarosidade média obtidas pela krigagem tridimensional e pela krigagem bidimensional deve desconsiderar valores da krigagem tridimensional que foram estimados em elevações acima da cota da superfície topográfica. A superfície topográfica foi construída por triangulação dos valores de elevação da superfície em cada furo perfurado e delimitou o *grid* de vagarosidade média obtido por krigagem tridimensional.



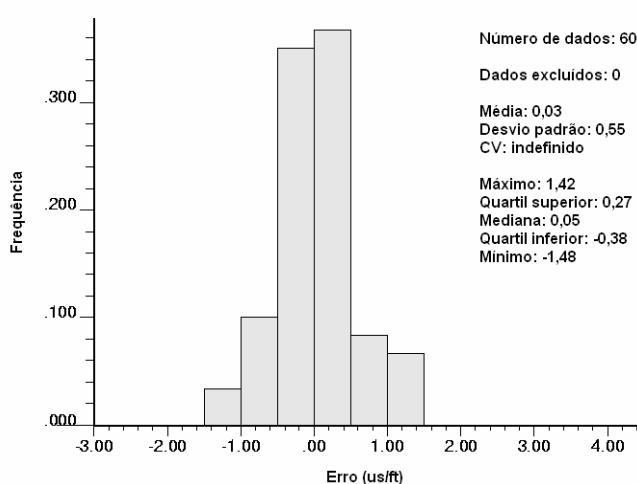
**Figura 5.106- Correlação entre os valores obtidos por krigagem 2D e 3D em cada nó de *grid* interpolado (valores acima da superfície topográfica foram desconsiderados).**

A diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos, confirmada na Figura 5.106, mostra que a escolha do método a ser utilizado na obtenção de valores de vagarosidade média possui grande importância, visto que métodos diferentes produzem diferentes estimativas. Os resultados obtidos por krigagem tridimensional são, provavelmente, mais acurados do que os resultados obtidos por krigagem bidimensional. Além do fato da krigagem tridimensional poder usar amostras de várias direções para obter cada estimativa, a krigagem bidimensional utilizou valores de vagarosidade média, cujos variogramas não se apresentaram bem definidos, devido a pequena quantidade de amostras (em duas dimensões).

Um teste prático considerou as estimativas de vagarosidade média obtidas com a krigagem tridimensional mais corretas do que as estimativas de vagarosidade média obtidas com a krigagem bidimensional.

Esse teste foi realizado da seguinte maneira:

- Cálculo das médias aritméticas das estimativas de vagarosidade resultantes da validação cruzada (mínimo de separação entre amostras igual a 80 m - ver seção 5.4.2) tridimensional em cada furo. Apenas as estimativas com elevação acima da cota da capa da camada GCWS foram consideradas no cálculo das médias. Os valores das médias foram considerados os valores de vagarosidade média até a capa da camada.
- Os dados originais de vagarosidade média, utilizados na krigagem bidimensional, foram subtraídos dos valores de vagarosidade média obtidos com a validação cruzada tridimensional, em cada furo. Assim, os valores de erro das estimativas de vagarosidade média foram encontrados (ver Figura 5.107).



**Figura 5.107- Histograma dos valores de erro das estimativas de vagarosidade média encontradas por krigagem tridimensional.**

Apesar desse teste apresentar uma pequena tendência de subestimar os erros das médias obtidas por krigagem tridimensional, comparando-se os valores de erro dos histogramas das Figuras 5.73 e 5.107 observa-se que as estimativas de vagarosidade média obtidas na krigagem tridimensional são em média muito mais

corretas do que as estimativas obtidas com a krigagem bidimensional. A pequena tendência de subestimar os erros das médias ocorre porque na validação cruzada as estimativas são realizadas de 5 em 5 cm ao longo do furo, ao contrário dos valores do *grid* tridimensional que possui espaçamento vertical de 50 cm.

Outra desvantagem no uso da krigagem bidimensional, na forma como foi apresentada, em relação a krigagem tridimensional é que as estimativas obtidas na krigagem 2D não podem considerar desníveis significativos da superfície topográfica (quando estes estiverem presentes). Para o caso tridimensional, as estimativas posicionadas acima da superfície topográfica podem ser desconsideradas durante o cálculo dos valores de vagarosidade média. Além disso, os dados originais excluídos não podem ser considerados no cálculo da vagarosidade média para o caso bidimensional, enquanto que para o caso tridimensional, esses dados podem ser estimados (utilizando-se os dados vizinhos) e considerados no cálculo da vagarosidade média.

Em vista dos aspectos abordados, a obtenção de valores de vagarosidade média com a utilização de krigagem tridimensional foi escolhida como a mais acurada em relação a krigagem bidimensional para obtenção de valores de profundidades de uma camada de interesse.

## **5.8 Considerações Finais**

O presente capítulo apresentou a krigagem ordinária dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica utilizando dados com elevação em coordenadas cartesianas e em coordenadas estratigráficas. A comparação das estimativas obtidas com essas krigagens mostrou que as estimativas realizadas com dados em coordenadas estratigráficas são mais acuradas do que as estimativas realizadas com dados em coordenadas cartesianas, por isso, na krigagem tridimensional de vagarosidade o uso de coordenadas estratigráficas é recomendado.

A krigagem dos dados bidimensionais de vagarosidade média de onda acústica e a krigagem bidimensional dos dados de velocidade média de onda

acústica também foram apresentadas. A comparação das estimativas dessas duas krigagens mostrou uma pequena diferença desses valores. Por isso, quando o objetivo da interpolação de vagarosidades é a determinação de profundidades (necessidade de inversão da variável vagarosidade para obtenção dos resultados), deve-se considerar essa diferença. A diferença nas estimativas de vagarosidade e velocidade ocorre pelo fato de que a velocidade, variável alvo, é o inverso da vagarosidade, variável adotada nas medidas de perfilagem acústica.

A comparação das estimativas de vagarosidade média resultantes da krigagem tridimensional utilizando dados de vagarosidade de onda acústica com as estimativas resultantes da krigagem bidimensional de valores de vagarosidade média de onda acústica também foi abordada nesse capítulo. As estimativas de vagarosidade média resultantes da krigagem tridimensional foram obtidas por meio da média aritmética de cada “furo virtual”. A krigagem tridimensional foi considerada mais acurada e recomendada para realização de estimativas de vagarosidade média, apesar dessa metodologia não fornecer valores adequados de incerteza dessas estimativas. A simulação tridimensional pode fornecer estimativas de vagarosidade média, assim como a krigagem tridimensional, além de fornecer valores de incerteza das estimativas mais confiáveis.

O próximo capítulo apresentará a simulação seqüencial Gaussiana do atributo vagarosidade de onda acústica utilizando dados em coordenadas estratigráficas e as estimativas de vagarosidade média e incerteza associada a esses valores em cada “furo virtual”.

## CAPÍTULO 6 - Simulação

Nesse capítulo será apresentada a análise da continuidade espacial dos dados de vagarosidade de onda acústica que serão usados na simulação seqüencial Gaussiana (dados normalizados); a simulação seqüencial Gaussiana do atributo vagarosidade de onda acústica utilizando o banco de dados em coordenadas estratigráficas e a validação da simulação seqüencial gaussiana realizada. Será apresentada, também, após os resultados da simulação, uma comparação entre as estimativas de vagarosidade média obtidas pelos algoritmos de krigagem ordinária e de simulação seqüencial Gaussiana, a fim de escolher o algoritmo apropriado para fornecer valores de estimativas de vagarosidade média e incertezas associadas a esses valores.

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos utilizando-se os *softwares* Surfer© (Anon, 2002), Variowin© (Pannatier, 1996), Nscore.exe, Backtr.exe, Sgsim.exe, Histplt.exe, Gamv.exe, Gam.exe, Postsim.exe e Pixelplt.exe, sendo os oito últimos pertencentes a biblioteca de programas de geoestatística chamada GSLIB (Deutsch e Journel, 1998).

### **6.1 Simulação Estocástica**

Os algoritmos de simulação estocástica são capazes de atribuir diferentes valores de um atributo  $z$  a um local não amostrado ( $u$ ), ao contrário dos algoritmos de krigagem, que geram apenas um valor em cada local. Por isso, os valores gerados, para um local ( $u$ ), por algoritmos de simulação estocástica, podem ser chamados de simulações, enquanto o valor gerado por algum algoritmo de krigagem pode ser chamado de estimativa. Os valores simulados para um mesmo local ( $u$ ) têm igual probabilidade de ocorrerem.

Devido a característica dos algoritmos de krigagem produzirem melhores estimativas locais, já que a variância do erro é mínima (ver Capítulo 5), os mapas das estimativas de krigagem para uma dada área tendem a tornar-se suavizados. Além disso, essa suavização não é uniforme, sendo maior nos locais (u) mais afastados das amostras do que nos locais mais próximos destas (Goovaerts, 1997). Ao contrário, os mapas de valores simulados em diferentes locais (u) tentam reproduzir a real variabilidade do atributo em estudo. Assim, os algoritmos de krigagem são preferidos para estimativas locais de um atributo qualquer, enquanto os algoritmos de simulação são preferidos nos estudos que visam reproduzir as flutuações dos valores do atributo sobre a área em estudo (Journel e Huijbregts, 1978).

Cada conjunto de valores simulados em diferentes locais (u) é chamado de realização. As realizações geradas por algoritmos de simulação estocástica honram os valores das amostras em suas localizações e reproduzem o histograma e variograma das amostras.

A Figura 6.1 apresenta exemplos de variogramas gerados por um algoritmo de krigagem (krigagem ordinária) e por um algoritmo de simulação estocástica (simulação seqüencial Gaussiana), para o atributo vagarosidade de onda acústica, a fim de realçar as diferenças dos variogramas obtidos nos modelos gerados com esses tipos de algoritmos.

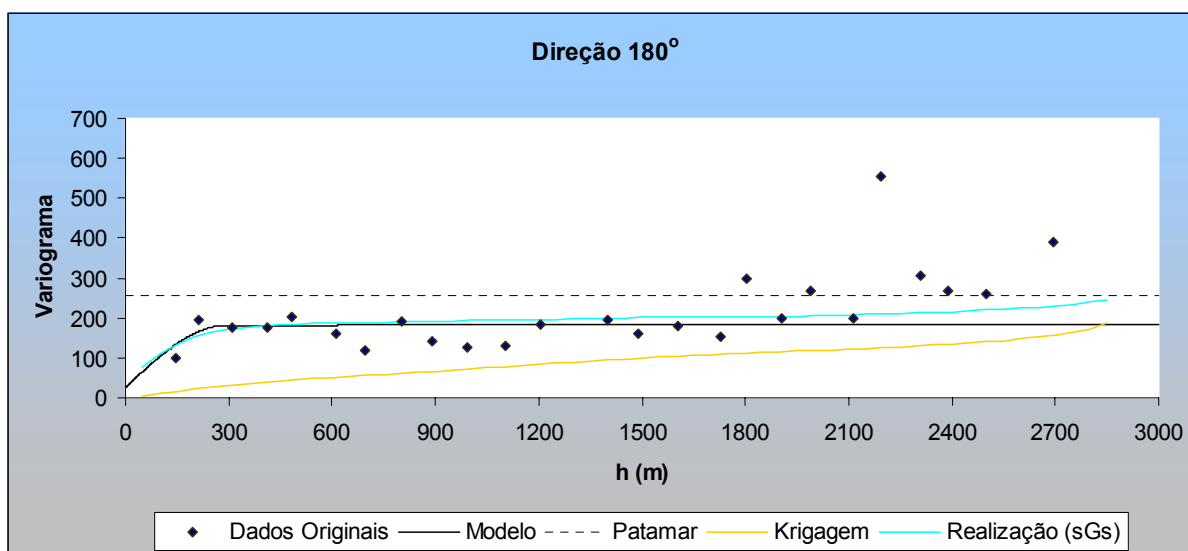


Figura 6.1- Exemplos de variogramas gerados por krigagem ordinária e por simulação seqüencial Gaussiana para o atributo vagarosidade de onda acústica.

A diferença entre realizações considera a incerteza dos valores simulados e dos seus variogramas. Essas variações são conhecidas como flutuações ergódicas. Os fatores que controlam a magnitude das flutuações ergódicas da simulação são descritos a seguir:

- algoritmo utilizado para gerar as realizações. Realizações geradas por simulação seqüencial Gaussiana, por exemplo, reproduzem aproximações dos variogramas dos dados originais, apenas na média dos valores de variogramas das realizações. Por exemplo, segundo Goovaerts (1997) maiores flutuações ergódicas são esperadas com a utilização de simulação seqüencial Gaussiana do que com a utilização de simulação annealing<sup>1</sup>;
- quantidade de dados originais utilizados na realização. Quanto maior a quantidade de dados originais utilizados em cada realização, mais próximos do histograma e variograma dos dados originais serão o histograma e variograma de cada realização, logo as flutuações ergódicas da simulação serão pequenas;
- relação entre o alcance do variograma e o tamanho da área simulada. Quando o alcance do variograma das amostras originais for grande em relação ao tamanho da área simulada, as flutuações ergódicas também serão grandes especialmente quando o efeito pepita for pequeno.

## **6.2 Simulação Seqüencial Gaussiana do Atributo Vagariosidade**

Provavelmente, a técnica de simulação estocástica mais comumente usada é a chamada simulação seqüencial Gaussiana (Isaaks, 1990), a qual foi selecionada para este estudo de caso.

O histograma desagrupado para amostras de vagariosidade de onda acústica (capítulo 4) mostra uma assimetria positiva (o histograma apresenta uma

---

<sup>1</sup> Valores de um atributo Z qualquer são atribuídos aos locais a serem simulados (realização). Esses valores honram os valores das amostras em suas localizações e o histograma desses valores aproxima-se dos histogramas dos valores originais. A realização é perturbada até que os variogramas dessa realização reproduzam os variogramas dos dados originais, ainda honrando esses últimos (Deutsch e Journel, 1992).

“cauda” para o lado dos valores altos). A simulação seqüencial Gaussiana (sGs) exige uma distribuição normal (Gaussiana) dos dados utilizados. Conseqüentemente, antes de se fazer uso desta técnica os dados devem ser normalizados.

A normalização pode ser explicada por meio de um procedimento gráfico que utiliza a distribuição acumulada dos dados originais (Figura 6.2). A Figura 6.3 mostra um histograma normal padrão, que se refere aos dados normalizados. A Figura 6.4 mostra o histograma acumulado das amostras de vagarosidade de onda acústica normalizadas.

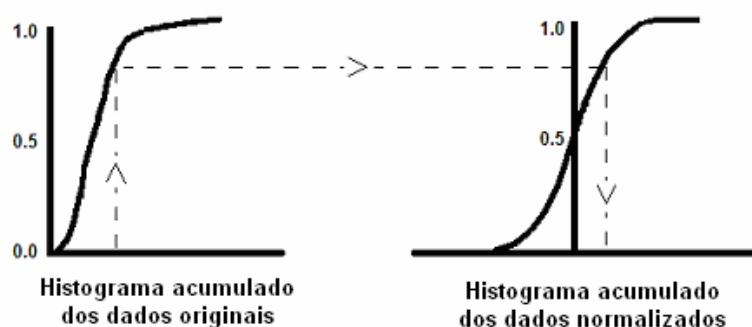


Figura 6.2- Procedimento gráfico para transformar a distribuição acumulada dos dados originais em uma distribuição normal padrão.

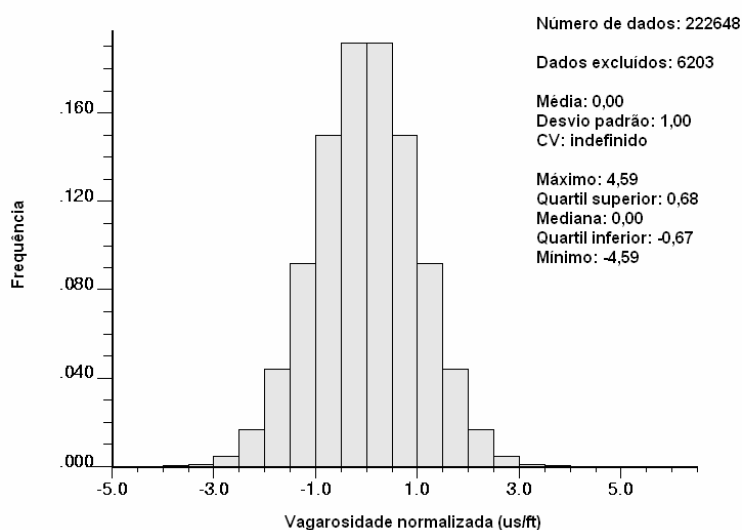
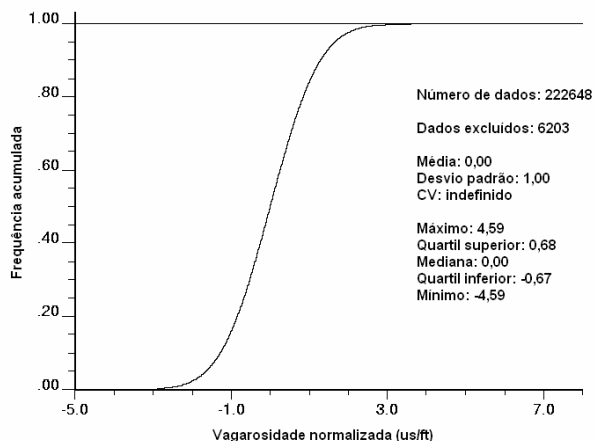


Figura 6.3- Histograma dos dados de vagarosidade de onda acústica normalizados.





**Figura 6.4-** Histograma acumulado dos dados de vagarosidade de onda acústica normalizados.

Após a simulação, os valores normalizados resultantes são transformados em valores no espaço original (retro-transformação dos valores simulados). A retro-transformação também pode ser feita graficamente, seguindo o caminho inverso daquele mostrado pela Figura 6.2. Contudo, nem sempre o valor de quantil gerado na simulação corresponde ao valor de alguma amostra contida no banco de dados usado na transformação e assim alguma forma de interpolação deve ser usada entre esses pontos. Quando o número de amostras do banco de dados original for muito pequeno, algumas suposições devem ser feitas sobre a extrapolação dos valores máximo e mínimo do banco de dados original e sobre a interpolação de valores entre os valores das amostras originais (Deutsch e Journel, 1998).

O banco de dados de vagarosidade de onda acústica apresenta grande quantidade de amostras, por isso, a retro-transformação dos dados de vagarosidade simulados utilizando interpolação linear entre os valores das amostras do banco de dados foi utilizada. Os valores mínimos e máximos do banco de dados de vagarosidade não foram extrapolados, visto que os valores existentes constituem os limites físicos significativos do atributo em estudo (ver Capítulo 2).

A simulação seqüencial Gaussiana exige variogramas de dados normalizados. Esta seção mostra os variogramas das amostras de vagarosidade de onda acústica normalizadas, os quais são similares aos variogramas modelados com as amostras originais. Os dados normalizados usados na variografia são obtidos por meio da distribuição dos dados originais, enquanto os dados normalizados usados na simulação são obtidos usando a distribuição desagrupada das amostras originais.

A Figura 6.5 mostra o variograma experimental vertical das amostras normalizadas, o qual é semelhante ao variograma experimental vertical das amostras originais, conforme esperado. As Figuras 6.6 a 6.14 mostram o variograma normalizado experimental omnidirecional e os variogramas normalizados experimentais horizontais direcionais nas direções azimutais de  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente. Esses variogramas também são parecidos com os respectivos variogramas dos dados originais.

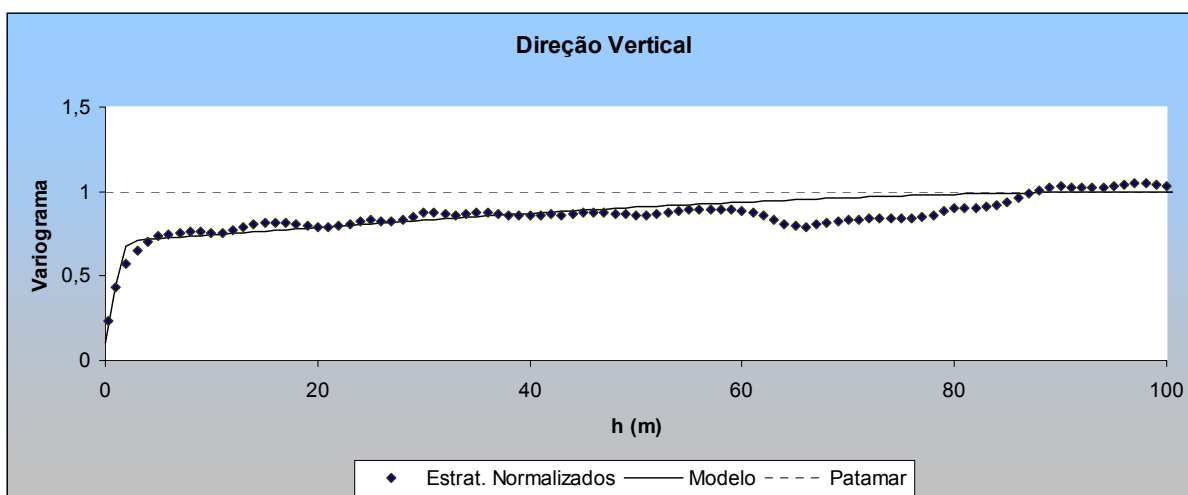


Figura 6.5- Variograma experimental vertical (dados normalizados) e seu modelo.

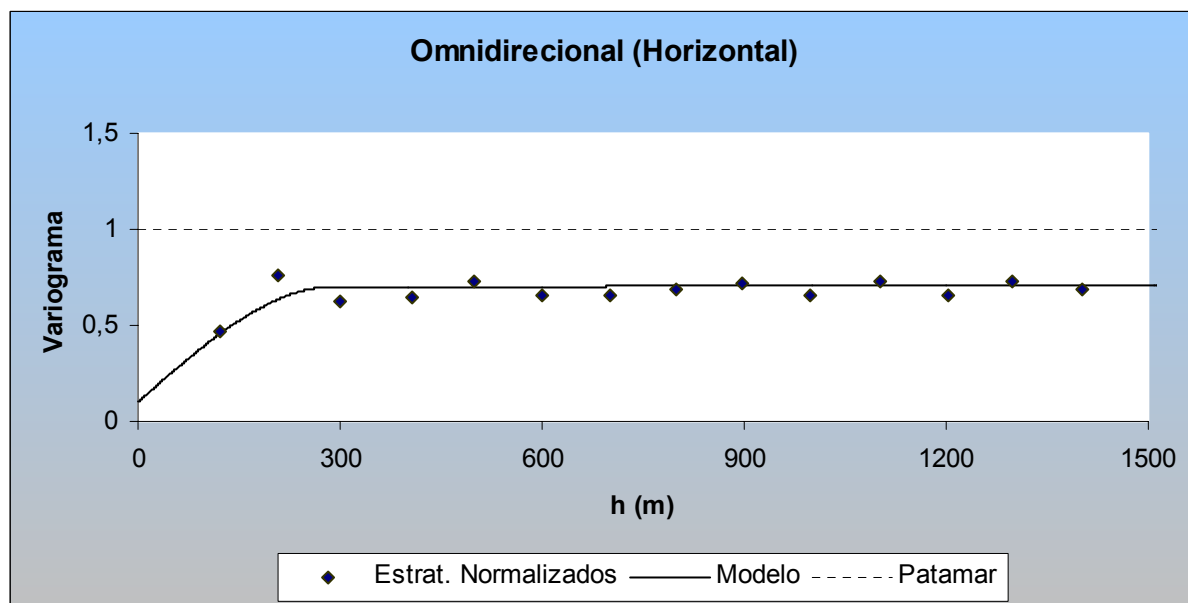


Figura 6.6- Variograma experimental omnidirecional (dados normalizados) e seu modelo.

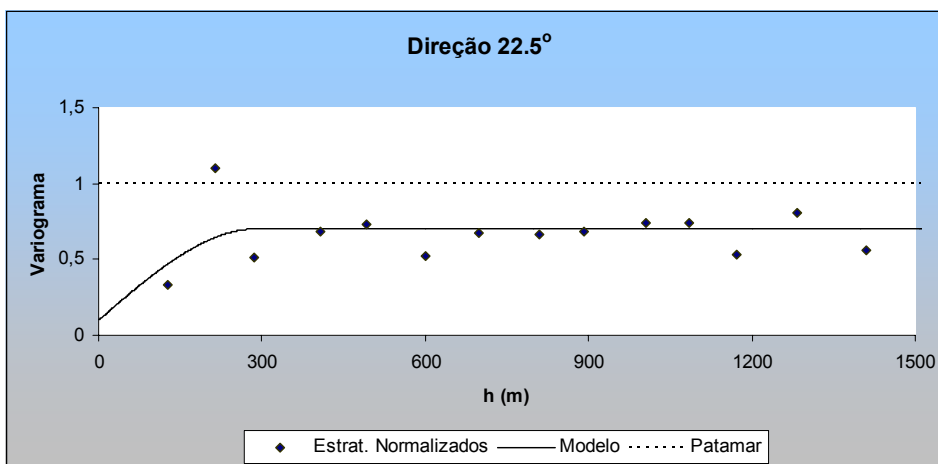


Figura 6.7- Variograma experimental dos dados normalizados a 22,5° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

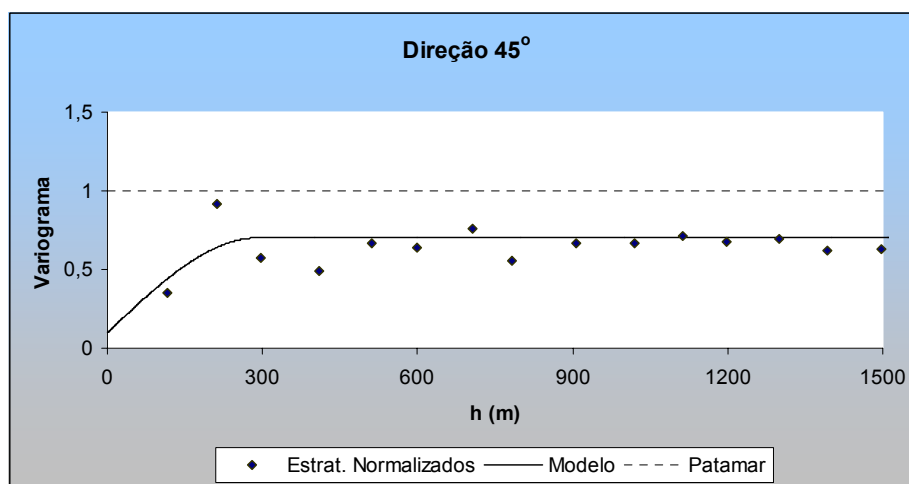


Figura 6.8- Variograma experimental dos dados normalizados a 45° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

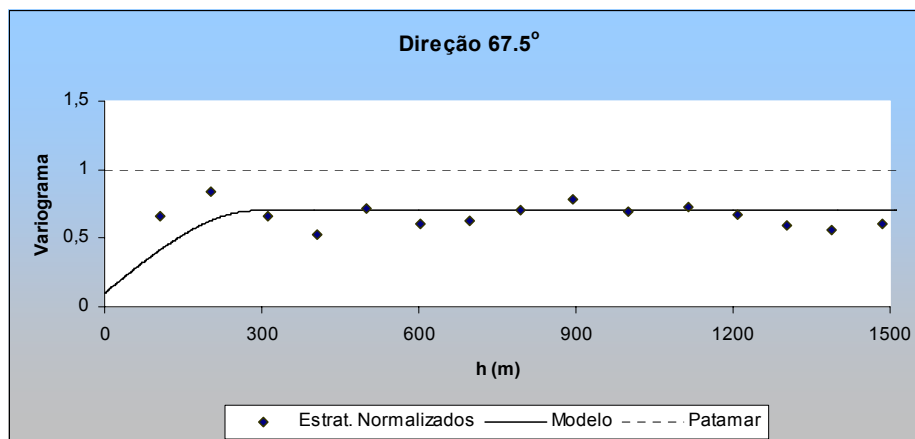


Figura 6.9- Variograma experimental dos dados normalizados a 67,5° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

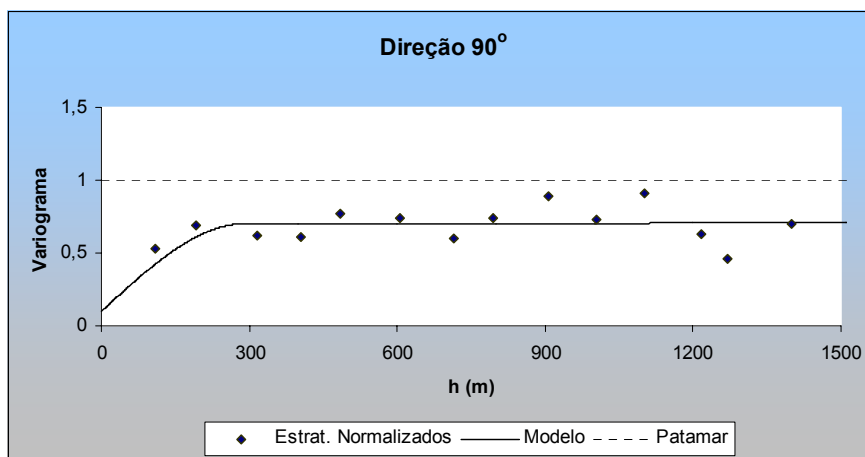


Figura 6.10- Variograma experimental dos dados normalizados a 90° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

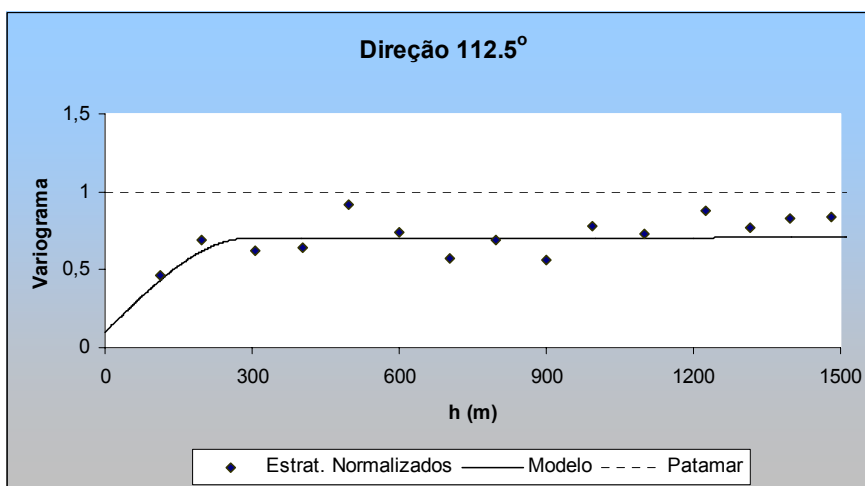


Figura 6.11- Variograma experimental dos dados normalizados a 112,5° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

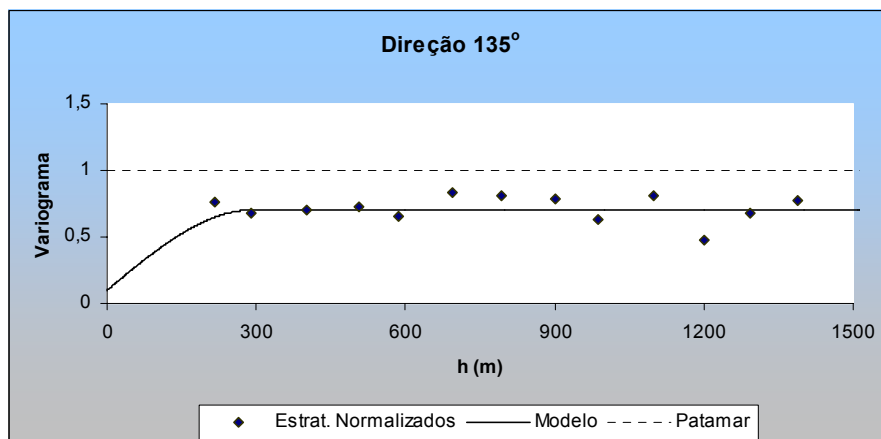


Figura 6.12- Variograma experimental dos dados normalizados a 135° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

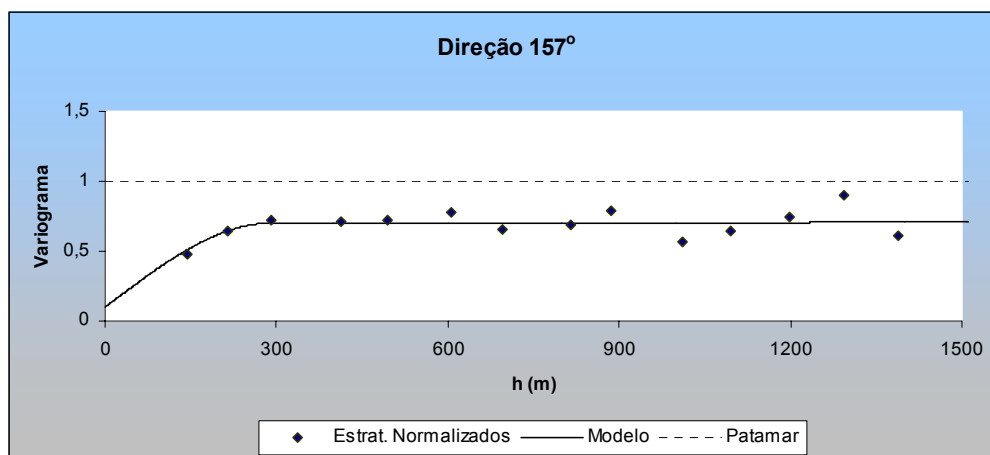


Figura 6.13- Variograma experimental dos dados normalizados a 157,5° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

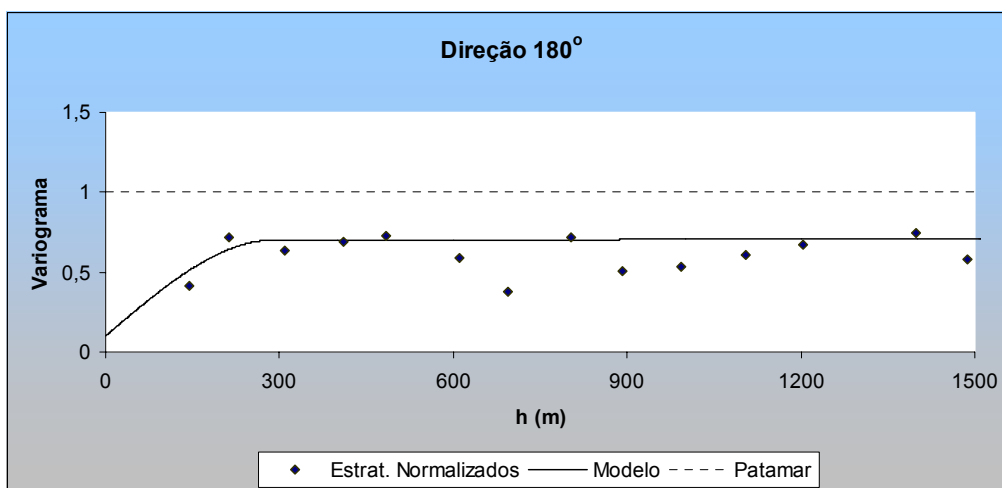


Figura 6.14- Variograma experimental dos dados normalizados a 180° (direção azimutal), mergulho 0° e seu modelo.

A função variograma ajustada para os variogramas estratigráficos normalizados pode ser escrita da seguinte forma:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 0,1 + 0,6 \times \text{Sph}\left(\frac{h_{\text{azimute}90^\circ}}{290}, \frac{h_{\text{azimute}0^\circ}}{290}, \frac{h_{\text{dip}90^\circ}}{2,5}\right) + 0,3 \times \text{Sph}\left(\frac{h_{\text{azimute}90^\circ}}{100000}, \frac{h_{\text{azimute}0^\circ}}{100000}, \frac{h_{\text{dip}90^\circ}}{100}\right)$$

(6.1)

### **6.2.1 Teste de Binormalidade**

Os dados originais normalizados são usados, durante a simulação seqüencial Gaussiana, como variáveis de operações matemáticas. Os resultados dessas operações devem ser variáveis que também possuem distribuição normal (Gaussiana), do contrário, as hipóteses necessárias para utilização do modelo multiGaussiano não estão sendo obedecidas.

Um teste de multinormalidade verifica se operações matemáticas de qualquer ordem, usando qualquer par ou combinação dos dados normalizados, resultam em valores de uma distribuição normal. Porém, é difícil achar um teste para assegurar todas essas possibilidades, visto que existem muitas funções matemáticas de qualquer ordem e muitos pares ou combinações de dados normalizados. Portanto, um teste de binormalidade é possível e suficiente, em casos como o apresentado neste trabalho, já que verifica o uso de pares dos dados normalizados em operações matemáticas até a segunda ordem.

Um exemplo de teste de binormalidade é verificar se a relação a seguir é verdadeira:

$$\frac{M(\mathbf{h})}{\sqrt{\gamma(\mathbf{h})}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cong 0,564$$

(6.2)

onde:

$\gamma(\mathbf{h})$  = variograma para distância  $h$ ;

$M(\mathbf{h})$  = madograma para distância  $h$ .

O madograma pode ser descrito como segue:

---

$$M(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n |(Z_i - Z_{i+h})|$$

(6.3)

onde:

N= número de pares a uma distância h;

h= distância entre amostras;

n= número de amostras;

$Z_i$ = valor da i-ésima amostra;

$Z_{i+h}$ = valor da amostra separada de  $Z_i$  por um vetor h.

Se o teste de binormalidade for aceito, a simulação sequencial Gaussiana prossegue. A Tabela 6.1 mostra que o teste de binormalidade é aceitável para os dados de vagarosidade de onda acústica normalizados.

### **6.2.2 Etapas da Simulação Sequencial Gaussiana**

O algoritmo de simulação seqüencial Gaussiana gera distribuições acumuladas em cada ponto que será simulado. Essa distribuição é condicionada pelos valores das amostras e dos nós previamente simulados, por isso, essa distribuição é chamada na língua inglesa de *conditional cumulative distribution function* (ccdf), que significa função de distribuição acumulada condicional. A média e a variância da ccdf são parâmetros suficientes para definir essa distribuição, por isso, a simulação seqüencial Gaussiana é caracterizada como um algoritmo de simulação paramétrico (Isaaks, 1990).

Tabela 6.1- Resultados do teste de binormalidade.

M(h)	$\gamma(h)$	$\sqrt{\gamma(h)}$	$\frac{M(h)}{\sqrt{\gamma(h)}}$
0,34449	0,46583	0,683	0,505
0,45821	0,75924	0,871	0,526
0,41192	0,62031	0,788	0,523
0,42208	0,64298	0,802	0,526
0,45468	0,73341	0,856	0,531
0,42491	0,65601	0,810	0,525
0,42400	0,65158	0,807	0,525
0,44443	0,68948	0,830	0,535
0,45398	0,72107	0,849	0,535
0,43409	0,65821	0,811	0,535
0,45862	0,72643	0,852	0,538
0,43432	0,65924	0,812	0,535
0,46036	0,72559	0,852	0,540
0,44488	0,68488	0,828	0,538
0,45565	0,70561	0,840	0,542
0,46509	0,73646	0,858	0,542
0,47001	0,73827	0,859	0,547
0,47343	0,75971	0,872	0,543
0,47345	0,74678	0,864	0,548
0,47958	0,76955	0,877	0,547
0,46704	0,73002	0,854	0,547
0,47475	0,76773	0,876	0,542
0,48217	0,77245	0,879	0,549
0,48731	0,79404	0,891	0,547
0,47977	0,77246	0,879	0,546
0,46953	0,73553	0,858	0,547
0,48001	0,78149	0,884	0,543
0,47304	0,74678	0,864	0,547
0,49493	0,82105	0,906	0,546
0,46885	0,73657	0,858	0,546

A média da ccdf corresponde ao valor resultante da krigagem simples<sup>2</sup> em cada nó a ser simulado, enquanto a variância da ccdf corresponde à variância de krigagem nesse nó. A simulação seqüencial Gaussiana compreende as seguintes etapas:

- i. normalização dos dados e verificação da multinormalidade ;

---

<sup>2</sup> Segundo Deutsch e Journel (1998) a krigagem simples é a mais recomendada. Apenas nos casos em que existe um grande número de amostra nas vizinhanças de busca é que outros tipos de krigagem são indicados. Caso outros tipos de krigagem que consideram não-estacionaridade da média forem utilizados, a teoria da sGs exige que a variância de krigagem simples seja utilizada na estimativa da variância da ccdf (Goovaerts, 1997).



- ii. definição de um caminho aleatório, onde cada local não amostrado  $u_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) (onde  $N$  é o número de pontos, células ou blocos do *grid* a ser simulado) é visitado apenas uma vez;
- iii. construção de um modelo de incerteza (ccdf) em cada local  $u_j$  – condicional as  $n$  informações experimentais e aos nós previamente simulados localizados na vizinhança de busca de  $u_j$ ;
- iv. simulação pelo sorteio aleatório de um valor da variável aleatória  $Y(u_j)$  da ccdf (simulação Monte Carlo<sup>3</sup>), resultando em  $y^{(l)}(u_j)$  ( $l = 1, \dots, L$ ) (onde  $L$  é o número de realizações a serem gerados);
- v. inclusão do valor  $y^{(l)}(u_j)$  no banco de dados, representando uma informação condicional adicional para ser usada nas seguintes localizações a serem visitadas;
- vi. repetição dos estágios (ii) a (iv) até que uma simulação seja associada a cada nó de *grid*;
- vii. retro-transformação dos valores simulados no espaço normal para o espaço original.
- viii. repetição das etapas (i) a (v) para gerar  $L$  realizações equiprováveis da variável aleatória  $Y$ .

O efeito de suavização dos algoritmos de krigagem ocorre devido à “falta” do componente de erro ou resíduo, o que não ocorre na simulação seqüencial Gaussiana onde esse erro é adicionado (Deutsch e Journel, 1998):

$$y^{(l)}(\mathbf{u}_j) = Z^*(\mathbf{u}_j) + r^{(l)}(\mathbf{u}_j) \tag{6.4}$$

onde:

$y^{(l)}(u_j)$  = valor simulado no nó  $u_j$ ;

---

<sup>3</sup> Pode-se definir a simulação Monte Carlo como um método de simulação que gera números randômicos  $U$ , dentro do intervalo  $[0,1]$ . Essa simulação foi desenvolvida durante a segunda guerra mundial quando foi utilizado no desenvolvimento da bomba atômica (Law e Kelton, 1991).

---

$Z^*(u_j)$ = estimativa de krigagem no local  $u_j$ ;

$r^{(l)}(u_j)$ = valor de erro simulado no nó  $u_j$ .

A inclusão do valor  $y^{(l)}(u_j)$  no banco de dados, representando uma informação condicional adicional para ser usada nas seguintes localizações a serem visitadas, garante a reprodução da covariância entre todos valores simulados.

### **6.2.3 Resultados da Simulação Seqüencial Gaussiana**

Cada realização forma um *grid* de 2205450 pontos (65 nós na direção leste-oeste x 58 nós na direção norte-sul x 585 nós na direção vertical). O espaçamento do *grid* é 50 x 50 x 0,5 m orientado na direção leste-oeste, norte-sul e na direção vertical, respectivamente. O modelo do *grid* foi definido com a origem (canto inferior esquerdo) na posição 654175 m, 7443375 m e -66,25 m (coordenadas leste, norte e vertical, respectivamente).

Os parâmetros de busca usados para a simulação foram parecidos com aqueles usados na krigagem, contudo um parâmetro foi adicionado na simulação seqüencial Gaussiana: o número máximo de nós previamente simulados para usar na simulação do próximo nó. O número máximo estabelecido neste caso foi igual a 8 nós.

O uso de nós previamente simulados para a simulação do próximo nó, pode impor dificuldades na reprodução de continuidade espacial de larga escala, visto que cada simulação é fortemente influenciada pelo grande número de nós próximos previamente simulados (Deutsch e Journel, 1998). Devido a esse motivo, uma importante implementação denominada múltiplo *grid* é empregada pelo algoritmo de simulação. A utilização de múltiplo *grid* gera primeiro um *grid* grosseiro (estrutura espacial de grande escala), seguida pela simulação de um *grid* com uma malha menos espaçada, preenchendo valores dos nós remanescentes (continuidade espacial de pequena escala).

Devido a grande quantidade de amostras do banco de dados de vagarosidade de onda acústica e do grande número de nós simulados em cada realização, um grande esforço computacional é exigido para cada realização. Esse esforço se reflete no tempo necessário para o processamento dessas realizações. Esse tempo pode variar dependendo das características de cada computador. A Tabela 6.2 mostra características da CPU (Unidade Central de Processamento) de diferentes tipos de computadores, a fim de exemplificar o tempo de processo que uma realização desse estudo exige em cada tipo de computador.

**Tabela 6.2- Características técnicas de diferentes tipos de computadores e tempos de processamento.**

<b>Nome do computador</b>	<b>CPU</b>	<b>Tempo para uma realização (h)</b>
Luma	Silicon Graphics- Origin 2000 Processador- 64bits/ 1,25GHz RAM- 256Mb	~ 1h e 30min
Cindy	Silicon Graphics- Octane Processador- 64bits/ 1,23GHz RAM- 256Mb	~ 1h e 50min
Sharon	Silicon Graphics- O <sub>2</sub> Processador- 64bits/ 1,2GHz RAM- 64Mb	~ 4h e 15min
Grêmio	MD- Athlon XP1800 Processador- 32bits/ 1,5GHz RAM- 992Mb	~ 1h e 5min
Quintão	MD- K6II Processador- 32bits/ 500MHz RAM- 253Mb	~ 11h

Foram executadas 50 realizações durante a simulação seqüencial Gaussiana. Esse número de realizações foi considerado suficiente para o mapeamento da incerteza (Figura 6.15) das estimativas de vagarosidade de onda acústica, visto que, a variância das médias das realizações tornou-se praticamente estável após aproximadamente 15 realizações, assim como a esperança matemática das médias das realizações (Figura 6.16).

A Figura 6.17 apresenta o histograma dos valores das médias, no espaço normal, de cada realização. Este histograma mostra que as médias das realizações oscilam em torno de zero, como devem ser os resultados da simulação seqüencial Gaussiana. A Figura 6.18 apresenta o histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.

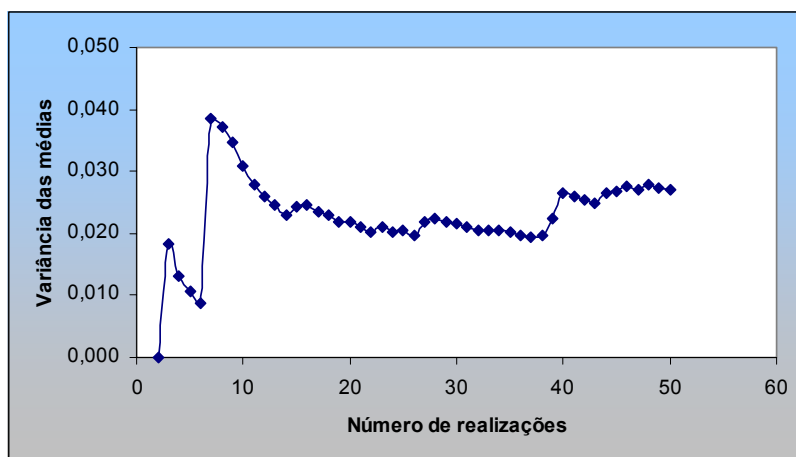


Figura 6.15- Variância das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).

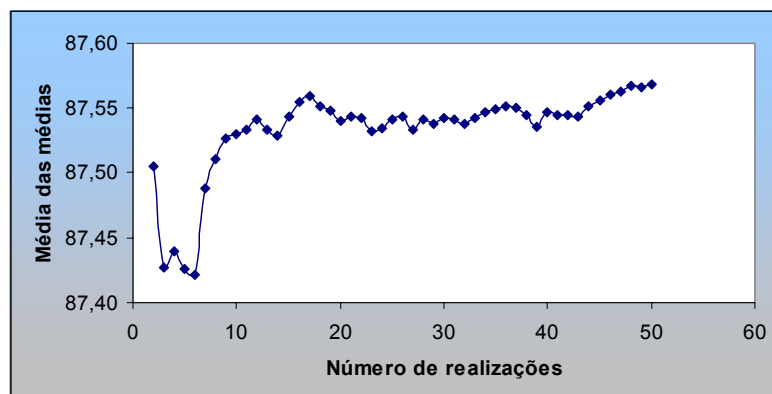


Figura 6.16- Média das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).

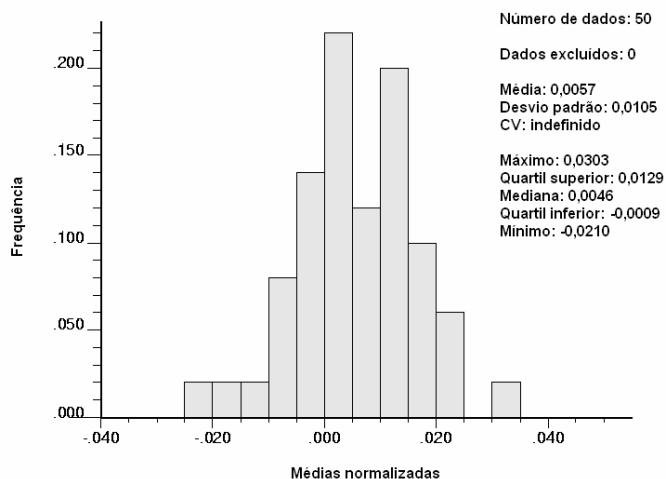


Figura 6.17- Histograma dos valores das médias das 50 realizações (espaço normal).

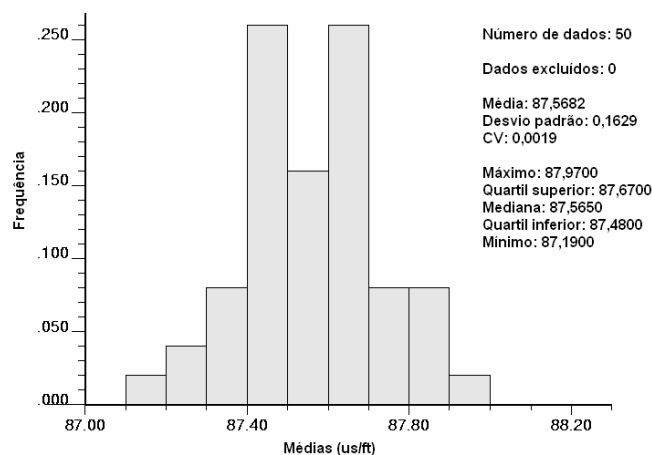


Figura 6.18- Histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.

A Figura 6.19 apresenta o histograma para os valores resultantes da realização com a menor média dos valores de vagarosidade de onda acústica. A Figura 6.20 apresenta o histograma para os valores resultantes da realização com a maior média dos valores de vagarosidade de onda acústica e a Figura 6.21 apresenta o histograma para os valores resultantes da realização com a média igual a mediana das médias das realizações executadas. Esses histogramas mostram uma distribuição semelhante à distribuição das amostras desagrupadas de vagarosidade de onda acústica, o que significa que os resultados das realizações reproduzem ergodicamente as estatísticas dos dados inseridos.

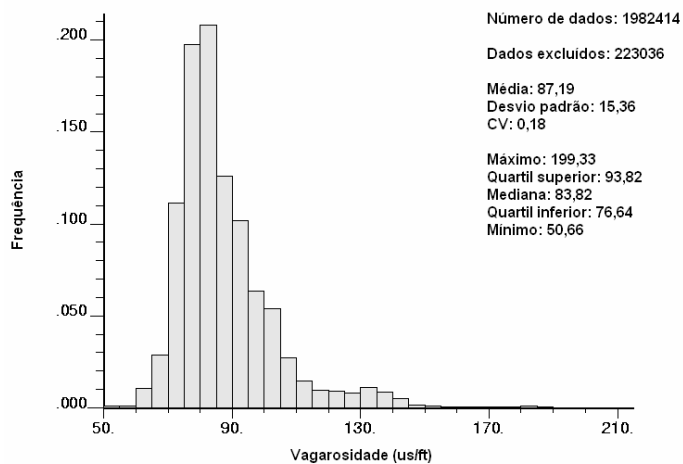


Figura 6.19- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a menor média.

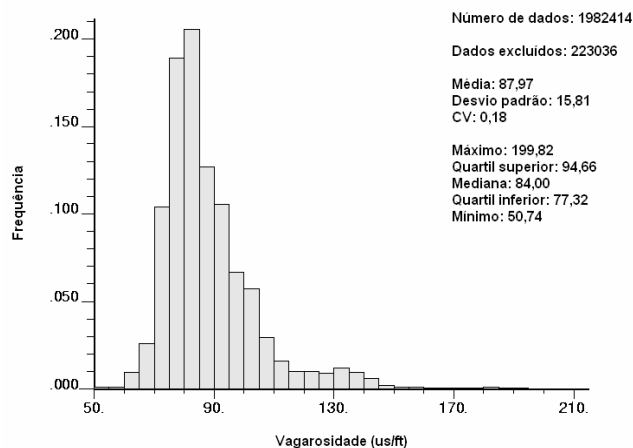


Figura 6.20- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a maior média.

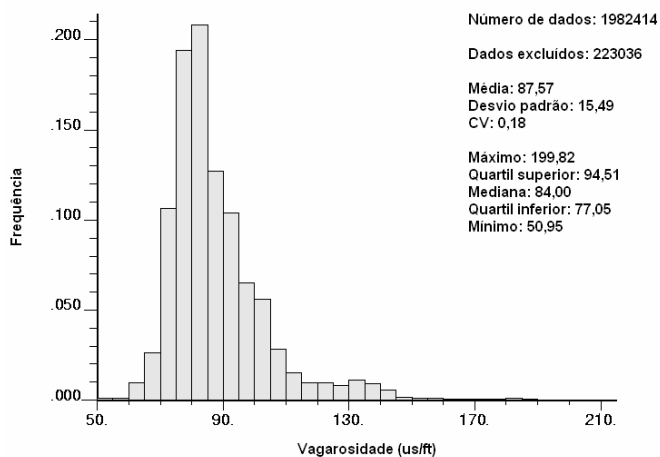


Figura 6.21- Histograma dos valores de vagarosidade de onda acústica resultantes da realização que apresentou a média igual a mediana das médias.

As Figuras 6.22 a 6.24 mostram seções, ao longo de várias direções, do *grid* resultante da realização que apresentou a menor média dos valores de vagarosidade de onda acústica. Para uma melhor visualização dos mapas de valores simulados, blocos de 50 x 50 x 0,5 m orientados na direção leste-oeste, norte-sul e na direção vertical, respectivamente, com os centros nos nós de *grid* simulados, foram construídos. Essas figuras mostram que a simulação não possui o efeito de suavização que é característico dos algoritmos de krigagem. Ao invés disso, o mapa dos valores simulados apresenta um aspecto granular, baixa conectividade entre valores, conhecido como textura *pepper salt*.

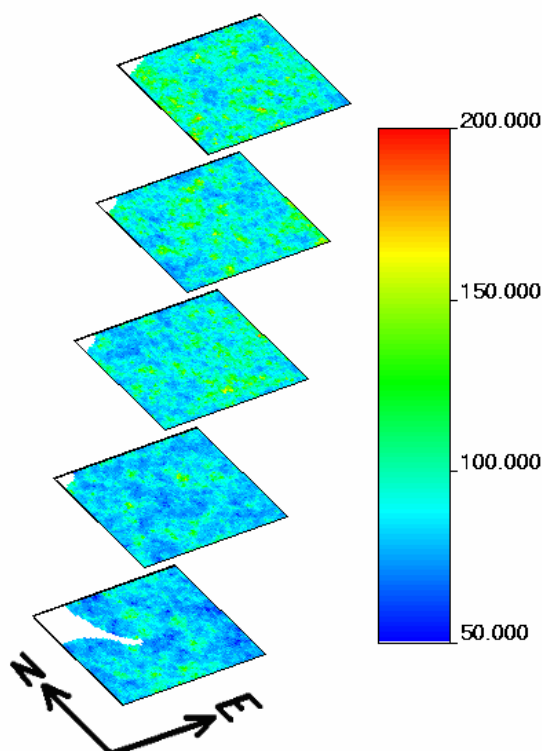


Figura 6.22- Seção horizontal (vista do plano XY) em várias elevações do *grid* resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

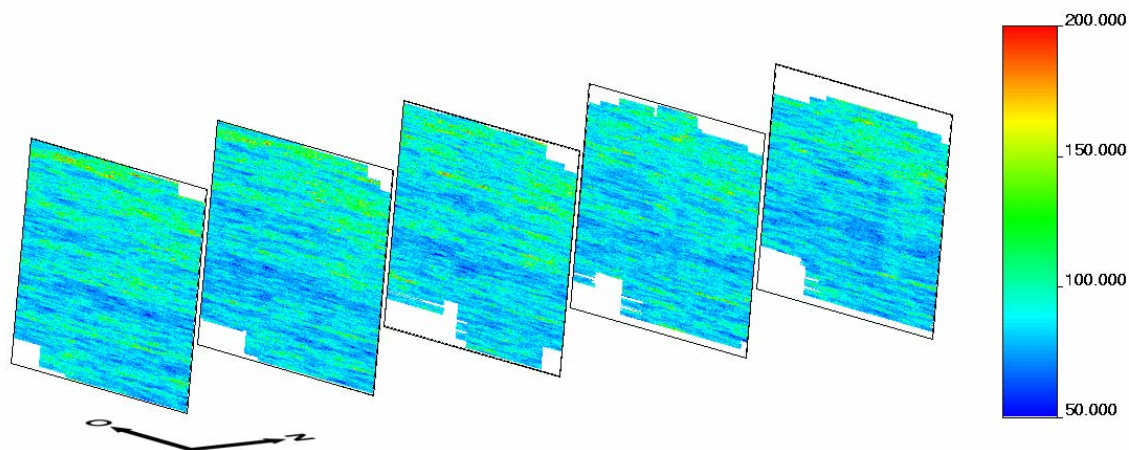


Figura 6.23- Seção vertical (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do *grid* resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

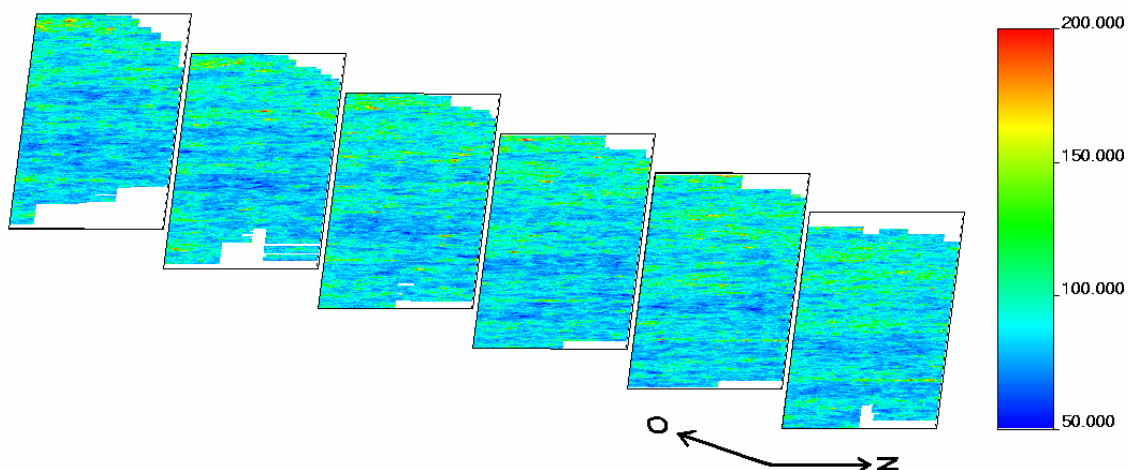


Figura 6.24- Seção vertical (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do *grid* resultante da realização 88 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

As Figuras 6.25 a 6.27 mostram seções, ao longo de várias direções, do modelo de blocos resultante da realização que apresentou a maior média dos valores de vagarosidade de onda acústica.



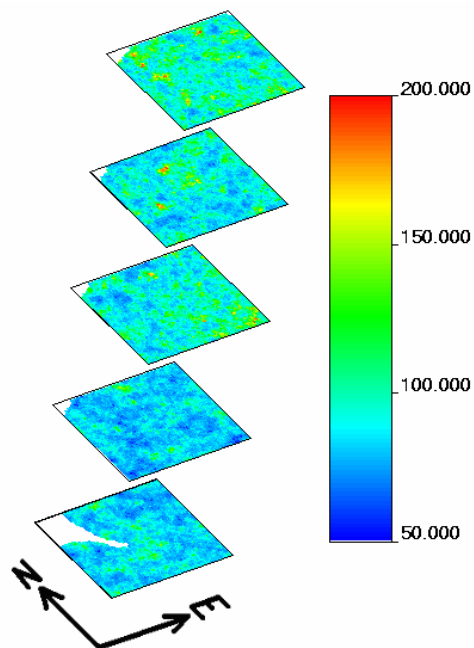


Figura 6.25- Seção horizontal (vista do plano XY) em várias elevações do *grid* resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

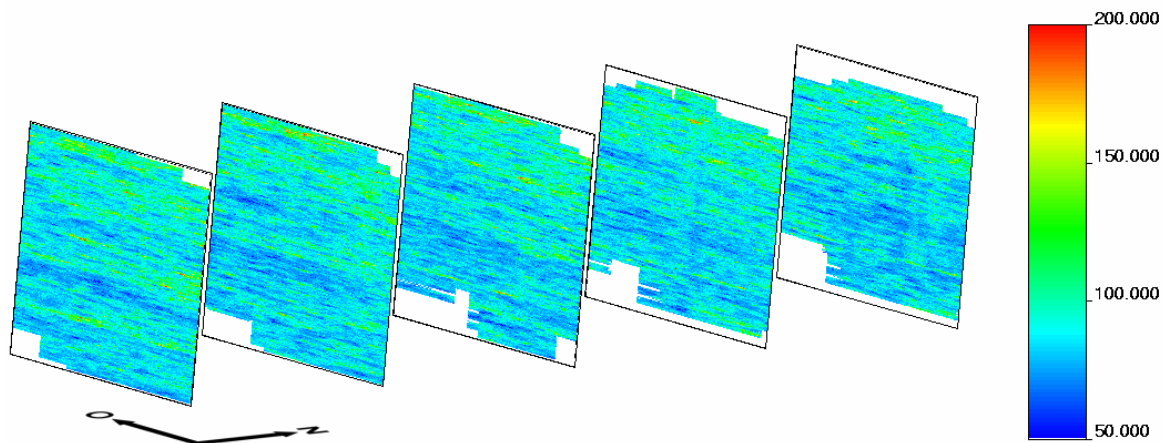


Figura 6.26- Seção vertical (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do *grid* resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

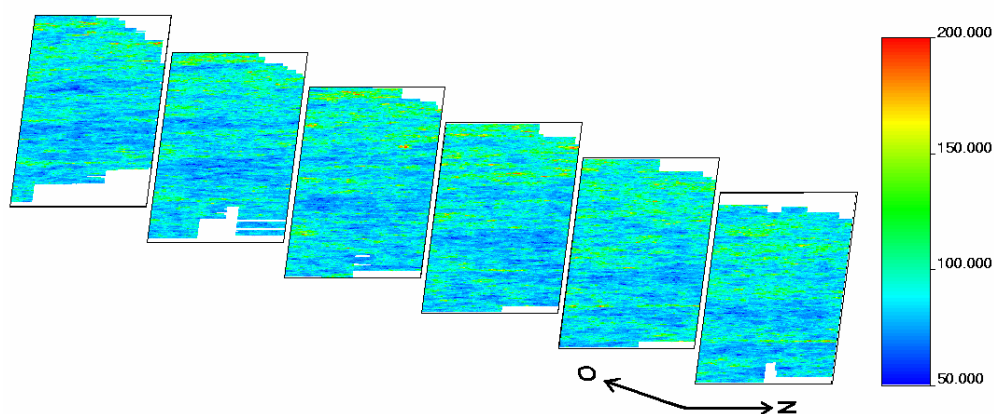


Figura 6.27- Seção vertical (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do *grid* resultante da realização 89 (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

### 6.2.3.1 Validação dos Variogramas

Depois da simulação ser realizada os variogramas das realizações devem ser comparados com os variogramas originais. Esse procedimento verifica se as realizações reproduziram apropriadamente a continuidade espacial do atributo de interesse. As Figuras 6.28 a 6.37 mostram os variogramas obtidos para várias realizações na escala original e no espaço normal dos valores simulados em coordenadas estratigráficas.

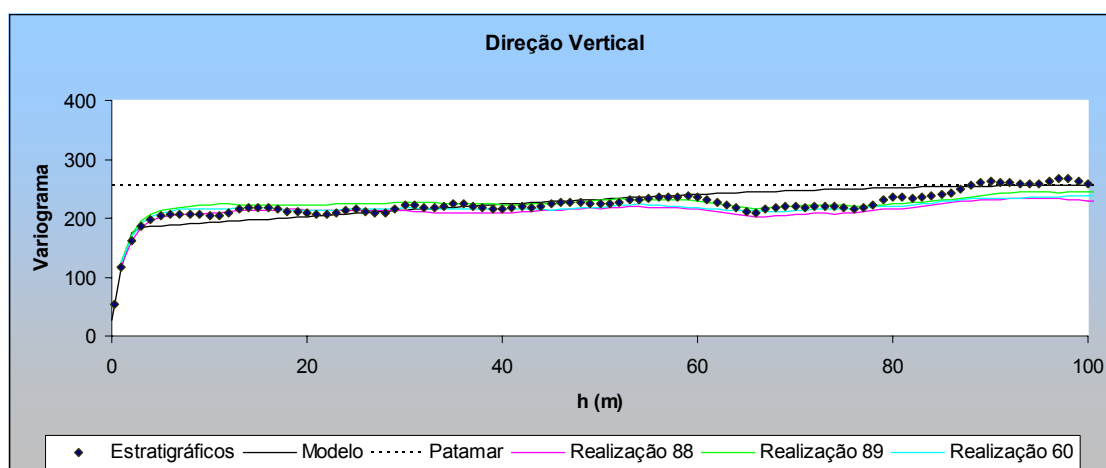


Figura 6.28- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção vertical.

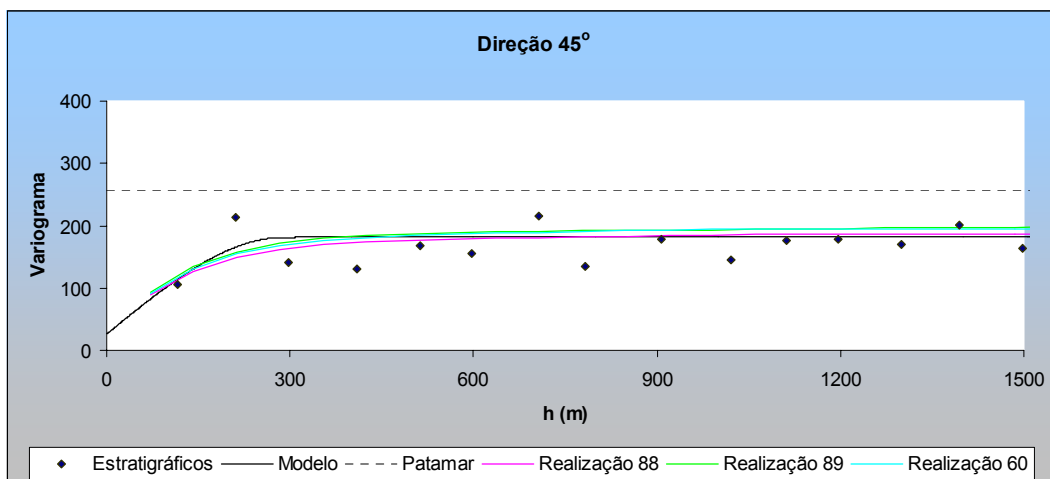


Figura 6.29- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 45°.

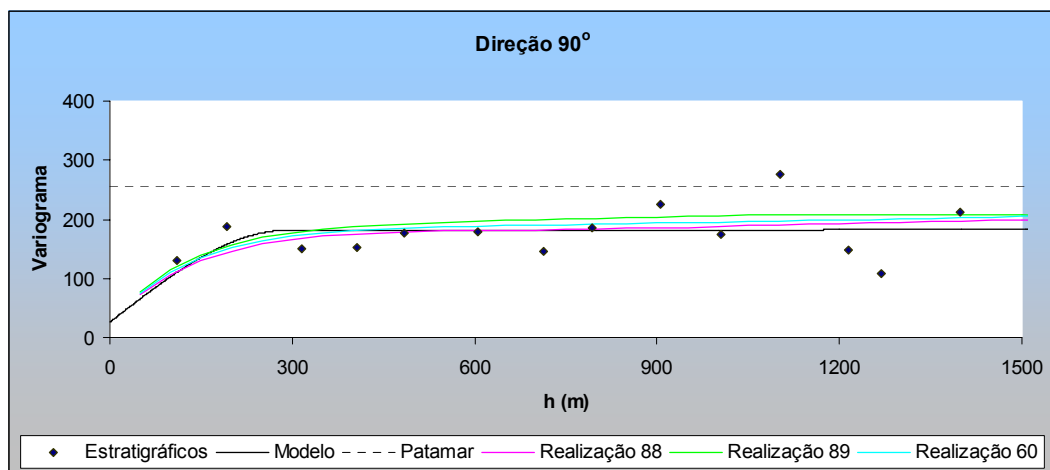


Figura 6.30- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 90°.

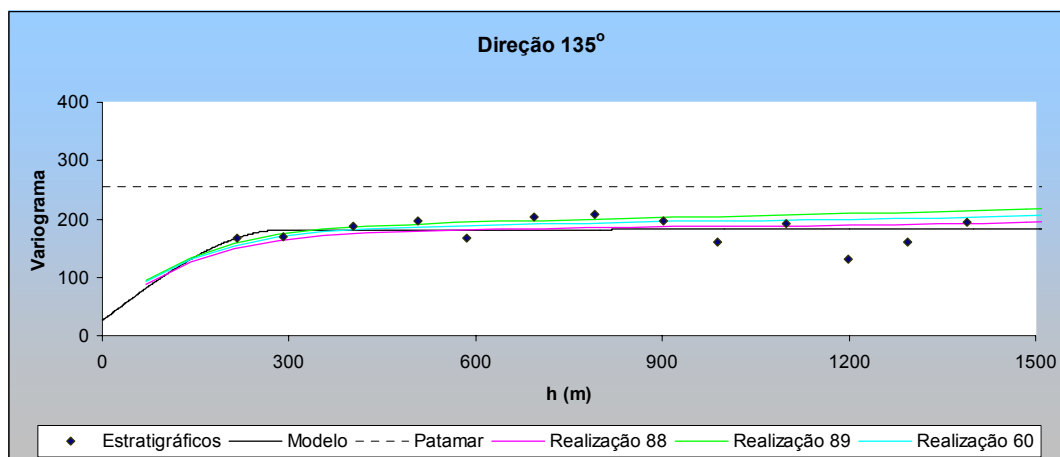


Figura 6.31- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 135°.

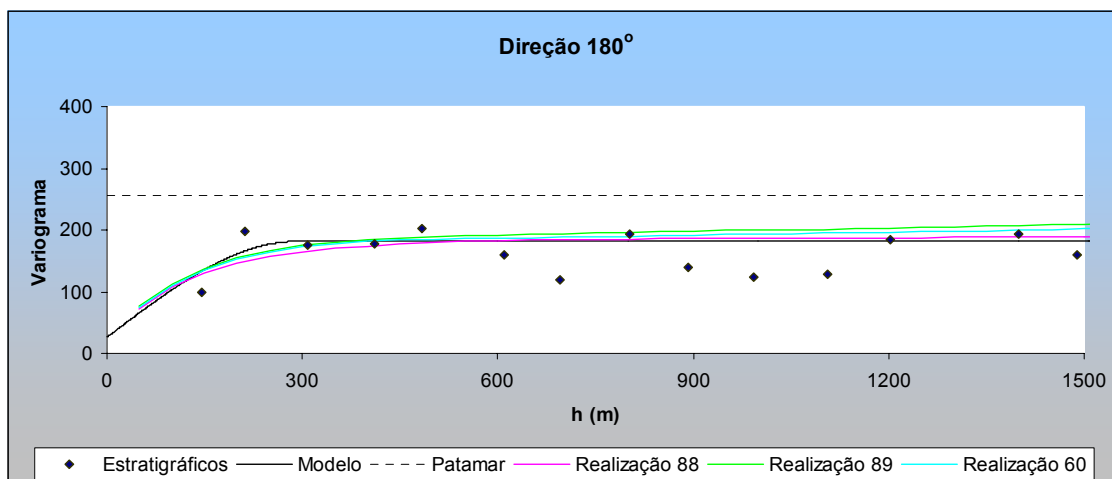


Figura 6.32- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 180°.

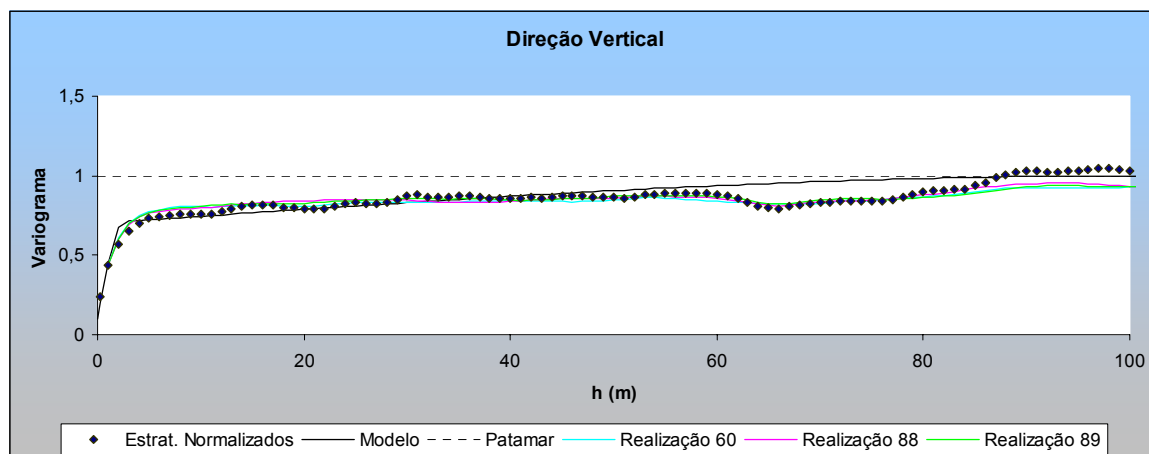


Figura 6.33- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção vertical. Dados normalizados.

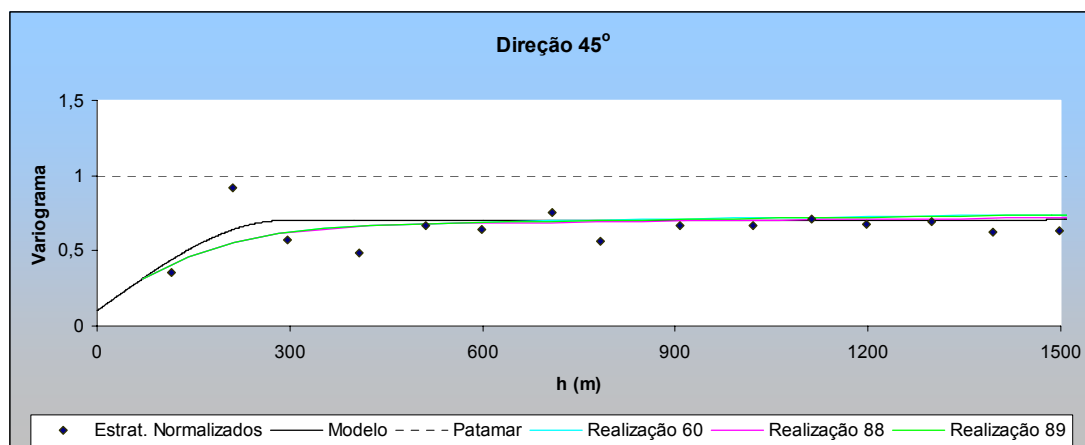


Figura 6.34- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 45°. Dados normalizados.

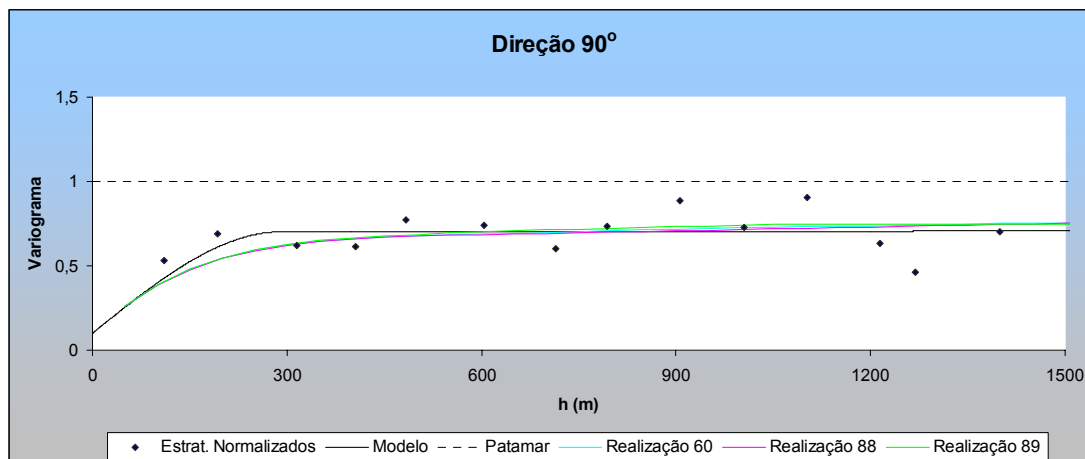


Figura 6.35- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 90°. Dados normalizados.

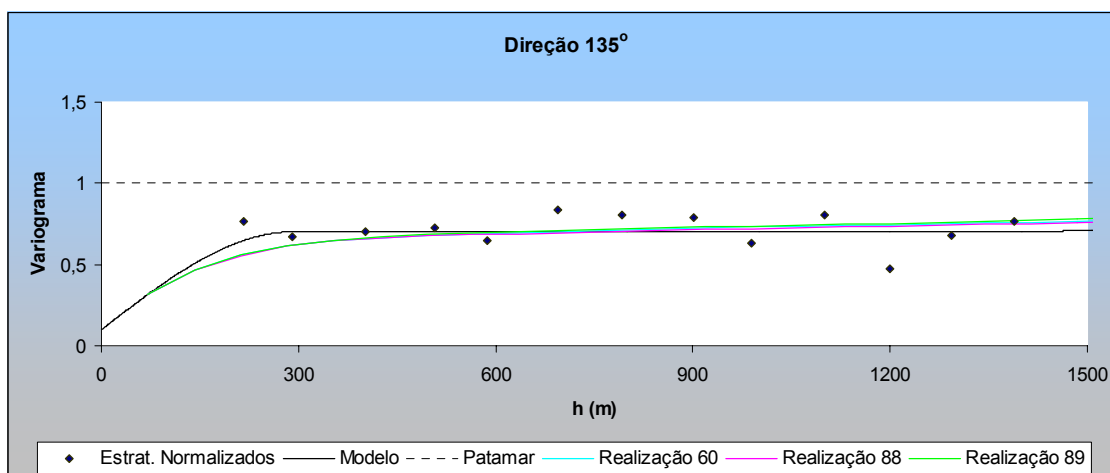


Figura 6.36- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 135°. Dados normalizados.

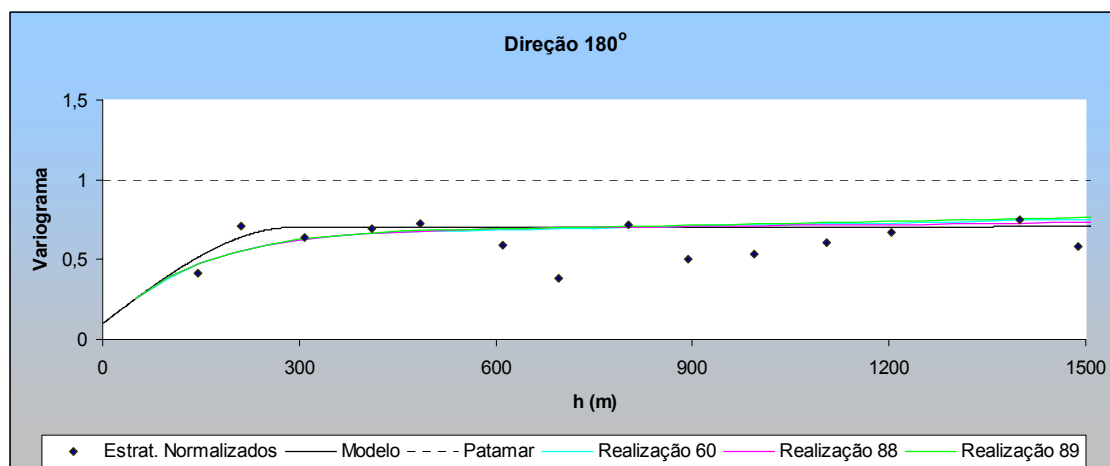


Figura 6.37- Variograma para múltiplas simulações (linhas coloridas), variograma experimental (pontos pretos) e seu modelo (linha preta), na direção azimutal de 180°. Dados normalizados.

## 6.2.4 Pós - Processamento

Cada realização (L) ou cenário gerado pelos algoritmos de simulação para um atributo qualquer, pode ser considerada o modelo da distribuição dos valores do atributo sobre a área em estudo, visto que, todos cenários são igualmente prováveis.

A média dos valores resultantes das diferentes realizações em um mesmo nó (E-type) (Deutsch and Journel, 1998), pode ser semelhante ao valor krigado neste nó, visto que estimativas de krigagem são utilizadas na simulação de cada valor. Aumentando o número de realizações, a semelhança entre a média dos valores simulados e o valor krigado também aumenta. A Figura 6.38 mostra o histograma para os valores E-type de todos nós simulados.

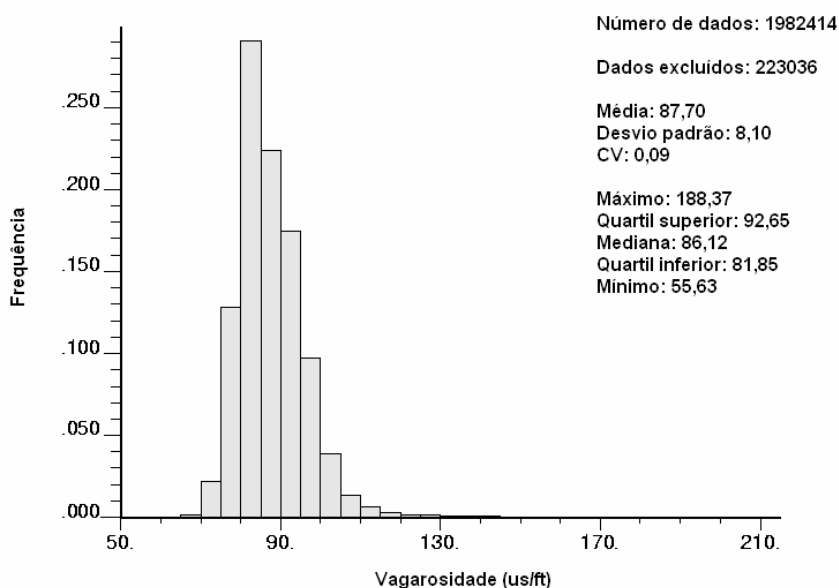


Figura 6.38- Histograma para os valores E-type de todos nós simulados.

As Figuras 6.39 a 6.41 mostram seções, ao longo de várias direções, do *grid* de valores de E-type resultantes da simulação. Essas figuras, também, mostram seções ao longo de várias direções do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados anteriormente (ver Capítulo 5), a fim de permitir a comparação entre os valores de E-type e os valores krigados. Os valores de E-type são muito parecidos com os valores krigados. Contudo, os valores de E-type seriam

mais parecidos com os valores de vagarosidade krigados por krigagem simples, visto que esse tipo de krigagem é o que foi utilizado na simulação dos valores de vagarosidade; enquanto que, para a krigagem desses valores foi realizada krigagem ordinária.

As diferenças entre valores de krigagem simples e krigagem ordinária possuem maiores magnitudes nas regiões afastadas dos locais amostrados. Nessas regiões, a krigagem simples atribui grande peso ao valor da média global ao contrário da krigagem ordinária, por isso, as maiores diferenças entre os valores de E-type e krigados, mostrados nessas figuras, encontram-se nas regiões mais afastadas das amostras, principalmente naquelas que apresentam altos valores de vagarosidade.

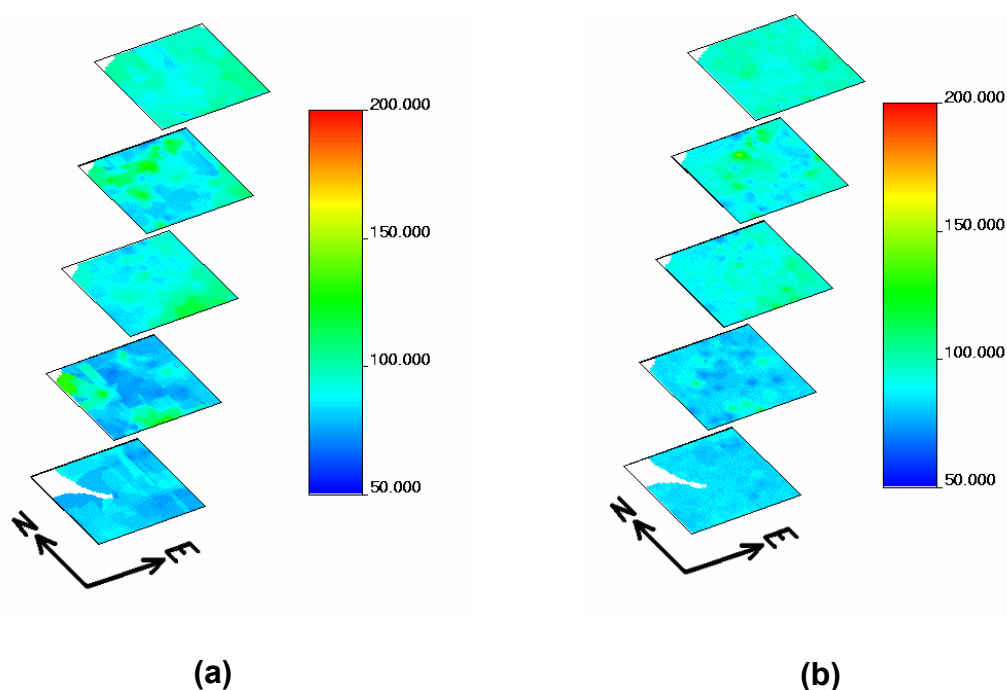
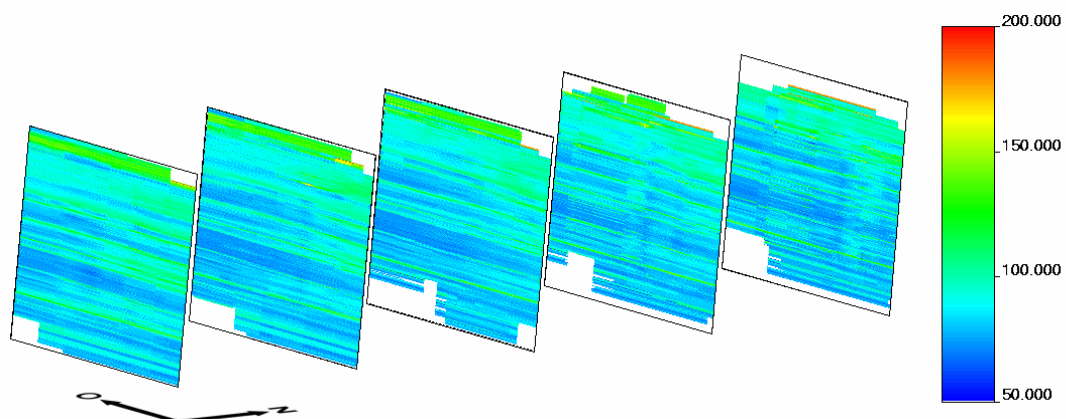
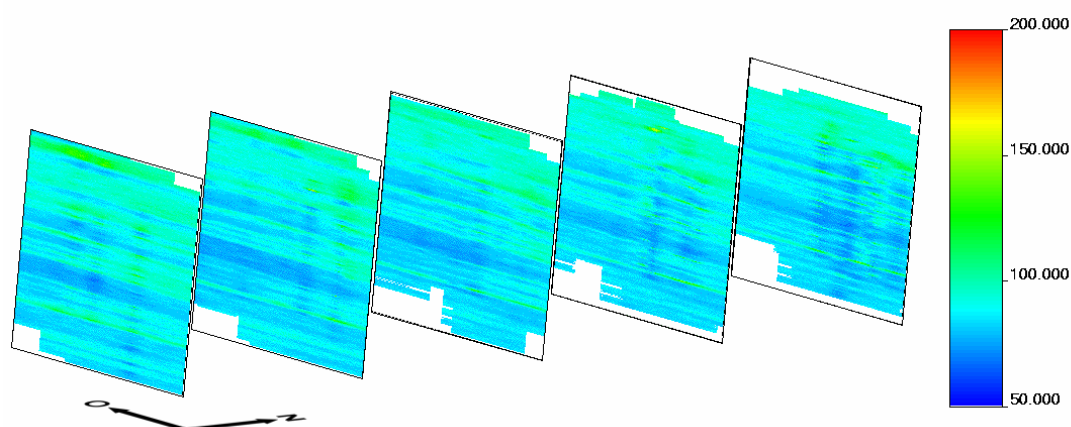


Figura 6.39- (a) Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.



(a)

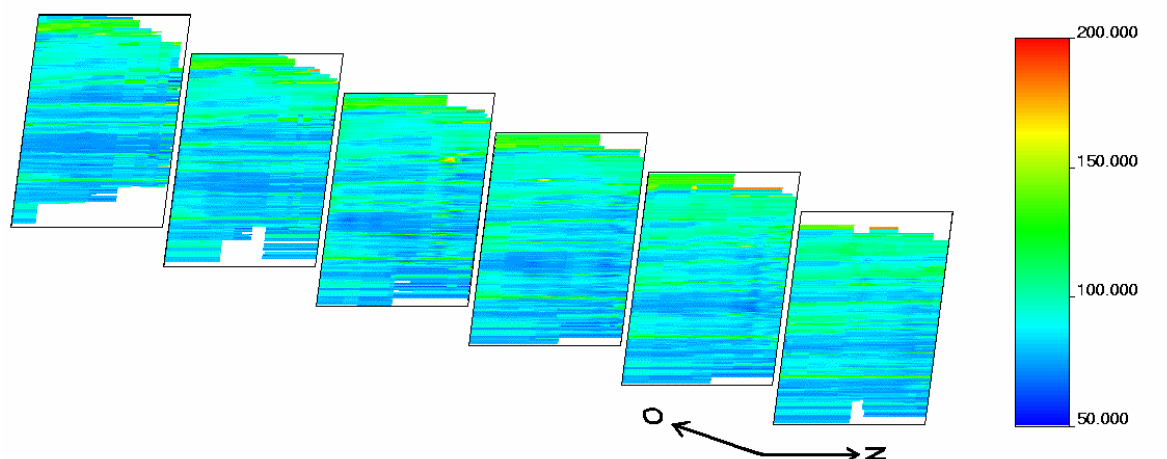


(b)

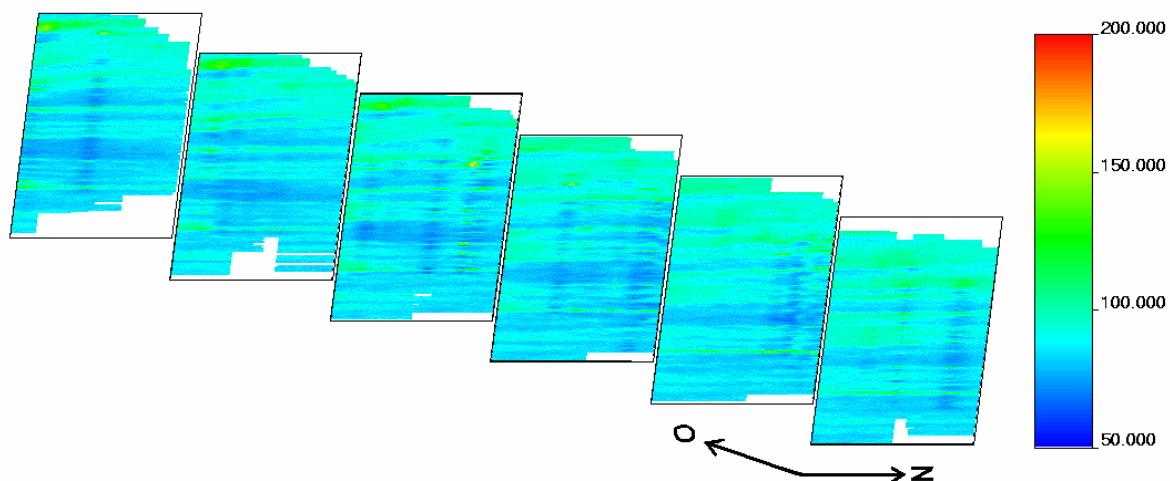
Figura 6.40- (a) Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) de várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos dos valores de vagarosidade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagarosidade de onda acústica.

Uma maneira de se medir a incerteza do valor E-type, em cada nó simulado, é com o desvio padrão condicional. O desvio padrão (Capítulo 4) mede o espalhamento de valores ao redor da média desses valores. A incerteza sobre o valor E-type, em cada nó simulado, é proporcional ao valor do desvio padrão dos valores simulados nesse nó.





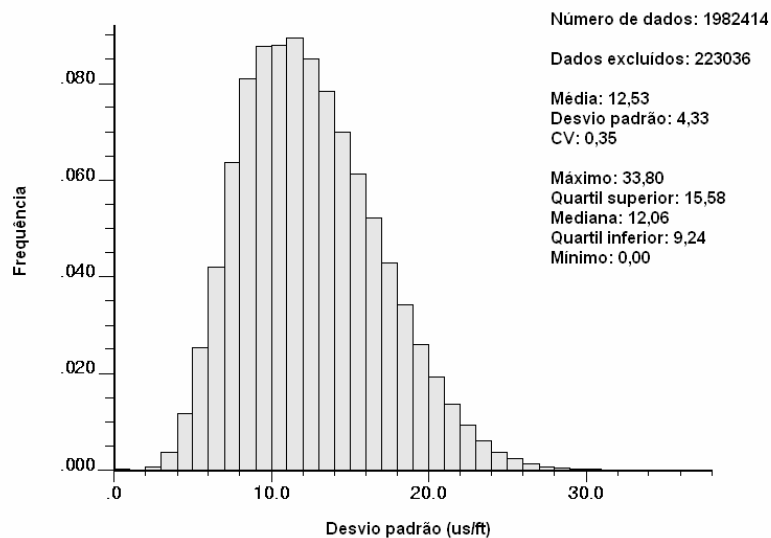
(a)



(b)

Figura 6.41- (a) Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos dos valores de vagariedade krigados (coordenadas estratigráficas). (b) Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do modelo de blocos das médias (E-type) resultantes da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de vagariedade de onda acústica.

A Figura 6.42 mostra o histograma para os valores de desvio padrão em cada nó simulado. Cada valor de desvio padrão foi calculado usando os valores resultantes das 50 realizações.



**Figura 6.42- Histograma para os valores de desvio padrão obtidos a partir dos resultados gerados pelas simulações em cada um dos nós simulados.**

As Figuras 6.43 a 6.45 mostram seções, ao longo de várias direções, do *grid* de valores de desvio padrão resultantes da simulação. Essas figuras mostram que os valores de desvio padrão são mais baixos próximos dos locais das amostras (machas azuis). Isto é esperado, visto que, as distribuições acumuladas condicionais, construídas próximas às amostras, possuem pequena variância (variância de krigagem), e assim, os valores sorteados não são muito diferentes do valor krigado (média estimada localmente), que por sua vez, é próximo do valor do dado amostral.

Analisando-se as seções do *grid* de valores simulados de desvio padrão, pode-se observar, também, que a maioria dos valores mais altos de desvio padrão encontram-se próximos das regiões onde, possivelmente, existem camadas de carvão (valores de vagarosidade de onda acústica próximos a  $123\mu\text{s}/\text{ft}$ ). A Figura 6.46 mostra uma seção do modelo de blocos de valores de vagarosidade de onda acústica obtidos por krigagem. As camadas com vagarosidades próximas a  $123\mu\text{s}/\text{ft}$  são facilmente identificadas. Na mesma seção, visualizada no *grid* de valores de desvio padrão resultantes da simulação de vagarosidade de onda acústica, nota-se a semelhança entre as posições de altos valores de desvio padrão e camadas com vagarosidade próximas a  $123\mu\text{s}/\text{ft}$ . Isso ocorre, principalmente, porque a variabilidade dos dados originais dentro das possíveis camadas de carvão é alta em relação à variabilidade (ver Figura 5.42) de todos valores de vagarosidade do banco

de dados. Essa alta variabilidade pode ser observada nos histogramas dos valores simulados para nós de *grid* próximos as regiões das possíveis camadas de carvão.

A Figura 6.47 mostra exemplo de histogramas de valores simulados para quatro nós de *grid* escolhidos entre os nós de mais altos valores de desvio padrão (próximos a  $30\mu\text{s}/\text{ft}$ ), os quais provavelmente pertencem a regiões próximas das camadas de carvão. A baixa variabilidade dos valores localizados fora dessas regiões é apresentada nos histogramas da Figura 6.48, os quais são histogramas de valores simulados para nós de *grid* escolhidos entre nós de baixos valores de desvio padrão (próximos a  $10\mu\text{s}/\text{ft}$ ).

O aumento de variabilidade entre valores simulados para um mesmo nó, também, é esperado em nós localizados em interfaces entre camadas geológicas que possuem diferentes valores característicos de vagarosidade de onda acústica. Nessas regiões, pode ter ocorrido a utilização de amostras de domínios geológicos diferentes (acima e abaixo do contato geológico) durante as simulações.

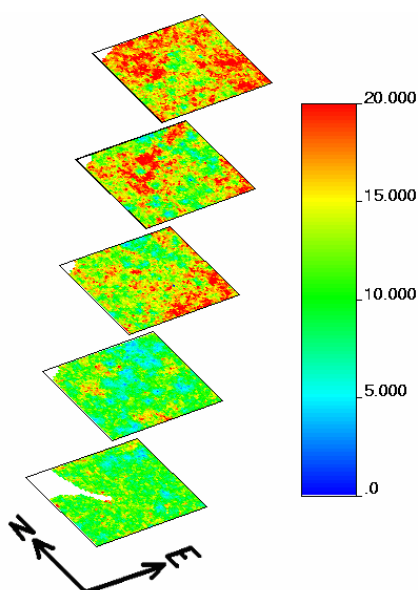


Figura 6.43- Seções horizontais (vista do plano XY) em várias elevações do *grid* dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão.

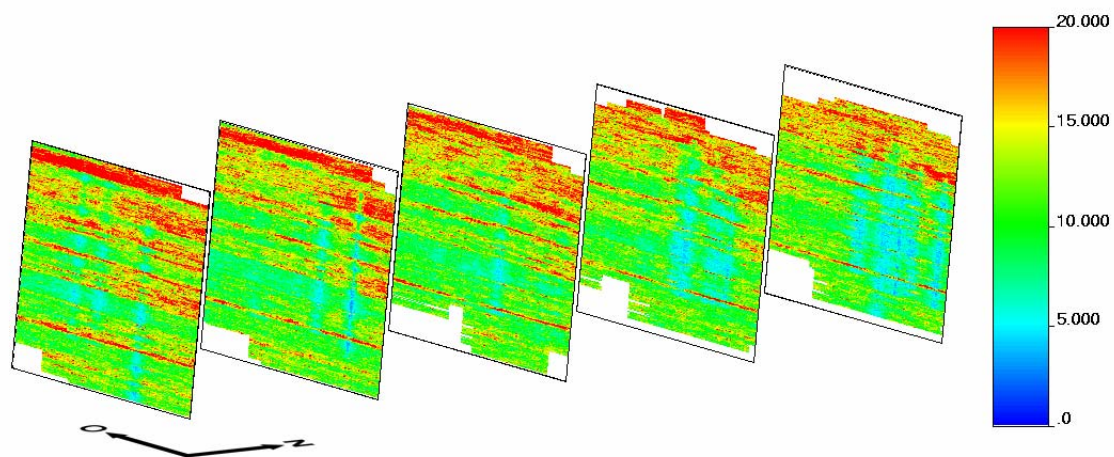


Figura 6.44- Seções verticais (vista do plano XZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção norte (Y) do *grid* dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão.

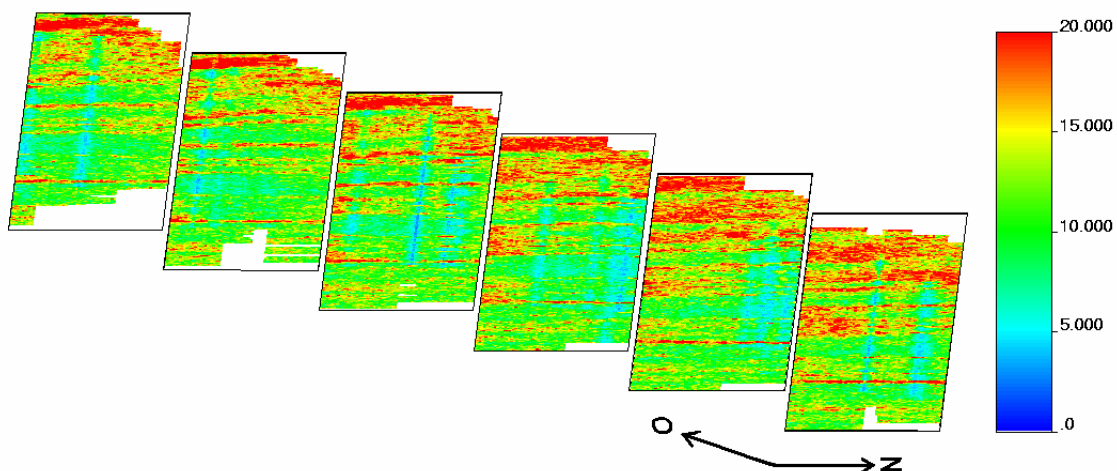


Figura 6.45- Seções verticais (vista do plano YZ com exagero vertical) em várias coordenadas na direção leste (X) do *grid* dos valores de desvio padrão resultante da simulação (coordenadas estratigráficas). Escala de cores representa valores de desvio padrão.

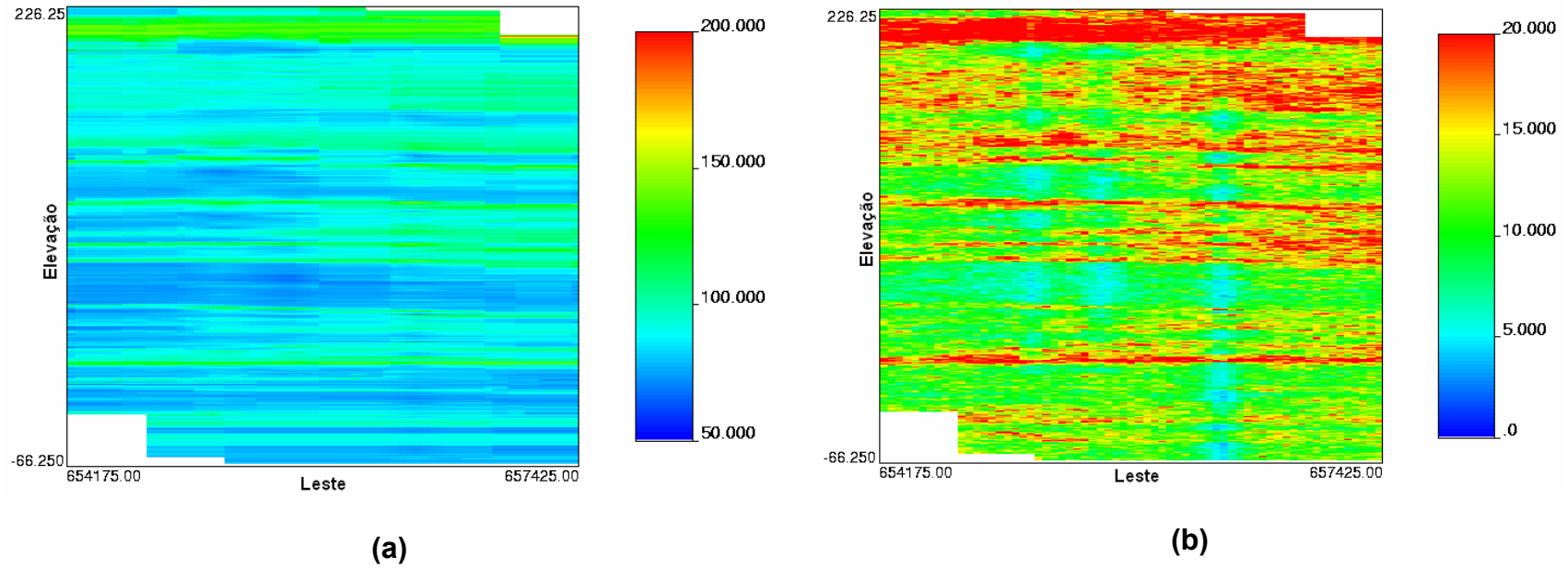
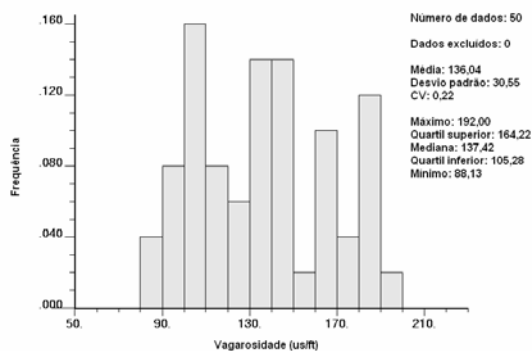
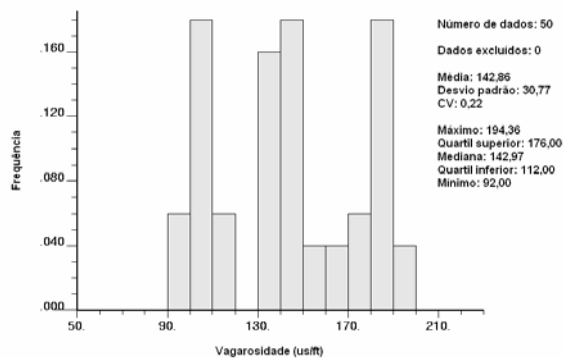


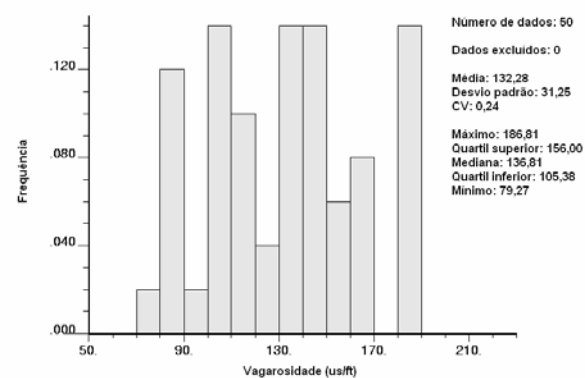
Figura 6.46- (a) Seção vertical (vista do plano XZ), na coordenada Y igual a 7443850 m, do modelo de blocos de valores de vagarosidade de onda acústica obtidos por krigagem (coordenadas estratigráficas). (b) Seção vertical (vista do plano XZ), na coordenada Y igual a 7443850, do *grid* de valores de desvio padrão resultantes da simulação de vagarosidade de onda acústica (coordenadas estratigráficas).



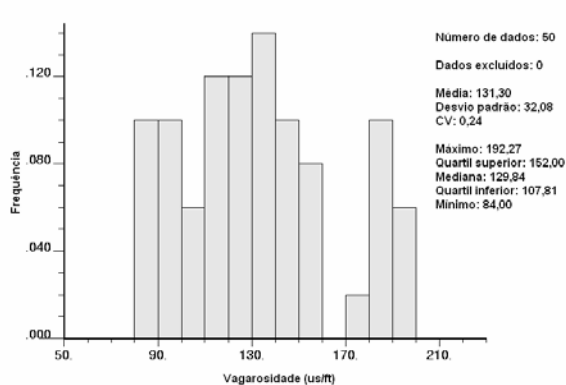
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.47- Histogramas de valores simulados para quatro nós de *grid* escolhidos entre os nós de mais altos valores de desvio padrão.

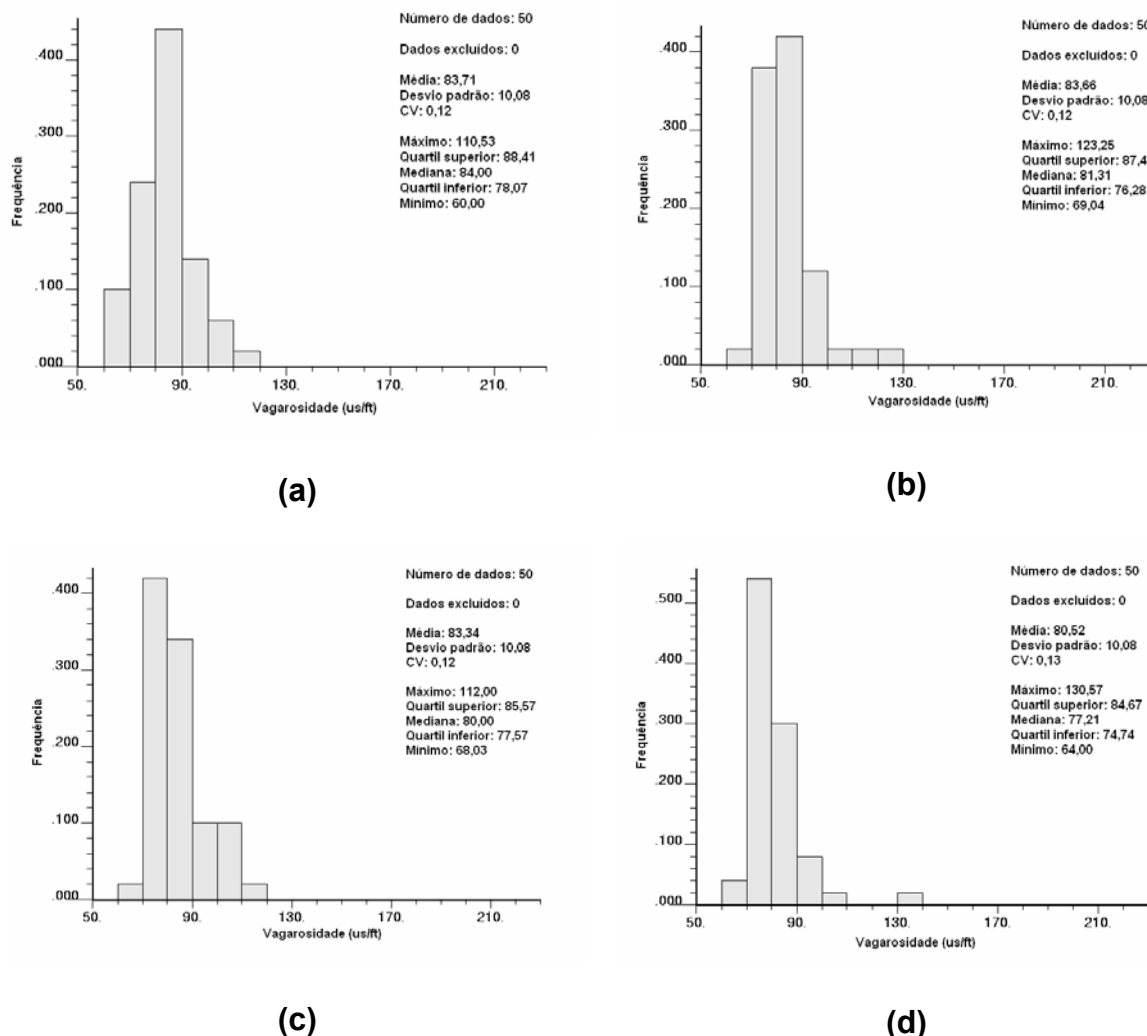


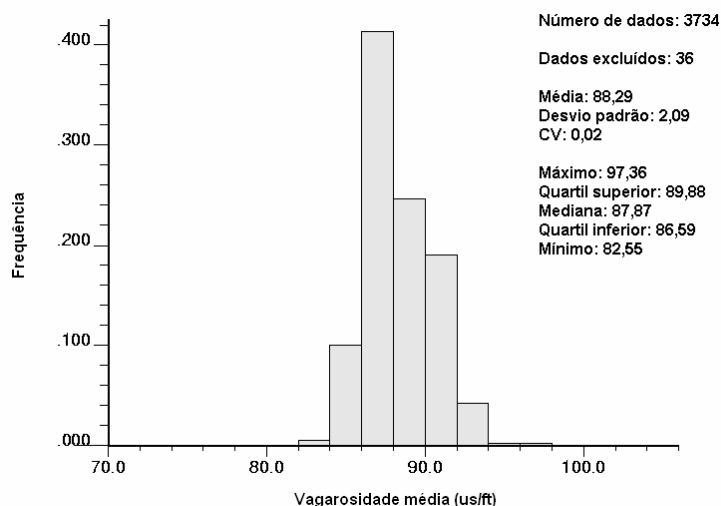
Figura 6.48- Histogramas de valores simulados para nós de *grid* escolhidos entre nós de baixos valores de desvio padrão (próximos a  $10\mu s/ft$ ).

### 6.3 Estimativa de Vagarosidade Média – Simulação Versus Krigagem

Na simulação tridimensional de valores de vagarosidade obtidos por perfilagem, assim como na krigagem tridimensional (ver Capítulo 5), os valores de vagarosidade média, em cada realização, são encontrados a partir da média aritmética dos valores de vagarosidade simulados em elevações superiores a elevação da camada de interesse, em cada “furo virtual”. O valor E-type dos valores de vagarosidade média em cada furo virtual pode ser considerado como a estimativa de vagarosidade média para cada “furo virtual”. Assim, o desvio padrão condicional

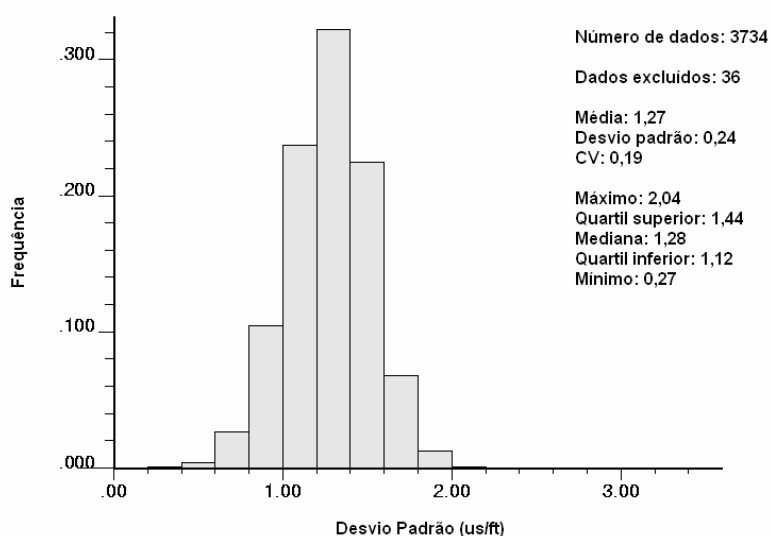
dos valores de vagarosidade média atribuídos para cada furo virtual é uma medida de incerteza da estimativa E-type de vagarosidade média.

A Figura 6.49 apresenta o histograma dos valores de vagarosidade média obtidos pela simulação tridimensional.



**Figura 6.49- Histograma dos valores de vagarosidade média obtidos pela simulação tridimensional.**

A Figura 6.50 apresenta o histograma dos valores de desvio padrão condicional das estimativas E-type de vagarosidade média.



**Figura 6.50- Histograma dos valores de desvio padrão condicional das estimativas E-type de vagarosidade média.**



A Figura 6.51 apresenta os mapas das estimativas de vagarosidade média obtidos pela krigagem ordinária e simulação seqüencial Gaussiana do atributo vagarosidade a partir de um *grid* tridimensional. A Figura 6.52 apresenta a correlação entre os valores obtidos por krigagem e simulação em cada nó de *grid* (posição de cada “furo virtual”).

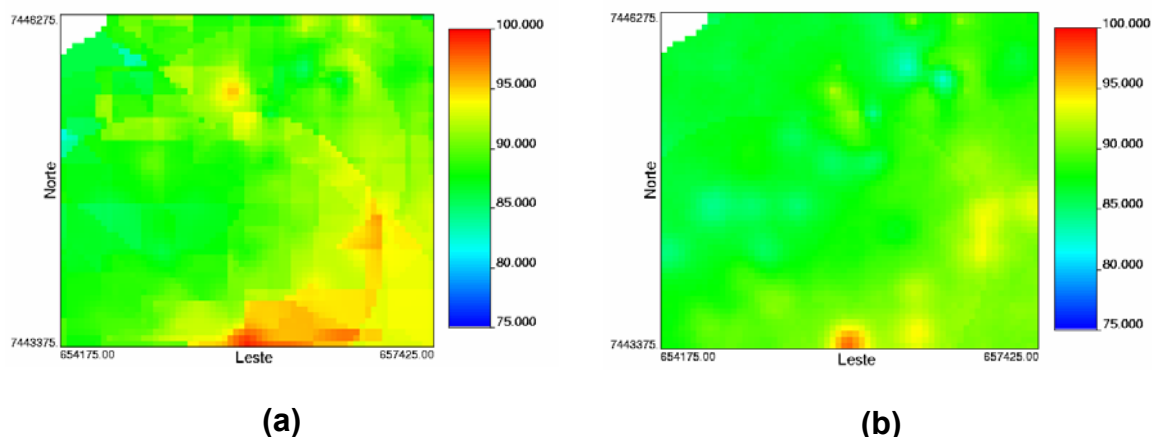


Figura 6.51- (a) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem. (b) Mapa das estimativas de vagarosidade média obtidas por simulação.

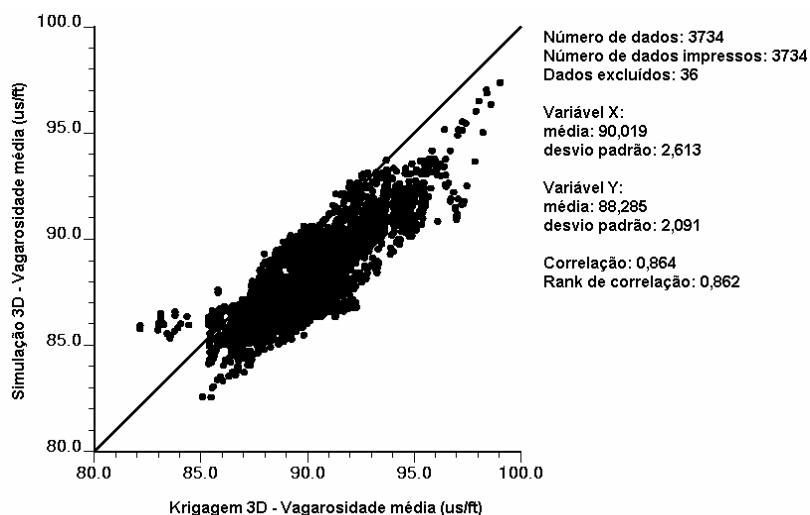
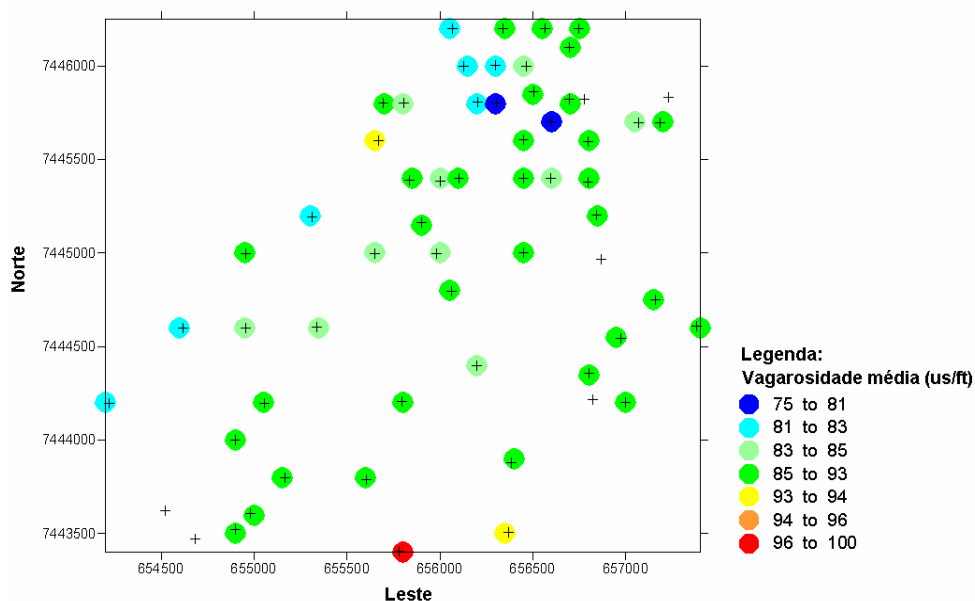


Figura 6.52- Correlação entre os valores obtidos por krigagem e simulação em cada nó de *grid*.

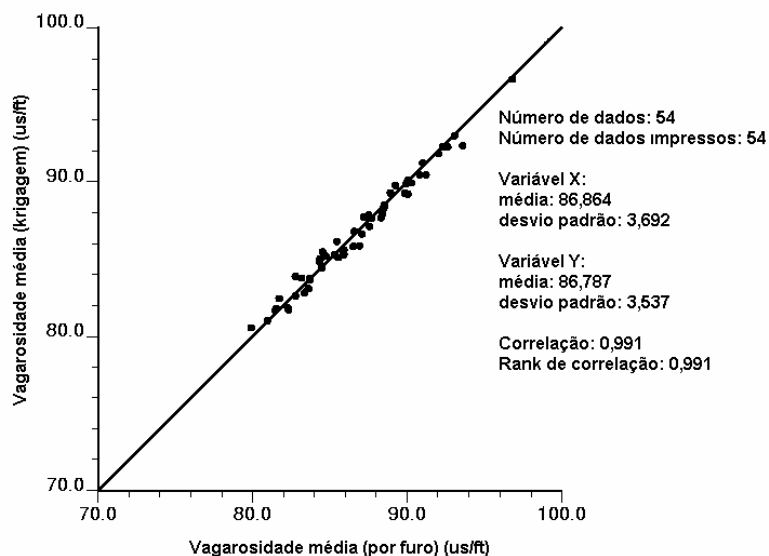
O gráfico de correlação entre os valores obtidos por krigagem e simulação mostra uma diferença nesses valores. Essa diferença provavelmente ocorreu pelo mesmo motivo que os valores E-type de vagarosidade de onda acústica em cada nó

do *grid* tridimensional não são exatamente iguais aos valores de vagarosidade krigados por krigagem ordinária no mesmo *grid* tridimensional (ver seção 6.2.4).

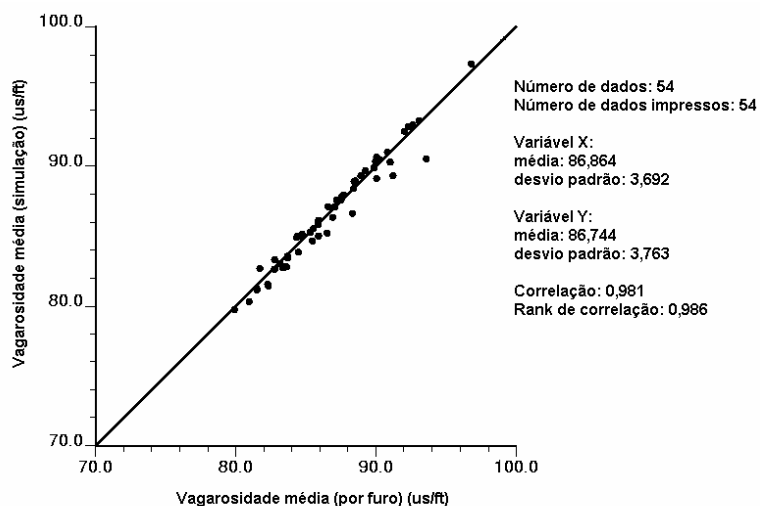
Foi realizada a comparação entre as estimativas de vagarosidade média obtidas por krigagem (3D) e simulação (3D) próximas aos furos perfilados e os valores de vagarosidade média em cada furo. Para efeito de comparação os valores estimados e simulados pertencentes a elevações superiores as elevações da última amostra (maior elevação), em cada furo perfilado, não foram consideradas no cálculo das vagarosidades médias. Os valores de vagarosidade média em cada furo perfilado foram comparados com os valores de vagarosidade média resultantes da krigagem e simulação mais próximos geometricamente. Para isso, uma interpolação usando os valores de vagarosidade média em cada furo e a técnica Nearest Neighbour (ver Capítulo 7) foi realizada (o raio de busca de cada ponto estimado foi limitado até 25 m). A Figura 6.53 mostra a posição original e a nova posição desses valores. Figuras 6.54 a 6.56 mostram as correlações entre os valores comparados.



**Figura 6.53- Posições originais dos valores de vagarosidade média de cada furo perfilado (marcadas com cruces) e a nova posição desses valores (marcadas com círculos coloridos).**

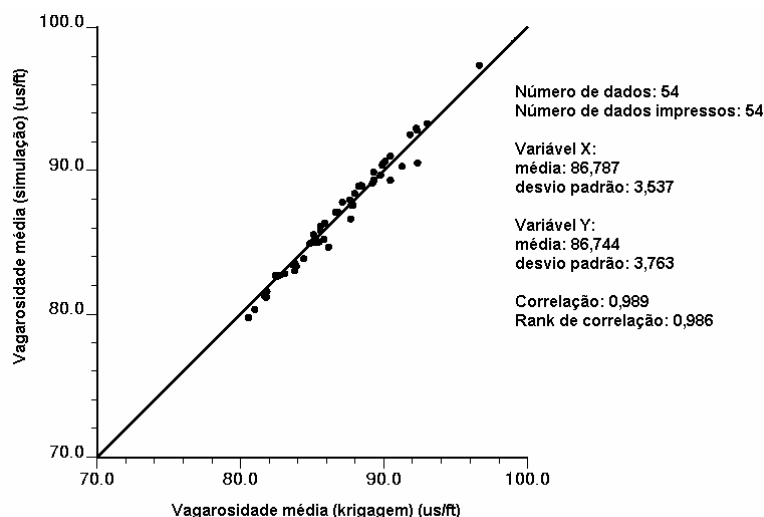


**Figura 6.54- Correlação entre os valores de vagarosidade média em cada furo perfilado e de vagarosidade média obtidos por krigagem tridimensional.**



**Figura 6.55- Correlação entre os valores de vagarosidade média em cada furo perfilado e de vagarosidade média obtidos por simulação tridimensional.**

A análise das Figuras 6.54 a 6.56 mostra que os valores de vagarosidade média obtidos por krigagem e simulação, nas regiões próximas aos furos, são muito parecidos entre si e com os valores de vagarosidade média em cada furo, o que não exclui nenhum dos métodos para obtenção de estimativas de vagarosidade média, apesar da diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos nas regiões mais distantes das amostras.



**Figura 6.56- Correlação entre os valores de vagarosidade média obtidos por krigagem tridimensional e de vagarosidade média obtidos por simulação tridimensional.**

Assim, tanto as estimativas de vagarosidade média de onda acústica obtidas por krigagem ordinária como as obtidas por simulação seqüencial Gaussiana podem ser consideradas eficientes (próximas aos valores reais). Contudo, devido a possibilidade da simulação seqüencial Gaussiana fornecer medidas de incerteza mais confiáveis para os valores de vagarosidade média estimados em cada “furo virtual”, esse algoritmo deve ser utilizado nos casos em que se almeja a obtenção de valores de vagarosidade média de onda acústica e incerteza desses valores, como é o caso desse estudo.

## **6.4 Considerações Finais**

Nesse capítulo, foram apresentados os resultados da simulação seqüencial Gaussiana tridimensional dos dados de vagarosidade de onda acústica utilizando elevação em coordenadas estratigráficas. Os valores de vagarosidade média, em cada realização, foram encontrados a partir da média aritmética dos valores de vagarosidade simulados em elevações superiores a elevação da camada de interesse, em cada “furo virtual”. O valor E-type de vagarosidade média foi considerado a estimativa de vagarosidade média em cada nó de *grid*. Após os resultados da simulação, uma comparação entre as estimativas de vagarosidade

média obtidas pelos algoritmos de krigagem ordinária e de simulação seqüencial Gaussiana foi apresentada, assim como, a escolha do algoritmo de simulação seqüencial Gaussiana para a obtenção dessas estimativas.

Após a escolha do algoritmo de simulação seqüencial Gaussiana para obtenção de valores de vagarosidade média, uma nova simulação utilizando todos parâmetros escolhidos ao longo do trabalho pode ser realizada para obtenção de estimativas finais de velocidade média de onda sísmica.

O próximo capítulo apresenta as estimativas de velocidade média obtidas com o uso das alternativas escolhidas e a incerteza associada a essas estimativas, assim como, o cálculo do Intervalo de Confiança de cada estimativa e a obtenção de valores de profundidade da camada de interesse ao longo da área em estudo.

## CAPÍTULO 7 - Estimativa Final e Intervalo de Confiança

Ao longo desse trabalho técnicas para obtenção de vagarosidade e velocidade média da onda acústica, que se propaga da superfície do terreno até a capa da camada de interesse, foram testadas. As alternativas escolhidas para maior acuracidade das estimativas foram: uso de simulação seqüencial Gaussiana, em um *grid* tridimensional, utilizando dados em coordenadas estratigráficas.

Esse capítulo apresenta as estimativas de velocidade média obtidas com o uso das alternativas escolhidas e a incerteza associada a essas estimativas, assim como, o cálculo do Intervalo de Confiança de cada estimativa. Também, é apresentado o procedimento para obtenção de valores de profundidade da camada de interesse ao longo da área em estudo. Os dados relacionados ao processamento sísmico apresentados nesse capítulo foram utilizados para ilustrar esse procedimento, estando sujeitos a modificações.

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos utilizando-se os *softwares* Surfer© (Anon, 2002), Hlstplt.exe, Declus.exe, Nscore.exe, Sgsim.exe, Postsim.exe e Pixelplt.exe, sendo os seis últimos pertencentes a biblioteca de programas de geoestatística GSLIB (Deutsch e Journel, 1998).

### **7.1 Estimativa Final**

Durante esse estudo verificou-se que uma maneira eficiente de obter-se valores de velocidade média (e o erro dessa estimativa), que uma onda acústica leva ao propagar-se da superfície do terreno até a capa de uma camada de interesse, é utilizar a técnica de simulação seqüencial Gaussiana, em um *grid* tridimensional e amostras com coordenadas estratigráficas. Também foi abordado o fato de que para a utilização dos valores de velocidade média de onda acústica no processo de

obtenção de profundidade da camada de interesse, utilizando dados de tempos de ondas sísmicas, os valores de velocidade de onda acústica deveriam ser transformados em valores de velocidade de onda sísmica. Por isso, a simulação seqüencial Gaussiana, estratigráfica e tridimensional, foi realizada utilizando dados de velocidade de onda sísmica obtidos com a transformação dos dados de vagarosidade resultantes da perfilagem acústica. A transformação dos dados de vagarosidade em dados de velocidade de onda sísmica foi obtida da seguinte maneira:

$$V_s = \frac{304800}{S} \cdot 0,925 \tag{7.1}$$

onde:

$V_s$ = velocidade de onda sísmica (m/s);

$S$ = vagarosidade de onda acústica ( $\mu$ s/ft).

A simulação seqüencial Gaussiana dos dados de velocidade de onda sísmica foi realizada com os mesmos parâmetros variográficos da simulação seqüencial Gaussiana dos dados de vagarosidade de onda acústica, visto que a continuidade espacial dos dados de vagarosidade normalizados e dos dados de velocidade normalizados é muito semelhante.

A Figura 7.1 apresenta o histograma dos dados de velocidade de onda sísmica obtidos pela equação 7.1. A Figura 7.2 apresenta o histograma desagrupado dos dados de velocidade de onda sísmica, obtido com os mesmos pesos de desagrupamento utilizados para os dados de vagarosidade de onda acústica, visto que a posição das amostras permanece a mesma. A Figura 7.3 apresenta o histograma dos dados normalizados de velocidade de onda sísmica.

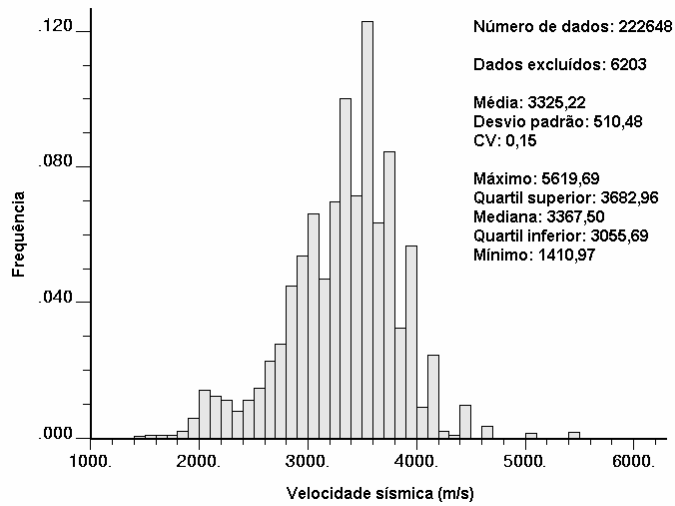


Figura 7.1- Histograma dos dados de velocidade de onda sísmica.

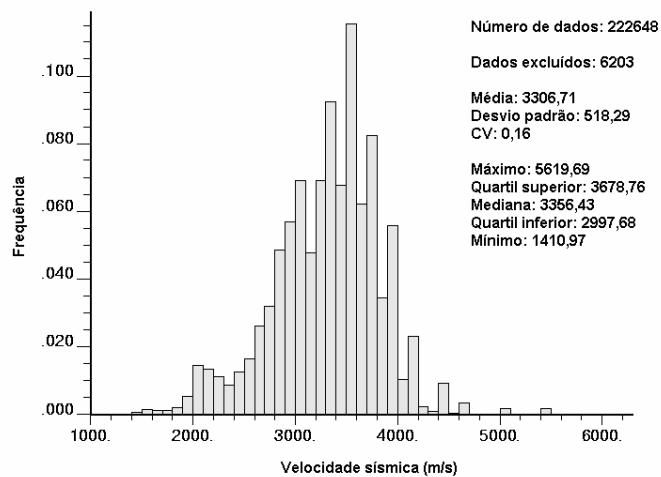


Figura 7.2- Histograma desagrupado dos dados de velocidade de onda sísmica.

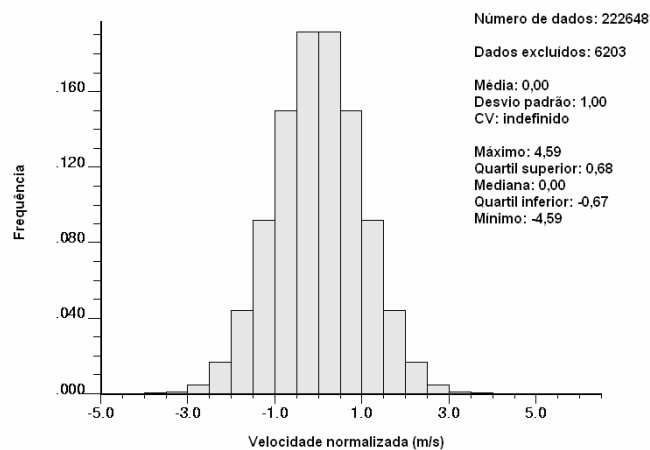


Figura 7.3- Histograma dos dados normalizados de velocidade de onda sísmica.



A simulação foi realizada no mesmo *grid* tridimensional utilizado para a simulação dos valores de vagarosidade de onda acústica apresentada no Capítulo 6. Foram executadas 20 realizações durante a simulação seqüencial Gaussiana. Esse número de realizações foi considerado suficiente para o mapeamento da incerteza (Figura 7.4) das estimativas de velocidade de onda sísmica, visto que a variância das médias das realizações tornou-se praticamente estável após 15 realizações, assim como a esperança matemática das médias das realizações (Figura 7.5).

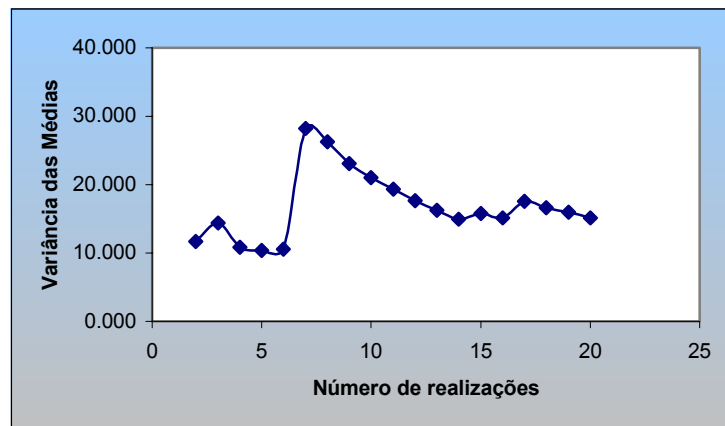


Figura 7.4- Variância das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).

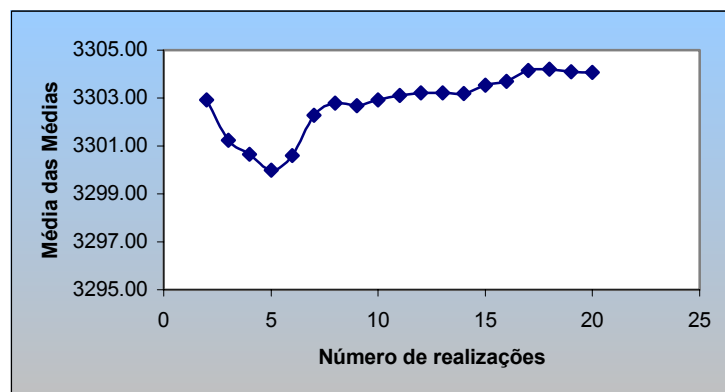


Figura 7.5- Média das médias das realizações com o aumento do número de realizações (espaço original).

A Figura 7.6 apresenta o histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.

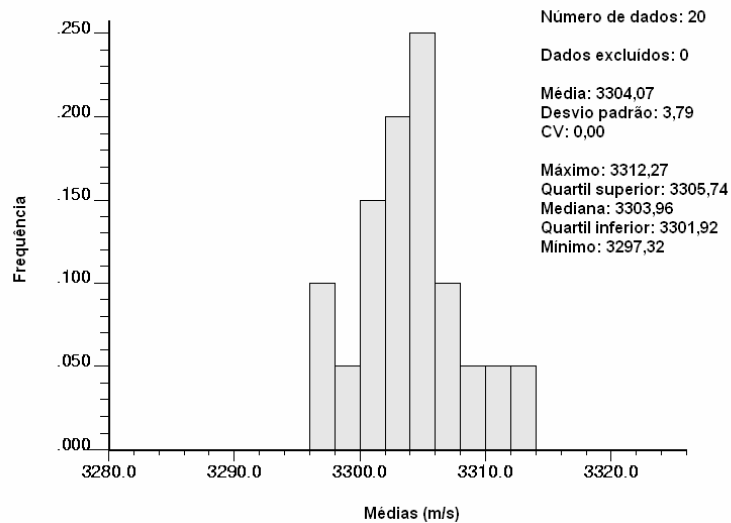


Figura 7.6- Histograma com os valores das médias das realizações no espaço original.

Os valores de velocidade média de onda sísmica em cada furo virtual, considerando dados de velocidade com elevações superiores a capa da camada GCWS, são considerados estimativas de velocidade média obtidos em cada uma das realizações. O valor E-type desses valores de velocidade média foi considerado a estimativa final de velocidade média para cada ponto do *grid* bidimensional, enquanto o desvio padrão condicional desses valores de velocidade média, encontrados para cada furo virtual, pode ser usado como uma medida de incerteza da respectiva estimativa.

Contudo, os valores de velocidade média de onda sísmica devem considerar a propagação da onda a partir de um datum sísmico (ver anexo B - Correções Estáticas), considerado pelos valores de tempo obtidos pela sísmica, até a camada de interesse. O datum sísmico utilizado no levantamento sísmico, realizado na região em estudo, foi estabelecido na elevação de 2200 metros. A falta de valores de velocidade de onda sísmica em nós de *grid* próximos a elevação 2200m ocorre devido a falta de amostras próximas a essas elevações, visto que o início dos furos perfilados acompanha a superfície do terreno, a qual nem sempre alcança a elevação do datum. Por isso, valores de velocidade devem ser atribuídos a esses nós. Esses valores de velocidade devem ser os mesmos valores inferidos durante a correção dos valores de tempo em relação ao datum sísmico. Os valores de velocidade sísmica atribuídos a esses nós foram todos iguais a 3500 m/s.

Devido ao desnível dos furos perfilados alguns valores de velocidade são estimados acima da superfície topográfica, esses valores foram substituídos pela velocidade 3500 m/s a fim de concordar com as correções utilizadas para os tempos sísmicos. A superfície topográfica foi construída por triangulação dos valores de elevação da superfície em cada furo perfilado e delimitou o *grid* de velocidade.

A Figura 7.7 apresenta o mapa dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico, enquanto a Figura 7.8 apresenta o mapa dos valores de desvio padrão condicional desses valores de velocidade média de onda sísmica. A Figura 7.9 apresenta o histograma dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico, enquanto a Figura 7.10 apresenta o histograma dos valores de desvio padrão condicional desses valores de velocidade média de onda sísmica.

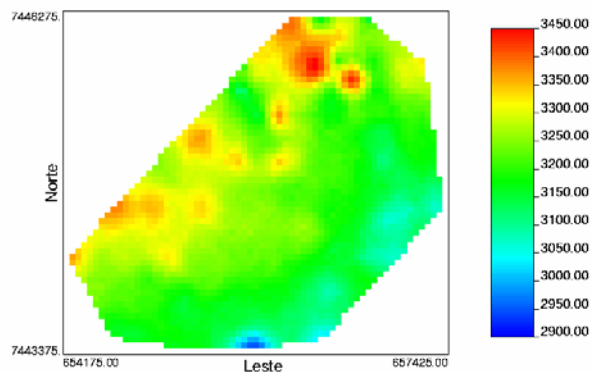


Figura 7.7- Mapa dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.

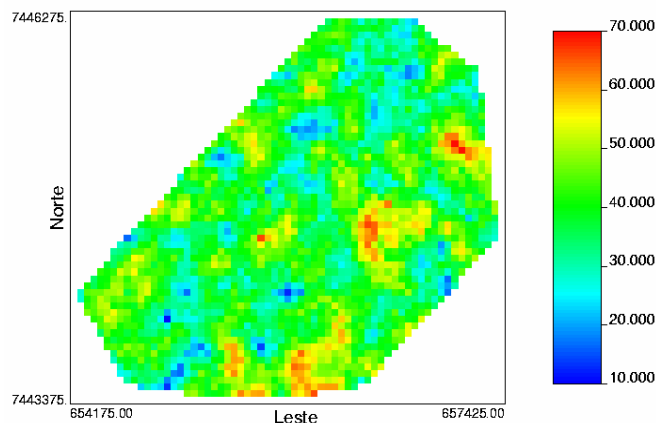


Figura 7.8- Mapa dos valores de desvio padrão condicional dos valores de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.

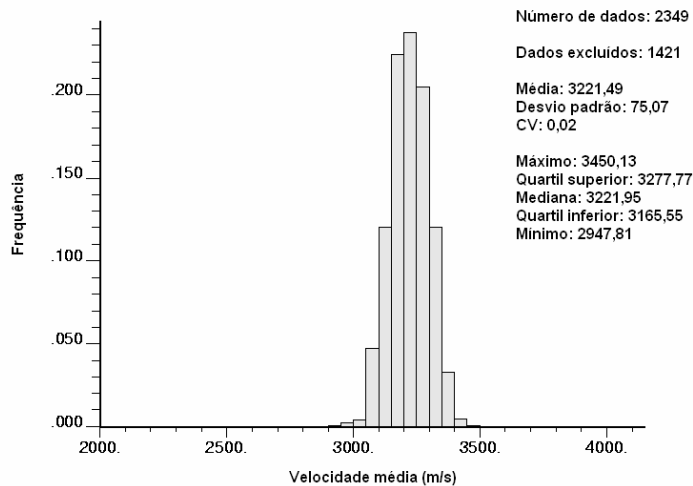


Figura 7.9- Histograma dos valores E-type de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.

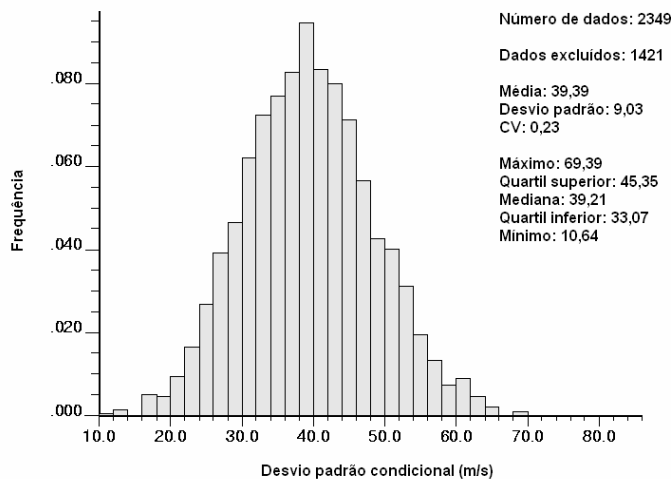


Figura 7.10- Histograma dos valores de desvio padrão condicional dos valores de velocidade média de onda sísmica a partir do datum sísmico.

## 7.2 Determinação do Intervalo de Confiança

Na seção anterior, foi comentada a geração de várias realizações, para um mesmo nó de *grid*, utilizando o algoritmo de simulação seqüencial Gaussiana. Cada uma dessas realizações possui a mesma probabilidade de ocorrência. O conjunto dos valores simulados para um mesmo nó constitui uma amostra de valores possíveis para este nó. O valor E-type dos valores de velocidade média foi referido

como sendo a estimativa de velocidade média obtida e o desvio padrão condicional desses valores foi referido como a incerteza associada a estimativa. Contudo, a média da população é o que realmente se procura, a qual pode ser aproximada pelo valor E-type. A incerteza associada a aproximação da média, a qual pode ser encontrada utilizando-se os valores de desvio padrão condicional encontrados anteriormente, é o valor que deve ser usado como incerteza dos valores de velocidade média encontrados.

Uma fórmula comumente utilizada na estatística é o chamado erro padrão da média, o qual significa a precisão da estimativa do valor de uma média. Segundo David (1977), o cálculo do erro padrão da média é baseado no famoso Teorema do Limite Central.

O Teorema do Limite Central pode ser explicado da seguinte forma (Spiegel, 1993):

- Dado uma população A com distribuição normal, média  $m$  e desvio padrão  $s$ ;
- Diversas amostras de tamanho  $n$  são coletadas da população A;
- Cada amostra apresenta média  $x$  e desvio padrão  $\sigma$ ;
- A distribuição das médias das amostras é aproximadamente normal;
- Quanto maior o valor de  $n$ , mais parecidos com a média populacional serão os valores  $x$  das amostras e, também, a média desses valores [quando  $n$  for maior ou igual a 30 o teorema do limite central também se aplica no caso de populações com distribuições não-normais (Christmann, 1978)];
- A distribuição das médias das amostras tenderá a ser mais parecida com a distribuição normal quanto maior for o valor de  $n$ ;
- O desvio padrão da distribuição das médias das amostras é o chamado erro padrão da média ( $\sigma_m$ ) e pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\sigma_m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(7.2)

Considerando-se uma amostra (média  $\bar{x}$ ) da população, existe 95% de probabilidade do valor da média  $\mu$  da população estar entre o intervalo  $[\bar{x} - 2\sigma_m, \bar{x} + 2\sigma_m]$ . Esse intervalo é denominado Intervalo de Confiança (David, 1977). O valor  $\bar{x} - 2\sigma_m$  é chamado limite inferior e o valor  $\bar{x} + 2\sigma_m$  é chamado limite superior (Christmann, 1978).

Na prática, o valor  $\sigma$  não é conhecido e o erro padrão da média é calculado utilizando –se uma aproximação do valor de  $\sigma$ ; o valor do desvio padrão  $\sigma$  da amostra. Com essa substituição, o Intervalo de Confiança (CI) é calculado da seguinte maneira:

$$\frac{CI}{2} = t_{\alpha,n} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{7.3}$$

onde:

$t_{\alpha,n}$  é o valor t-student (Christmann, 1978), o qual depende do valor  $n$  e da probabilidade ( $\alpha$ ) do valor de  $\mu$  estar dentro do intervalo de confiança.

O Intervalo de Confiança para os valores E-type de velocidade média de onda sísmica determinados em cada nó de *grid* simulado foi encontrado conforme a equação 7.3. O valor  $\sigma$  foi calculado como o desvio padrão condicional das realizações em cada nó de *grid*, o valor  $n$  utilizado foi o número de realizações em cada nó de *grid* (20 realizações), e o valor  $\alpha$  utilizado foi igual a 95%. O valor t-student igual a 2,093 foi aproximado conforme os valores tabelados em Law e Kelton (1991).

A Figura 7.11 apresenta o histograma para os valores iguais a metade do Intervalo de Confiança em cada nó de *grid* ( $CI/2$ ). A Figura 7.12 mostra o mapa dos valores de  $CI/2$ .

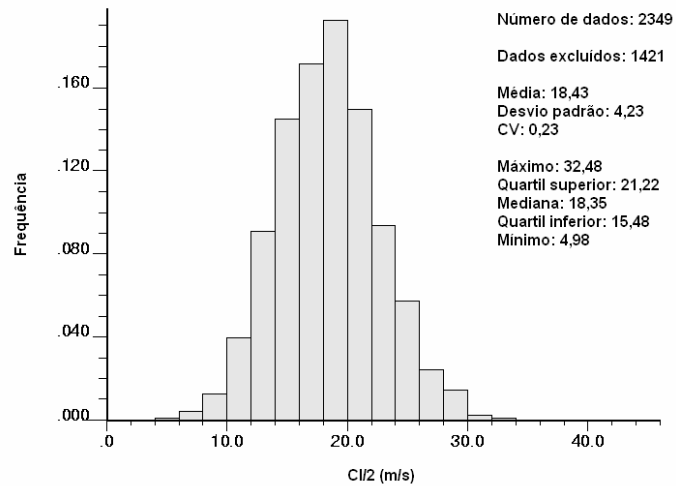


Figura 7.11- Histograma para os valores de CI/2 em cada nó simulado.

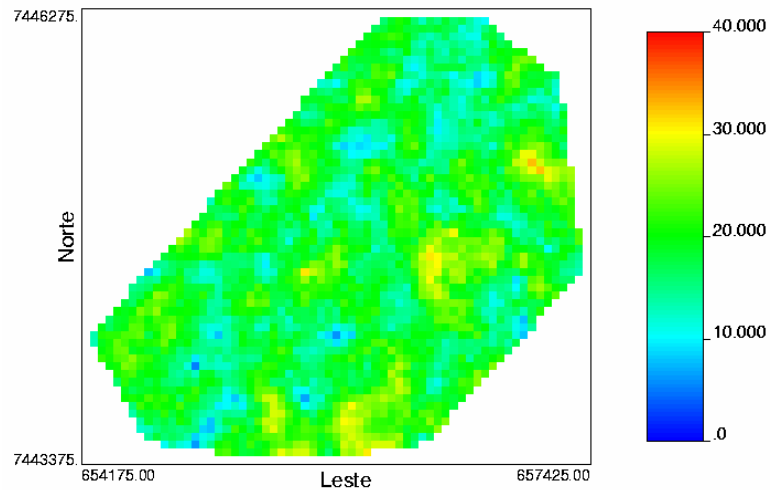


Figura 7.12- Mapa dos valores de CI/2 em cada nó de *grid*.

Dois cenários extremos para valores de velocidade média de onda sísmica podem ser construídos com os valores de limite superior e limite inferior dos valores E-type (estimativas de velocidade média de onda sísmica) em cada nó de *grid*. A Figura 7.13 mostra o histograma para os valores de limite superior em cada nó de *grid* simulado. A Figura 7.14 mostra o mapa desses valores de limite superior.

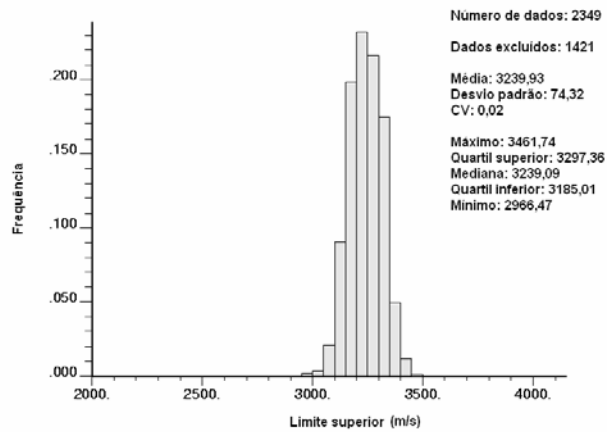


Figura 7.13- Histograma para os valores de limite superior em cada nó de *grid* simulado.

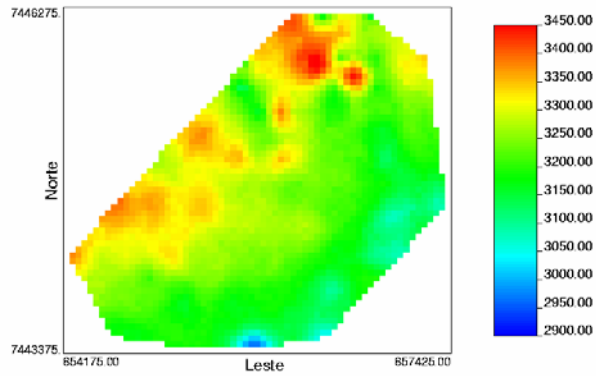


Figura 7.14- Mapa dos valores de limite superior.

A Figura 7.15 mostra o histograma para os valores de limite inferior em cada nó de *grid* simulado. A Figura 7.16 mostra o mapa desses valores de limite inferior.

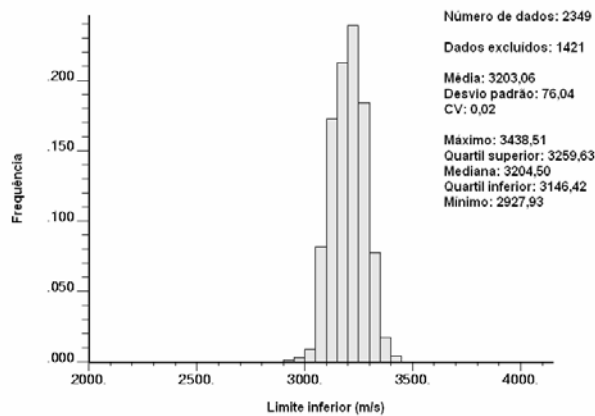


Figura 7.15- Histograma para os valores de limite inferior em cada nó de *grid* simulado.



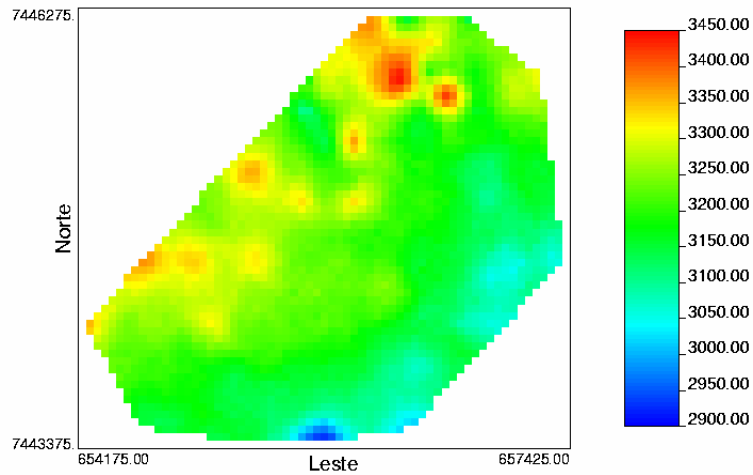


Figura 7.16- Mapa dos valores de limite inferior.

### 7.3 Obtenção dos Valores de Profundidade da Camada GCWS

A Figura 7.17 apresenta o *grid* de tempos de propagação da onda sísmica a partir do datum sísmico, até a capa da camada de carvão GCWS, em diversos pontos da região onde foi realizado o levantamento sísmico. O *grid* de tempo não possui a mesma extensão do *grid* de velocidade média, por isso, apenas uma parte existente nos dois *grids* foi considerada para obtenção de profundidades.

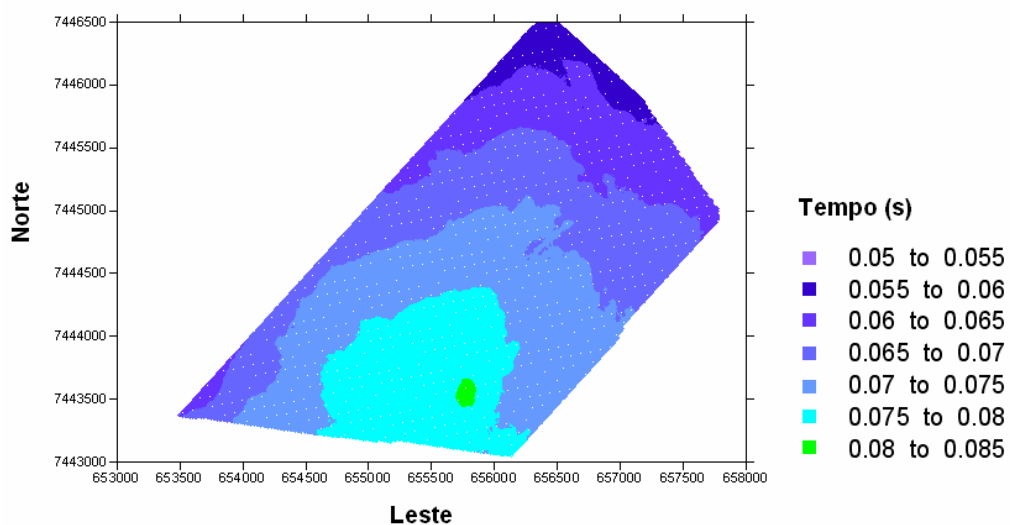


Figura 7.17- *Grid* de tempos de propagação da onda sísmica a partir do datum sísmico até a capa da camada de carvão GCWS.

O *grid* de tempo deve apresentar nós nas mesmas posições do *grid* de velocidade média para que esses *grids* possam ser multiplicados. Devido a grande quantidade de pontos do *grid* de tempo uma interpolação por meio da técnica Vizinho Próximo<sup>1</sup> foi utilizada para atribuir valores de tempo ao *grid* de velocidade média. A Figura 7.18 apresenta o *grid* dos valores de tempo com nós nas mesmas posições dos nós do *grid* de velocidade média. A Figura 7.19 apresenta o mapa dos valores de profundidade da camada GCWS em relação a elevação do datum sísmico.

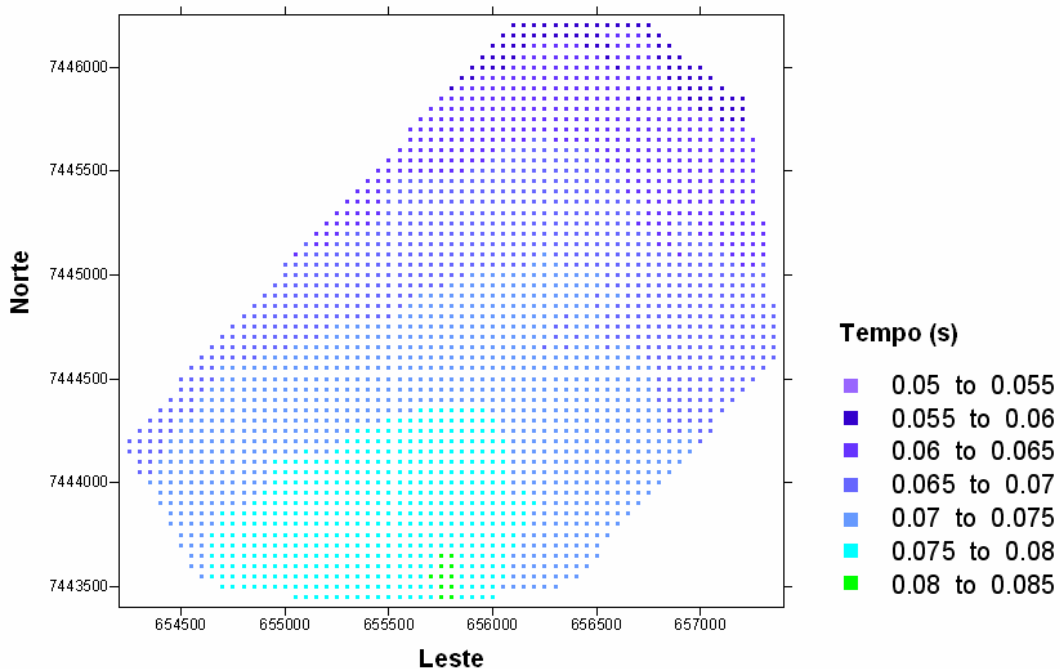
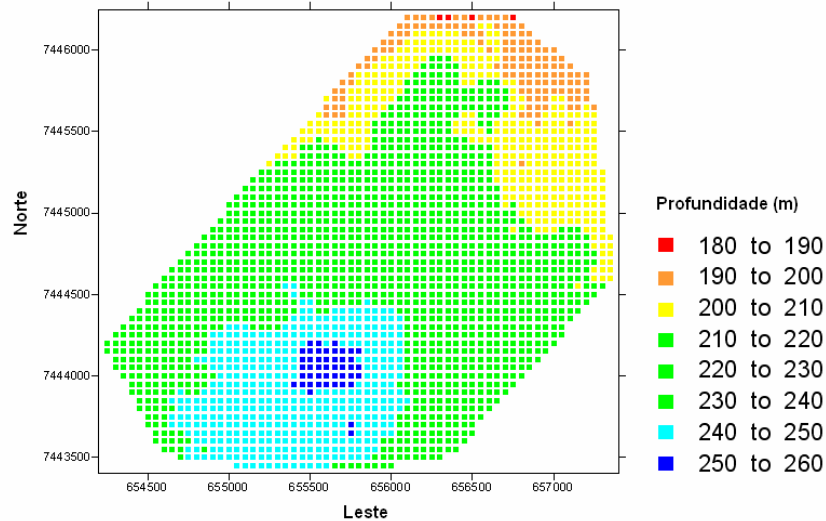


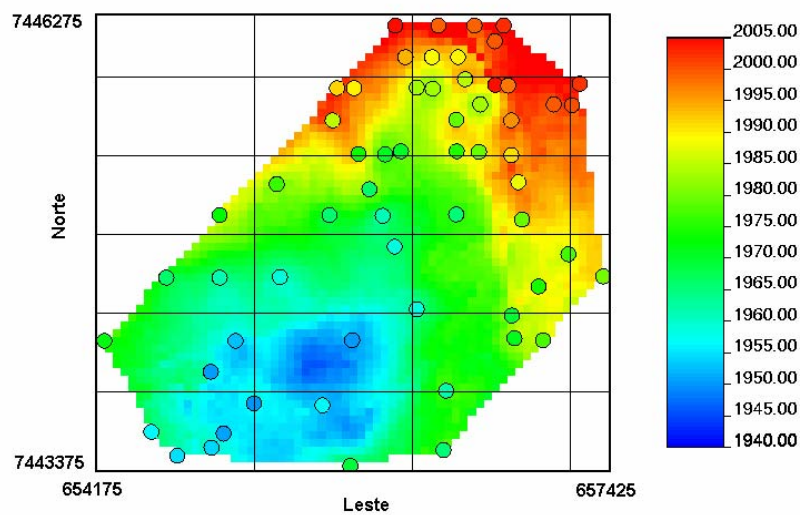
Figura 7.18- *Grid* dos valores de tempo com nós nas mesmas posições dos nós do *grid* de velocidade média.

<sup>1</sup> A técnica Vizinho Próximo atribui ao nó que está sendo estimado, o valor da amostra mais próxima. Essa técnica é comumente utilizada quando as amostras são uniformemente distribuídas (Anon, 2002).



**Figura 7.19-** Mapa dos valores de profundidade da camada GCWS em relação a elevação do datum sísmico.

Os valores de profundidade da Figura 7.19 podem ser transformados em valores de elevação a fim de serem comparados com os valores das amostras de elevação da cota da capa da camada GCWS (ver Capítulo 5) obtidas por sondagem (ver Figura 7.20).



**Figura 7.20-** Comparação entre valores de elevação obtidos com a multiplicação de tempos por velocidades médias e os valores de elevação das amostras de cota da capa.

Analisando-se o mapa da Figura 7.20 observa-se uma tendência dos valores de elevação obtidos com a multiplicação de tempos por velocidades serem maiores que os valores de elevação das amostras de cota da capa em posições próximas geometricamente. Para corrigir essa tendência a hipótese da velocidade de onda sísmica ser 0,95 vezes a velocidade de onda acústica foi considerada, visto que em algumas regiões do depósito a relação entre essas velocidades apresenta-se dessa forma. A Figura 7.21 mostra a mesma comparação apresentada na Figura 7.20, porém considerando a nova hipótese de relação entre velocidade sísmica e velocidade acústica.

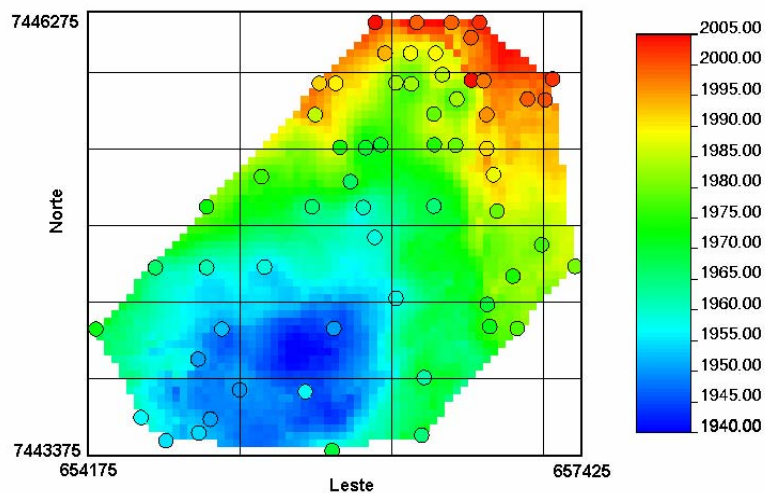


Figura 7.21- Comparação entre valores de elevação obtidos com a multiplicação de tempos por velocidades médias e os valores de elevação das amostras de cota da capa.

A Figura 7.22 apresenta o histograma para valores de erro obtidos com a diferença entre os valores, pertencentes à mesma posição, de cota da capa da camada GCWS (ver Capítulo 5) interpolados por Vizinho Próximo e de cota da capa obtidos com a multiplicação de tempo (s) por velocidade média (m/s). A Figura 7.23 apresenta o mapa de correlação entre esses valores.

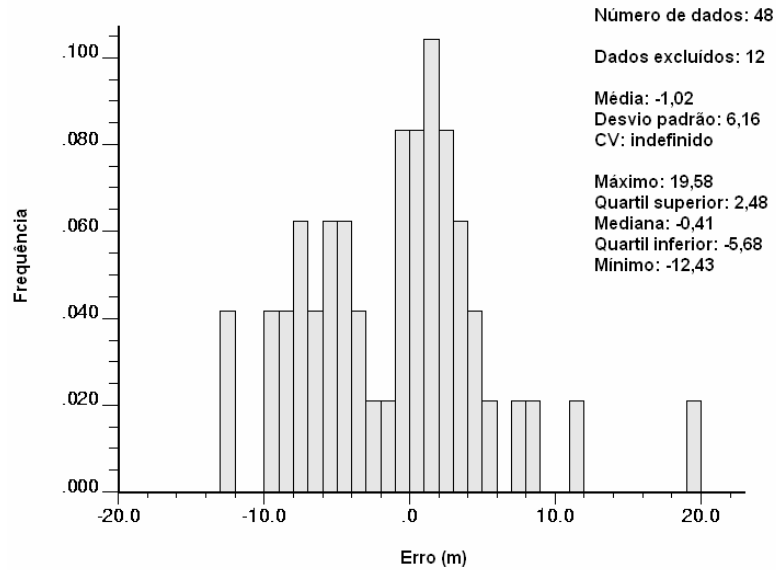


Figura 7.22- Histograma para valores de erro obtidos com a diferença entre os valores de cota capa interpolados e de cota capa obtidos com a multiplicação de tempo por velocidade média.

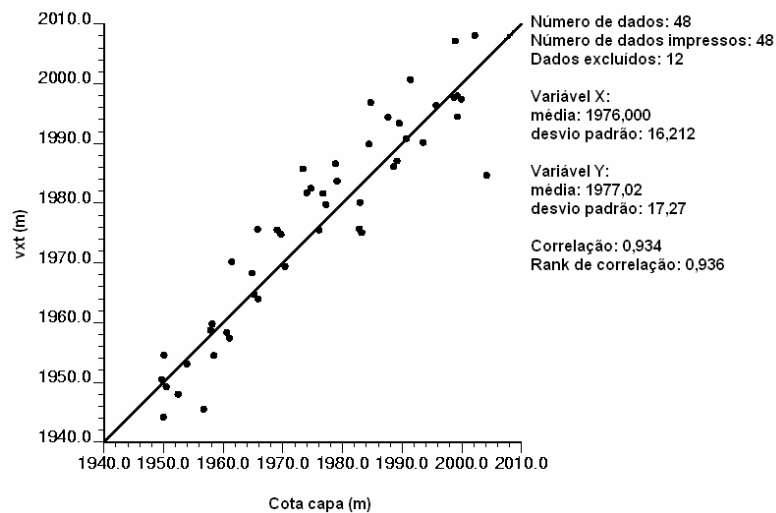


Figura 7.23- Mapa de correlação entre os valores de cota capa interpolados e de cota capa obtidos com a multiplicação de tempo por velocidade média.

Comparando-se as Figuras 7.20 e 7.21 observa-se que a Figura 7.21 mostra mais semelhança entre os valores (próximos geometricamente) de elevação obtidos com a multiplicação dos *grids* de tempo e velocidade média com os valores de elevação obtidos por sondagem. A diferença entre os *grids* de elevação das Figuras 7.20 e 7.21 pode ter sido causada pela falta de precisão na relação de conversão da velocidade de onda sísmica para velocidade de onda acústica, o que alerta para a necessidade de uma metodologia mais eficiente para determinação dessa relação.

Contudo a diferença entre os *grids* de elevações das duas figuras pode ter sido causada pela imprecisão dos parâmetros sísmicos (datum sísmico, velocidade de correção estática) e diferença de processamento dos dados de tempo e velocidade, por isso, recomenda-se que o processamento desses dados seja feito de forma conjunta.

Nas Figuras 7.21, 7.22 e 7.23 as diferenças entre os valores, próximos geometricamente, obtidos com a multiplicação de *grids* e com a sondagem, se deve, além da imprecisão dos parâmetros sísmicos e da diferença de processamento dos dados de tempo e velocidade, à incerteza nas estimativas de velocidade e à incerteza na obtenção dos tempos. Uma incerteza nos tempos de aproximadamente 0,001s pode levar a um erro de aproximadamente 3m nas profundidades estimadas, considerando-se uma velocidade média de aproximadamente 3200m/s. Por outro lado, uma incerteza de aproximadamente 20m/s (média das metades dos Intervalos de Confiança obtidos nesse estudo) pode acarretar um erro de aproximadamente 1,2 m de profundidade, considerando-se um tempo de aproximadamente 0,06 s.

De acordo com os fatores mencionados para explicar a diferença entre os valores de profundidade estimados e os valores amostrados por sondagem, as alternativas adotadas nesse estudo para obtenção de valores de velocidade média de onda sísmica foram consideradas eficientes.

#### **7.4 Considerações Finais**

O presente capítulo apresentou estimativas de velocidade média da onda sísmica obtidas com a utilização dos parâmetros escolhidos ao longo do trabalho: banco de dados em coordenadas estratigráficas, estimativa de um *grid* tridimensional para posterior obtenção de estimativas de velocidade média em cada “furo virtual” e utilização do algoritmo simulação seqüencial Gaussiana para interpolação da variável velocidade.

As estimativas de velocidade média da onda sísmica foram calculadas considerando a propagação da onda sísmica a partir de um datum sísmico de elevação 2200m até a capa da camada de carvão GCWS e velocidade da onda

sísmica em pontos acima da superfície topográfica aproximadamente igual a 3500m/s.

Utilizando-se o valor de desvio padrão condicional das estimativas de velocidade média de onda sísmica obtidas em cada realização, o intervalo de confiança de cada estimativa foi calculado.

Esse capítulo, também, apresentou a obtenção de valores de profundidade da camada GCWS. A multiplicação do *grid* de tempo de propagação da onda a partir do datum sísmico até a capa da camada de carvão GCWS com o *grid* de velocidade média da onda sísmica, gerou valores de profundidade da capa da camada GCWS em cada ponto do mesmo *grid* bidimensional.

Uma comparação entre valores de elevação da capa da camada GCWS, obtidos com a multiplicação dos *grids* de tempo e velocidade média, com os valores de cota da capa da camada de carvão GCWS obtidos por sondagem, foi realizada. Apesar das diferenças encontradas entre esses valores, as alternativas adotadas nesse estudo para obtenção de valores de velocidade média de onda sísmica foram consideradas eficientes.

## **CAPÍTULO 8 - Conclusão**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas durante esse estudo e recomendações para trabalhos futuros que possam complementar os aspectos abordados.

### **8.1 Revisão Geral e Conclusões**

A amostragem indireta feita pelo método da sísmica pode ser muito acurada em condições favoráveis, cobrindo áreas maiores do que a amostragem por furo de sonda a custos competitivos.

Os valores de profundidades das estruturas mapeadas pela sísmica podem ser encontrados se as metades dos tempos de chegada das ondas que se propagam até essas estruturas forem multiplicadas pelos valores de velocidade média de propagação dessas ondas sísmicas. Essas velocidades geralmente são inferidas pelo processamento dos próprios dados da sísmica, porém velocidades mais acuradas podem ser obtidas pelos valores de vagarosidade coletados por perfilagem acústica. Valores de vagarosidade de onda acústica podem ser transformados em valores de velocidade de onda acústica por meio de uma operação de inversão e valores de velocidade de onda acústica podem ser transformados em valores de velocidade de onda sísmica por meio de uma operação linear, inferida para cada depósito em estudo.

Contudo, as informações obtidas por perfilagem acústica são restritas a região dos furos perfilados e as estimativas dessas informações em outros pontos do depósito podem melhorar os valores de profundidades obtidos. Assim, esse estudo teve como principal meta avaliar possibilidades de se estimar em um *grid* valores de velocidade média de ondas sísmicas, quando essas se propagam a partir da



superfície do terreno até uma determinada camada ou estrutura de interesse, tendo em vista a multiplicação do *grid* bidimensional de tempos de chegada de ondas, que viajaram pelo mesmo trajeto, pelo *grid* de velocidade média. Avaliar as possibilidades de obtenção das incertezas das estimativas de velocidade média constituía outra meta desse trabalho, sendo as estimativas baseadas nos dados de vagarosidade coletados por perfilagem acústica.

Os métodos que permitem obtenção de estimativas de vagarosidade/ velocidade média avaliados durante esse estudo foram os seguintes:

- krigagem ordinária (2D) de dados de vagarosidade média;
- krigagem ordinária (2D) de dados de velocidade média;
- krigagem ordinária (3D) de vagarosidade em coordenadas estratigráficas;
- krigagem ordinária (3D) de vagarosidade em coordenadas cartesianas;
- simulação seqüencial gaussiana (3D) de dados de vagarosidade em coordenadas estratigráficas.

A krigagem bidimensional de dados de vagarosidade média foi comparada à krigagem bidimensional de dados de velocidade média a fim de se analisar o impacto do uso da variável vagarosidade, quando o intuito do estudo é a obtenção de velocidade (necessidade de inversão de vagarosidade ao final das interpolações). As estimativas resultantes dessas krigagens foram em média muito parecidas, contudo deve-se considerar a pequena diferença nas estimativas. A pequena diferença pode aumentar dependendo dos valores a serem interpolados. Nesse caso, os valores estimados apresentaram uma diferença média de 3 m/s o que poderia representar, por exemplo, uma incerteza de aproximadamente 18 cm na determinação da profundidade da camada GCWS considerando-se um tempo de propagação da onda sísmica, a partir da superfície do terreno até a capa dessa camada, de aproximadamente 0,065 s.

A krigagem tridimensional de vagarosidade em coordenadas estratigráficas foi comparada a krigagem tridimensional de vagarosidade em coordenadas cartesianas a fim de analisar o impacto do sistema de coordenadas estratigráficas na eficiência das estimativas. A utilização do banco de dados com valores de elevação em coordenadas estratigráficas mostrou produzir melhores estimativas de valores de vagarosidade do que aqueles produzidos com a utilização do banco de dados em

coordenadas cartesianas, mesmo sendo o depósito de carvão em estudo, apenas, levemente dobrado.

Valores de vagarosidade média foram obtidos com a krigagem tridimensional de vagarosidade em coordenadas estratigráficas. A média aritmética de valores acima da camada GCWS, em cada furo virtual, foi considerada como estimativa de vagarosidade média na mesma posição leste-norte do respectivo furo virtual. A média das estimativas de vagarosidade média (na mesma região da superfície topográfica construída) obtidas com a krigagem bidimensional e com a krigagem tridimensional (valores estimados acima da superfície topográfica foram desconsiderados) foram um pouco diferentes. A krigagem tridimensional para obtenção de estimativas de vagarosidade média foi considerada mais adequada apesar da krigagem bidimensional ser mais rápida computacionalmente.

Uma outra vantagem da construção de um *grid* tridimensional para obtenção de estimativas de velocidade média de onda sísmica que propaga-se até a camada de interesse é que a velocidade de onda sísmica que propaga-se até outras camadas pode ser calculada facilmente utilizando os dados do mesmo *grid* tridimensional, caso os objetivos do estudo sejam modificados em função de uma nova camada de minério.

As médias dos valores de vagarosidade média obtidos com a krigagem e simulação tridimensionais de vagarosidade em coordenadas estratigráficas foram comparadas. A simulação forneceu valores de incerteza das estimativas de vagarosidade média mais confiáveis que os valores de incerteza das estimativas krigadas.

Ao final do estudo, novas estimativas de velocidade média de onda sísmica foram realizadas utilizando-se os seguintes parâmetros escolhidos: simulação seqüencial Gaussiana do atributo velocidade de onda sísmica (dados de vagarosidade originais foram transformados em dados de velocidade de onda sísmica), amostras no sistema de coordenadas estratigráficas, estimativas em um *grid* tridimensional.

Os valores E-type das estimativas finais de velocidade média, obtidas por simulação, foram considerados os valores das estimativas de velocidade média em cada nó do *grid* bidimensional compatível com o *grid* de tempos de onda sísmica. Os valores de desvio padrão condicional das estimativas de velocidade média foram

utilizados no cálculo do erro padrão da média e dos Intervalos de Confiança das estimativas de velocidade média.

Uma comparação entre os valores, próximos geometricamente, das estimativas de elevação da capa da camada GCWS e dos valores desse atributo encontrados por amostragem direta (sondagem), foi realizada. Apesar das diferenças encontradas entre esses valores, o conjunto de parâmetros escolhidos para realização de estimativas de velocidade média de onda sísmica foram considerados eficientes.

Os Intervalos de Confiança calculados para as estimativas de velocidade média mostram que a elevação da camada de interesse pode variar, em função da incerteza de velocidade, em média 1,2 m acima ou abaixo da elevação determinada, considerando o tempo médio de chegada das ondas sísmicas até a camada GCWS de aproximadamente 0,06 segundos. A análise dos intervalos de confiança calculados mostra a importância do mapeamento da incerteza de velocidade na determinação de profundidades de camadas de carvão feita por métodos sísmicos associados a perfilagem acústica.

## **8.2 Trabalhos Futuros**

Algumas questões muito importantes na conversão dos dados obtidos pela sísmica em valores de profundidade, utilizando estimativas de velocidade média, ainda devem ser estudadas, como por exemplo:

- se as velocidades de ondas sísmicas forem obtidas por valores de vagariedade de ondas acústicas coletados na perfilagem acústica, uma relação entre velocidade de onda sísmica e vagariedade de onda acústica deve ser bem investigada para cada depósito em estudo;
- caso coordenadas estratigráficas sejam utilizadas nas estimativas de velocidade, a análise da influência das incertezas das posições dos valores retro-transformados no cálculo dos valores de velocidade média mostraria o impacto dessas incertezas;

- recomenda-se a realização conjunta do processamento de dados sísmicos e de estimativas de velocidade, para que as mesmas correções e referências sejam utilizados em ambos casos, diminuindo o erro na determinação de profundidades.

## Referências Bibliográficas

ANON 1995. INSTANTEL INC. *Minimate Plus Operator Manual*. InstanTEL Inc., Kanata, Canada, 81p.

ANON 2002. GOLDEN SOFTWARE INC. *Surfer<sup>®</sup> Version 8 – Help Tutorial*. Golden Software Inc., Colorado.

ANON 2003. DATAMINE STUDIO<sup>®</sup> *Version 2.0 – Help Tutorial*. Mineral Industries Computing Limited.

BLEINES, C., DERAISME, J., GEFFROY, F., PERSEVAL, S., RAMBERT, F., RENARD, D., TOUFFAIT, Y. 2001. *ISATIS software manual*. Geovariances and École des Mines de Paris, 531p.

BONJORNO, R. F. S. A., BONJORNO, J. R., BONJORNO, V. 1985. *Física 1: Cinemática, cinemática vetorial, gravitação universal, dinâmica, estática, mecânica dos fluidos*. FTD, São Paulo, 320p.

BORBA, R. F., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J. *Geostatistics for Contouring Net-Worth Value of Coal Deposits*. In: INTERNATIONAL GEOSTATISTICS CONGRESS, 5., 1996, Wollongong, Australia. Proceedings, International Geostatistics Congress, 1996. p. 822-830.

CHRISTMANN, R. U. 1978. *Estatística Aplicada*. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 135p.

DAVID, M. 1977. *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 2. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 364p.

DAVIDSON, J. P., REED, W. E. e DAVIS, P. M. 1997. *Exploring Earth – An Introduction to Physical Geology*. Prentice Hall, New Jersey, 477p.

DEUTSCH, C. V. 1989. DECLUS: A Fortran Program for Determining Optimum Spatial Declustering Weights. *Computers & Geosciences*, Vol. 15, Número 3, p. 325-332.

DEUTSCH, C. V. 2002. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press, New York, 376p.

DEUTSCH, C. V. e JOURNEL, A. G. 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 340p.

DEUTSCH, C. V. e JOURNEL, A. G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 2ª edição, 369p.

DOBRIN, M. B. e SAVIT, C. H. 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill Book Company, Nova York, 4ª edição, 867p.

ENCICLOPÉDIA MIRADOR INTERNACIONAL, Encyclopaedia Britannica do Brasil Publicações Ltda, São Paulo, Vol. 7, p. 3223–3225.

FALLON, G., ZHOU, B., HATHERLY, P. and SOMMER, D. *Coal Seismic Depth Conversion for Mine Data Integration: A Case Study From the Sandy Creek 3D Seismic Survey*. In: ASEG Geophysical Conference and Exhibition, 17., 2004, Sydney, Australia.

FIRTH, D. *Log Analysis for Mining Applications*. Peter Elkington, 164p. Reeves Oilfield Services Ltd. Este artigo pode ser encontrado na internet via <http://www.reeves-wireline.com/webpages2/publications.html>. Capturado em Julho de 2004.

GOOVAERTS, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 483p.

HARTMAN, H. L. 1992. *SME Mining Engineering Handbook*. SME, Littleton, Vol. 2, 2ª edição, p. 281-377.

HOFFMAN, G.L., JORDAN G.R. & WALLIS G.R. 1982. *Geophysical Borehole Logging HandBook for Coal Explotation*. The Coal Mining Research Centre, Edmonton, Alberta Canada, 270p.

ISAAKS, E. H. 1990. *The Application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data*, PhD Thesis, Stanford University, USA, 213p.

ISAAKS, E. H. e SRIVASTAVA M. R. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561p.

JENSEN, M. L. e BATEMAN, A. M. 1979. *Economic Mineral Deposits*. John Wiley & Sons, EUA, 593p.

JORDEN, J. R. e CAMPBELL, F. L. 1986. *Well Logging II: Eletric and Acoustic Logging*. SPE monograph series, Vol.10, 192p.

JOURNEL, A. G. e HUIJBREGTS, C. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 600p.

JOURNEL, A.G. 1983. *Non-parametric Estimation of Spatial Distributions*, *Mathematical Geology*, Vol.15, Número 3, p. 445-468.

KRIGE, D. G. 1951. *A Statistical Approach to Some Mine Valuations and Allied Problems at the Witwatersrand*. MSc. Thesis, Universty of Witwatersrand, Johannesburg, South África.

LAW, A. M. e KELTON, W. D. 1991. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill International Editions, Singapore, 2ª edição, 758p.

MATHERON, G. 1963. *Principles of Geostatistics*. *Economic Geology*, Número 58, p. 1246-1266.

MATHERON, G. e HUIJBREGTS, C. *Universal Kriging (An Optimal Method for Estimating and Contouring in Trend Surface Analysis)*. In: APCOM, 9.,1970, Montreal. Proceedings...Decision Making in the Mineral Industry, CIM Publishers, 1971. v.12, p. 159-169.

MELLO, L. A. M. D. 1987. *Perfilagem a Poço Aberto*. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Petrobrás, São Paulo, 258p.

OLIVEIRA, L. J. et al. 2004. *Aplicação da Perfilagem Geofísica Como Ferramenta de Auxílio ao Planejamento de Lavra*. Relatório Interno do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PANNATIER, Y. 1996. *Variowin: software for spatial data analysis in 2d*. Springer, Nova York, 91p.

PARASNIS, D. S. 1997. *Principles of Applied Geophysics*. Chapman & Hall, London, 5ª edição, 429p.

ROBERTSON RESEARCH INTERNATIONAL LTD. *Seismic Data Processing Interactive Tutorial*. Este glossário pode ser encontrado na internet via <http://ic.ucsc.edu>. Conceitos capturados em Agosto de 2003. Página da Internet modificada para <http://www.robresint.co.uk/PAS/geophyserv/vit/start.htm> em Outubro de 2004.

ROSSI, M. E. and JOURNEL, A. G. 1989. *When Do We Need a Trend Model in Kriging*. Journal of the International Association for Mathematical Geology, Vol. 21, Número 7, p. 715-739.

SCHLUMBERGER LIMITED©. 2003. *Schlumberger Oilfield Glossary*. Este glossário pode ser encontrado na internet via <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Default.cfm>. Conceitos capturados em Julho de 2003.



SOUZA, L. E., COSTA, J. F. C. L. e KOPPE, J. C. 2004. *Uncertainty Estimate in Resources Assessment: A Geostatistical Contribution*. In: Natural Resources Research, Vol. 13, Número 1, p. 1-15.

SPIEGEL, M. R. 1993. *Estatística*. Makron Books, São Paulo, 3a edição, 643p.

SUMMERS, G. C., BRODING, R. A. 1952. *Continuous velocity logging (acoustic)*. Geophysics, Número 17, p. 598-614.

THOMAS, J. E. 2001. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Petrobrás, Interciência, Rio de Janeiro, 271p.

VOGEL, C. B. 1952. *A seismic velocity logging method*. Geophysics, Número 17, p. 586-597.

YILMAZ, O. 1987. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 526p.

## Apêndice A – Custos da Geofísica

Neste apêndice, é apresentada uma avaliação básica dos custos envolvidos na aplicação dos métodos citados no Capítulo 1 (sísmica e perfilagem acústica).

### A.1 Custos da Sísmica

Para o cenário Australiano, onde se situa o depósito em estudo, custos aproximados de campanhas sísmicas são listados a seguir:

**Tabela A.1- Custos da sísmica.**

Dimensões do levantamento	Fonte	Por km em linha*	Por km <sup>2</sup> *
2D	Dinamite	\$35000	-
2D	Fontes superficiais	\$12000	-
3D	Dinamite	-	\$300000 a \$400000
3D	Fontes superficiais	-	\$95000 a \$140000

\*Custos em dólares australianos.

Os custos apresentados na Tabela A.1 envolvem custos de pesquisa, preparação do terreno, perfuração e carregamento (caso a fonte seja explosivo), aquisição, processamento e interpretação. Os custos são representativos quando a camada de carvão alvo estiver entre 120m a 240m de profundidade.

## **A.2 Custos da Perfilagem**

Para o cenário Australiano, o serviço contratado de perfilagem geofísica custa aproximadamente \$1500 dólares australianos por dia. Em um dia podem ser perfilados aproximadamente 1200m de furo, isto é, um furo de aproximadamente 300m de comprimento pode ser perfilado com 4 tipos de sondas de perfilagem.

## Apêndice B – Processamento Sísmico

Esse capítulo tem como objetivo apresentar algumas etapas do processamento sísmico.

### **B.1 Conceitos Sísmicos**

A maioria dos conceitos explicados ao longo desse capítulo são baseados em YILMAZ (1987) e PARASNIS (1997). Para uma melhor compreensão dos conteúdos abordados ao longo deste capítulo, a definição de alguns conceitos é necessária:

- Shotpoint (Schlumberger, 2003) - *Shotpoint* é o ponto na superfície do terreno onde a fonte sísmica é ativada.
- Canal (Schlumberger, 2003) - Canal é um dispositivo que transporta dados de um receptor para o sistema onde ocorrem os registros das informações. O registro simultâneo de 500 a 2000 canais é comum durante o levantamento sísmico em três dimensões e 120 a 240 canais durante o levantamento sísmico terrestre em duas dimensões.
- Traço (Schlumberger, 2003) - Dados sísmicos registrados para um canal.
- Sismograma (Schlumberger, 2003) - Traços registrados em resposta a um *shotpoint*.
- Seção Sísmica - Seção exibindo vários traços.

## **B.2 Etapas do Processamento**

O método sísmico tem como objetivo a determinação da composição e geometria das rochas da crosta terrestre. Por isso, os tempos de chegada e formas das ondas coletadas durante a aquisição sísmica são submetidos ao processamento sísmico, o qual pode agregar erros as geometrias determinadas. Algumas etapas desse processamento são discutidas nessa seção. As formas das ondas coletadas durante a aquisição sísmica dependem dos tipos de rochas que refletiram, refrataram e/ou transmitiram as ondas, por exemplo, a densidade das rochas pode influenciar a energia (amplitude) das ondas refletidas.

### **B.2.1 Deconvolução**

As ondas geradas pelas fontes sísmicas podem ser refletidas, refratadas e/ou transmitidas. As ondas refletidas, refratadas e/ou transmitidas são chamadas respostas do impulso da Terra, as quais são coletadas pelos receptores. Contudo, a resposta do impulso da Terra é adicionada à assinatura da fonte, as quais não foram refletidas, refratadas e/ou transmitidas, mas foram geradas posteriormente e propagaram-se em direção aos receptores. Esta “adição” é chamada convolução. Se a onda gerada pela fonte foi, apenas, um pulso por um curto intervalo de tempo (foi um *spike*, pulso com duração mínima, duração que tende a zero (Parasnis, 1997)), apenas a resposta do impulso da Terra seria registrada pelos receptores. Deconvolução é um processo que tenta obter a resposta do impulso da Terra de sinais registrados pelos receptores, por meio da compressão da wavelet (sinais registrados no domínio do tempo). A resposta do impulso da Terra compreende reflexões primárias e todas as possíveis múltiplas (ver reflexões múltiplas B.2.7). Esta seção apresentará a fórmula matemática da convolução e dois tipos de processos de deconvolução, filtro inverso e filtro inverso por mínimos quadrados.

---

### B.2.1.1 Convolução

A convolução pode ser definida como mostra a seguinte equação (Yilmaz, 1987):

$$s(\mathbf{t}) = w(\mathbf{t}) * r(\mathbf{t}) + n(\mathbf{t}) \tag{B.1}$$

onde:

$s(t)$  = traço sísmico registrado;

$w(t)$  = assinatura da fonte sísmica (onda no domínio do tempo, chamada na língua inglesa de *wavelet*);

$r(t)$  = resposta do impulso da Terra (a qual inclui reflexões primárias e secundárias), série de coeficientes de reflexão ou refletividade;

$n(t)$  = ruído do ambiente;

\* = denota convolução.

A convolução não é tão simples como a soma de dois números.

Por exemplo, a resposta do impulso da Terra descrita pela série no domínio do tempo (1, 0, 1/2) convolvida com a *wavelet* (1, -1/2) é (1, -1/2, 1/2, -1/4). Esta convolução é descrita na Figura B.1.

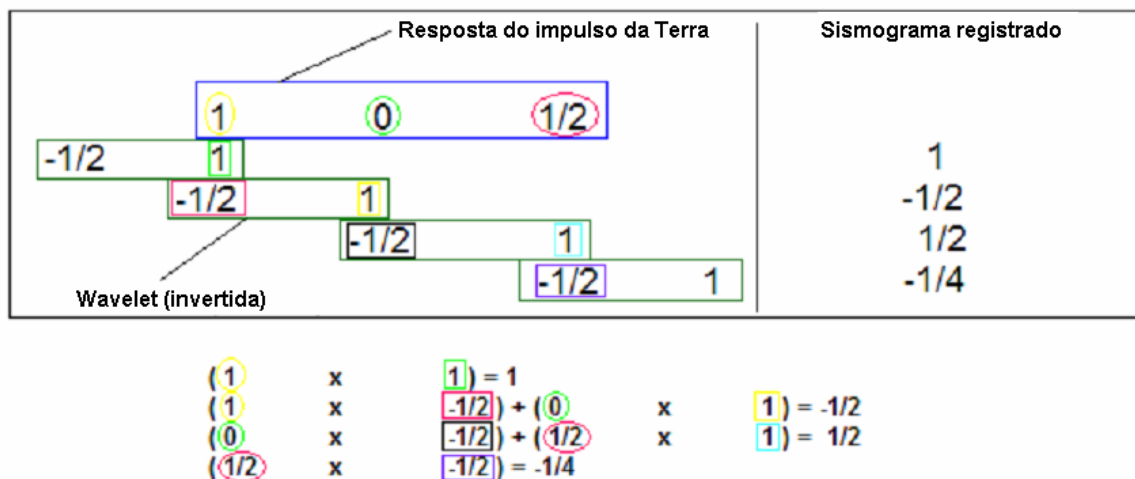


Figura B.1- Convolução da wavelet (1, -1/2) com a resposta do impulso da Terra (1, 0, 1/2). Modificado de Yilmaz (1987).

### B.2.1.2 Filtro Inverso

Filtro inverso é um tipo de processo de deconvolução que visa encontrar o inverso ( $w^{-1}(t)$ ) da *wavelet* ( $w(t)$ ), visto que se o inverso dessa onda for convolvido com o sismograma registrado (ver equação B.1) uma aproximação do valor de resposta do impulso da Terra é encontrado (ver equação B.2).

$$r(t) = w^{-1}(t) * s(t) \tag{B.2}$$

O inverso da *wavelet* pode ser obtido matematicamente usando a chamada transformada-z. Por exemplo, se a *wavelet* básica é apresentada como a série no domínio do tempo (1, -1/2), a transformada-z dessa onda é definida pelo seguinte polinômio:

$$W(z) = 1 - (1/2)z \tag{B.3}$$

Se o polinômio  $W(z)$  é invertido, os coeficientes do polinômio resultante são a série do inverso da *wavelet*, como mostra a seguinte equação:

$$W'(z) = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)z\right]} = 1 + \left(\frac{1}{2}\right)z + \left(\frac{1}{4}\right)z^2 + \dots$$

(B.4)

De acordo com a equação B.4, o inverso da *wavelet* pode ser apresentado pela série  $[1, (1/2), (1/4), \dots]$ . Quando uma série é convolvida com seu inverso, a série resultante esperada é um *spike*, que pode ser apresentado como uma série igual a  $(1, 0, 0, \dots)$ . A convolução da série  $[1, (-1/2)]$  com seu inverso  $[1, (1/2)]$  produz o resultado  $[1, 0, (-1/4)]$ , que não é ideal, mas pode ser melhorado incluindo mais coeficientes na série que representa o inverso da *wavelet*. O resultado da convolução da *wavelet*  $[(-1/2), 1]$  com seu inverso  $[(-2), -4]$ , é a série  $[(1, 0, -4)]$ , o qual é pior do que o resultado  $[1, 0, (-1/4)]$ , este é um problema de *fase mínima* (ver seção B.2.2) (Yilmaz, 1987).

### **B.2.1.3 Filtro Inverso por Mínimos Quadrados**

O filtro inverso por mínimos quadrados é um tipo de processo de deconvolução que, como filtro inverso, visa encontrar o inverso da *wavelet*, contudo, esse processo não usa a transformada-z para obter essa série. Uma série no domínio no tempo, com o mesmo número de pontos da *wavelet*, é representada como  $[a, b, c, \dots]$  e é convolvida com a *wavelet*. A Figura B.2 descreve a convolução da série  $[1, (-1/2)]$  com a série  $[a, b]$ .

A chamada energia acumulada do erro (L) é definida como a soma dos quadrados das diferenças entre os coeficientes resultantes da convolução como descreve a Figura B.2 e os coeficientes do *spike* desejado. A equação B.5 mostra a definição de L para a *wavelet* em estudo  $[1, (-1/2)]$ , o *spike* desejado é  $(1,0,0)$ :



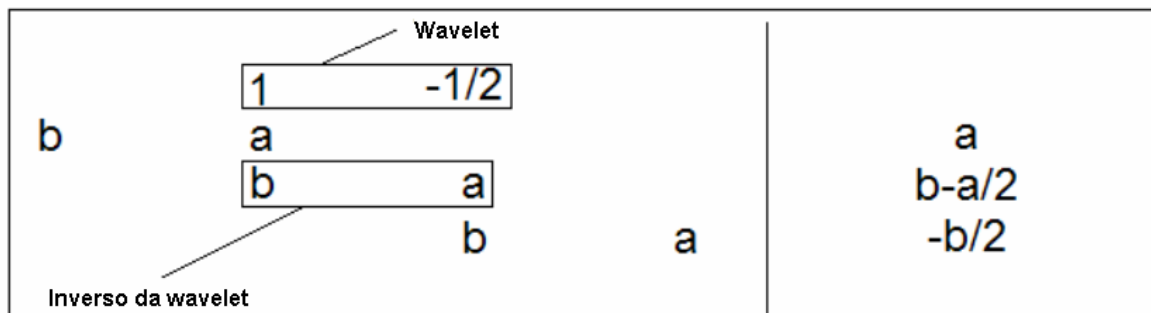


Figura B.2- Convolução da wavelet (1, -1/2) com seu inverso (a, b). Modificado de Yilmaz (1987).

$$L = (a - 1)^2 + \left(b - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2$$

(B.5)

A derivada parcial de L, para as variáveis em estudo, são calculadas e igualadas a zero, a fim de encontrar o valor mínimo para L, assim, os melhores valores para os coeficientes do inverso da *wavelet* serão encontrados.

As equações B.6 e B.7 mostram as primeiras derivadas parciais de L (equação B.5) igualadas a 0, para as variáveis a e b respectivamente. Os valores para as variáveis a e b são encontrados resolvendo um simples sistema com o mesmo número de variáveis e equações. O filtro inverso por mínimos quadrados, como filtro inverso, tem um problema com a *fase mínima* (Yilmaz, 1987).

$$\left(\frac{5}{2}\right)a - b = 2$$

(B.6)

$$\left(\frac{5}{2}\right)b - a = 0$$

(B.7)

### **B.2.2 Fase Mínima**

Quando a energia da *wavelet* (quantificada pela amplitude da onda) é concentrada no início dessa onda, a *wavelet* é de fase mínima. Uma *wavelet* é de fase máxima se sua energia é concentrada no seu fim, e nas demais situações a *wavelet* é de fase “misturada” (Yilmaz, 1987). A Figura B.3 mostra exemplo de uma onda de fase mínima, de uma onda de fase misturada e de uma onda de fase máxima.

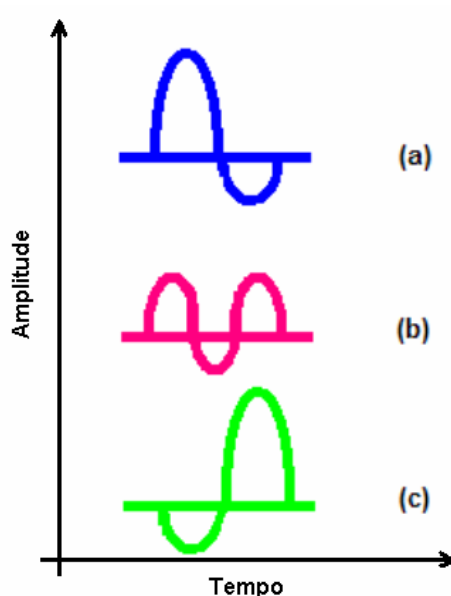
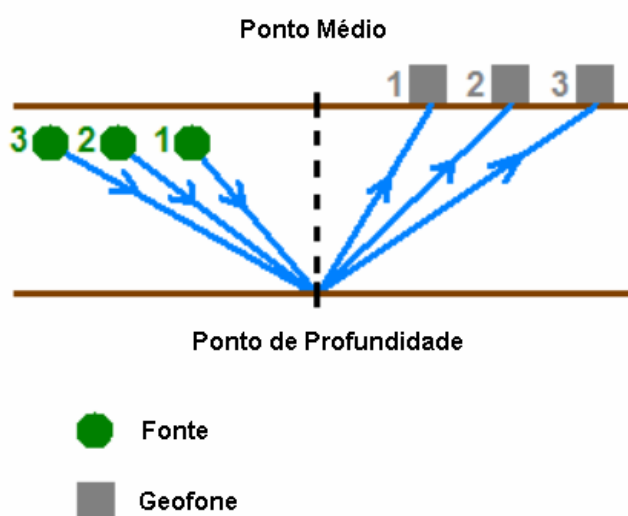


Figura B.3- (a) Onda de fase mínima. (b) Onda de fase misturada. (c) Onda de fase máxima. Modificado de Yilmaz (1987).

### **B.2.3 Empilhamento**

A soma de sinais refletidos por um mesmo ponto, a fim de distinguir melhor sinais de ruídos é comumente chamada de empilhamento (Parasnis, 1997). Um método comum de empilhamento (ou *stacking* na língua inglesa) é chamado *CMP stacking*. Durante a aplicação do método do ponto médio comum (CMP- common middle point) as fontes e os receptores são arranjados de forma que sinais refletidos

por um mesmo ponto são recebidos por diferentes geofones, assim, os sinais recebidos são oriundos de um ponto médio comum (CMP) ou um ponto de profundidade comum (CDP- common depth point) no caso do ponto encontrar-se em um refletor plano e do meio acima do ponto ser horizontalmente acamadado (Yilmaz, 1987). A Figura B.4 mostra um exemplo de arranjo de fontes e geofones durante a aplicação do método de *CMP stacking*.



**Figura B.4-** Exemplo de arranjo de fontes e geofones durante a aplicação do método de *CMP stacking*.

Quando tempos de chegada de sinais refletidos por um mesmo ponto são relacionados com as distâncias entre os geofones que receberam cada sinal e as fontes de cada sinal, como descreve a Figura B.5, um desenho de uma hipérbole pode ser visualizado em um gráfico. Esta hipérbole pode ser definida pela seguinte equação (Yilmaz, 1987):

$$t^2(\mathbf{x}) = t^2(0) + \frac{\mathbf{x}^2}{v^2}$$

(B.8)

onde:

$t(x)$ - tempo de percurso da onda quando a distância horizontal entre a fonte e o receptor é  $x$ ;

$t(0)$ - tempo de percurso da onda quando não existe distância horizontal entre a fonte e o receptor;

$x$ - distância horizontal entre as fontes e receptores dos sinais;

$v$ - velocidade do meio acima da interface refletora.

A diferença entre os tempos  $t(x)$  e  $t(0)$  é chamada na língua inglesa de *Normal Move-Out* (NMO). No método *CMP stacking* uma correção NMO é aplicada, isto é, todos tempos de chegada de sinais refletidos por um mesmo ponto são corrigidos para o  $t(0)$  (ver Figura B.5(b)) e esses sinais são somados e “divididos pelo número de sinais”, a amplitude resultante é atribuída ao tempo  $t(0)$  (Parasnis, 1997). A velocidade  $v$  encontrada pela equação B.8 é chamada *velocidade de empilhamento* (Parasnis, 1997). Logo, a *velocidade de empilhamento* pode ser uma aproximação para a velocidade de onda sísmica que se propaga através da camada acima da interface refletora.

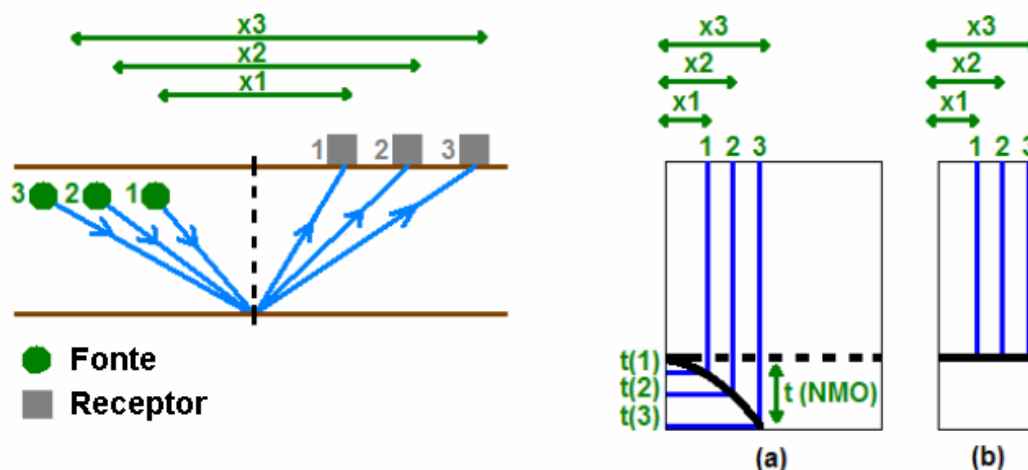


Figura B.5- (a) Tempos de chegada, de sinais refletidos por um mesmo ponto, relacionados com as distâncias entre fontes e receptores. (b) Gráfico (a) depois da correção NMO.

### **B.2.4 Migração**

A interpretação de tempos de chegada dos sinais detectados pelos receptores durante o levantamento sísmico pode levar a determinações de geometrias distorcidas de estruturas geológicas, como é descrito na Figura B.6.

A etapa do processamento sísmico conhecida como migração tem como objetivo localizar corretamente em tempo ou em profundidade os refletores bem como colapsar as difrações das ondas que aparecem nos sinais detectados.

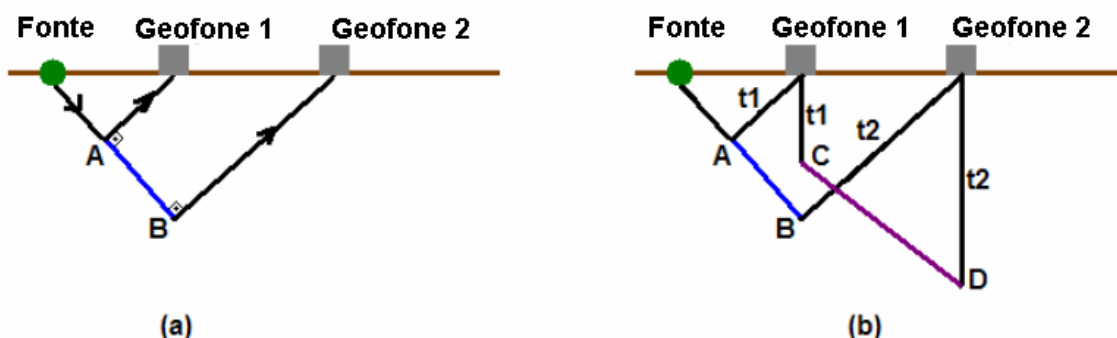


Figura B.6- (a) Segmento AB é a estrutura geológica real. (b) Segmento CD é a estrutura geológica determinada por meio da interpretação dos tempos de chegada dos sinais detectados pelos receptores.

### **B.2.5 Correções Estáticas**

Na maioria dos levantamentos sísmicos, as diferentes fontes ou os diferentes receptores não estão na mesma elevação, por isso, os tempos de percurso das ondas sísmicas serão influenciados. Por exemplo, se um refletor encontra-se na mesma elevação em todos pontos de sua extensão, mas as fontes e os receptores não se encontram na mesma elevação, diferentes tempos de viagem para as ondas sísmicas refletidas serão registrados e diferentes elevações para pontos pertencentes ao refletor serão determinadas (ver Figura B.7). Por esse motivo, correções estáticas devem ser aplicadas, usualmente essas correções são calculadas relacionando todos tempos de chegada a um plano de referência

(Parasnis, 1997). As diferenças entre os tempos ideais e os tempos registrados são calculadas baseadas nas distâncias entre fontes e/ou receptores e o plano de referência, além disso, baseadas na velocidade da onda sísmica inferida entre cada camada.

Adicionalmente, as camadas de intemperismo próximas à superfície variam em espessura (ver Figura B.8) e velocidade, por isso, pequenas diferenças nos tempos de chegada das ondas serão geradas. Essas pequenas diferenças não existiriam sob condições ideais. A camada de intemperismo é freqüentemente referida como zona de baixa velocidade (ZBV) porque a velocidade da onda que se propaga por esse meio é baixa em relação à maioria dos outros meios. As diferenças nos tempos causadas pela presença dessa camada podem ser corrigidas aplicando-se correções estáticas (Parasnis, 1997).

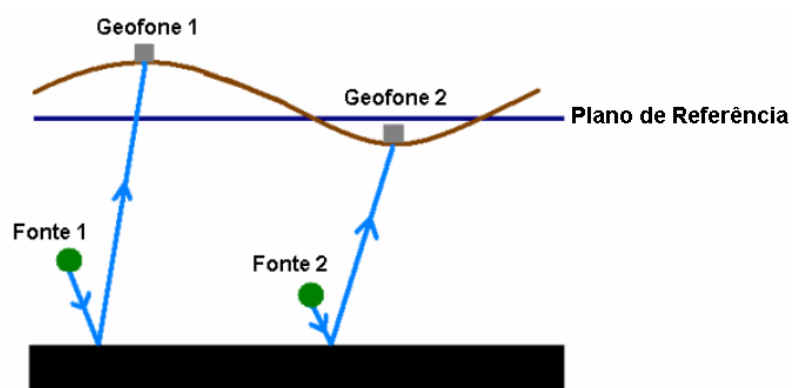


Figura B.7- Levantamento sísmico realizado com fontes ou receptores em diferentes elevações. Modificado de Parasnis (1997).

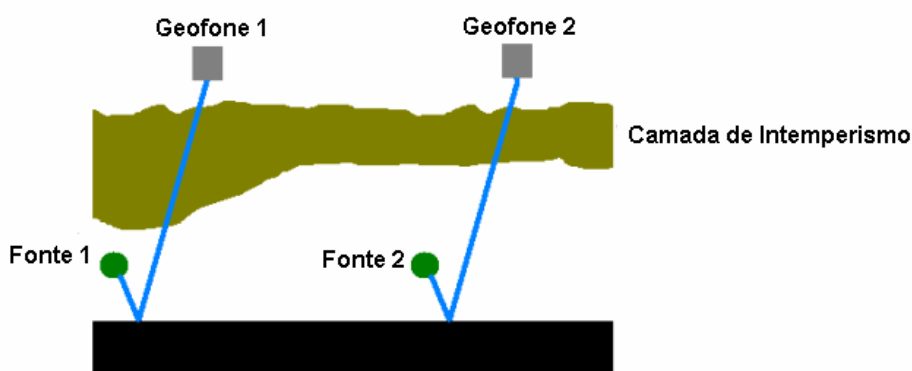


Figura B.8- Influência da camada de intemperismo com espessura variável no levantamento sísmico. Modificado de Parasnis (1997).

### **B.2.6 Ruídos (Sistemáticos, Coerentes e Aleatórios)**

Ruído também é uma fonte de erro no processamento de dados sísmicos. Todos sinais indesejáveis nos registros sísmicos são chamados ruídos (Parasnis, 1997).

Os ruídos podem ser sistemáticos, coerentes ou incoerentes (aleatórios).

#### **Ruídos Sistemáticos**

Ruído sistemático é um sinal que pode ser reproduzido, por exemplo, é um sinal que pode ser introduzido por falha no equipamento ou calibração inadequada (Schlumberger Oilfield Glossary, 2003).

#### **Ruído Coerente**

Esse tipo de ruído é semelhante em todos receptores e previsível de um receptor ao outro. Por exemplo, ondas superficiais<sup>B.1</sup> produzem ruídos coerentes em trabalhos terrestres (Parasnis, 1997). Os ruídos coerentes mais comuns são as reflexões múltiplas (ver seção B.2.7).

---

<sup>B.1</sup>. Os principais tipos de ondas superficiais são ondas Rayleigh e Love. Durante a passagem das ondas Rayleigh, as partículas descrevem elipses no plano vertical que contém a direção de propagação. Na superfície, o movimento das partículas é retrógrado em relação ao movimento da onda. Durante a passagem das ondas Love, as partículas oscilam transversalmente à direção de propagação da onda, em um plano paralelo a superfície (Parasnis, 1997).

## **Ruídos Incoerentes**

Ruídos incoerentes não são previsíveis de um receptor para o outro. Esse tipo de ruído ocorre devido a movimento de geofones causado pelo vento, tráfego, pequenos abalos sísmicos, entre outros (Parasnis, 1997).

### **B.2.6.1 Métodos para Atenuar os Efeitos dos Ruídos**

Certos ruídos podem ser reduzidos com o uso de alguns métodos. Esses métodos são conhecidos como filtro de frequência e arranjos de múltiplos detectores (para ruídos causados por ondas superficiais) (Parasnis, 1997).

#### **Filtro de Frequência**

As frequências das ondas causadas por ruídos geralmente são diferentes das frequências das ondas que realmente se deseja detectar. Por isso, filtros de frequência podem ser utilizados para eliminar ruídos. Os ruídos causados por movimentos no terreno, por exemplo, apresentam baixa frequência, enquanto que os ruídos causados pelo vento apresentam alta frequência (Parasnis, 1997). Contudo, filtros podem introduzir erros (Parasnis, 1997).

#### **Arranjos de Múltiplos Detectores**

Esse método consiste em posicionar os receptores de maneira que as ondas superficiais sejam eliminadas dos registros. Os receptores são posicionados ao



longo de perfis com uma pequena separação entre eles e os sinais detectados por alguns receptores são adicionados e registrados como um único traço. Logo, o movimento instantâneo do terreno devido a componente vertical das ondas superficiais será para cima em alguns receptores e para baixo em outros, portanto a soma dos sinais irá eliminar as ondas superficiais dos registros (Parasnis, 1997).

### **B.2.7 Reflexões Múltiplas**

Reflexões múltiplas são sinais que foram refletidos mais de uma vez durante sua trajetória até o receptor. Dependendo da diferença nos tempos em que as reflexões primárias e esses sinais aparecem, eles são caracterizados como *short-path* (or *peg-leg*), caso interfiram nas reflexões primárias, ou *long-path*, quando aparecem como eventos separados. Múltiplos *short-path* são menos óbvios do que a maioria dos múltiplos *long-path* e são mais difíceis de serem removidos pelo processamento sísmico (Schlumberger Oilfield Glossary, 2003). A Figura B.9 apresenta alguns tipos de reflexões múltiplas.

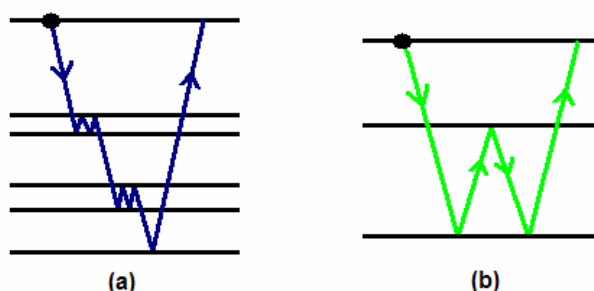


Figura B.9- (a) *Short-period internal*. (b) *Long-period internal*. Modificado de Parasnis (1997).

### **B.2.8 Frequência do Sinal**

As ondas sísmicas são registradas como sinais (sísmicos) que são funções contínuas no tempo. Os sinais sísmicos são amostrados em intervalos de tempo

constantes, chamados de intervalos de amostragem. O intervalo de amostragem deve ser ajustado a fim de permitir a reconstrução do sinal original. Geralmente, dado um intervalo de amostragem  $\Delta t$ , a maior frequência de onda que pode ser armazenada é  $1/(2\Delta t)$ , a fim de garantir boa reconstrução do sinal. Essa frequência é chamada de Frequência de *Nyquist* (Yilmaz, 1987). A Figura B.10 mostra um exemplo da influência do intervalo de amostragem na reconstrução do sinal.

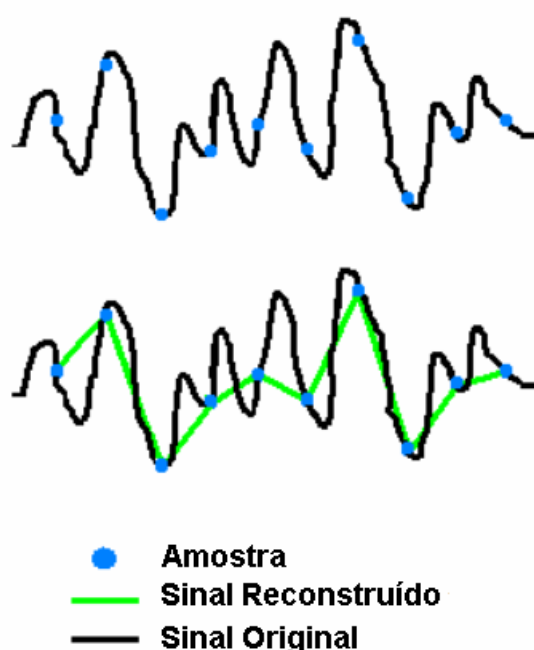


Figura B.10- Influência do intervalo de amostragem na reconstrução do sinal. Modificado de Yilmaz (1987).

### **B.2.9 Fase da Onda**

A fase de uma onda pode, às vezes, não ser ideal para algumas etapas do processamento de dados sísmicos, por exemplo, onda de fase mínima (seção B.2.2) é melhor do que onda de fase máxima ou onda de fase misturada para processos de deconvolução. Por isso, mudanças na fase das ondas, às vezes, podem ser apropriadas. Essas mudanças podem ser realizadas por meio de algumas operações matemáticas chamadas mudança linear de fase ou mudança constante de fase (Yilmaz, 1987). A Figura B.11 apresenta um esquema de mudança linear de fase, a qual muda a onda no tempo sem mudar sua forma. A Figura B.12 apresenta

um esquema de uma mudança constante de fase de  $90^\circ$ , a qual muda a forma da onda (Yilmaz, 1987).

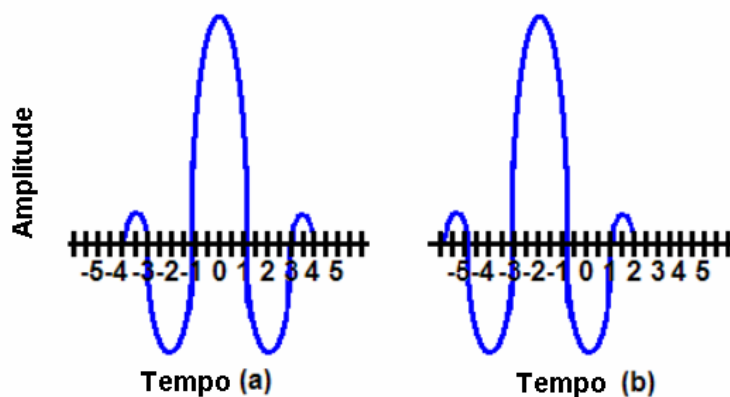


Figura B.11- Esquema de uma mudança linear de fase. (a) Onda de fase zero. (b) Onda de fase zero com aplicação da mudança linear de fase.

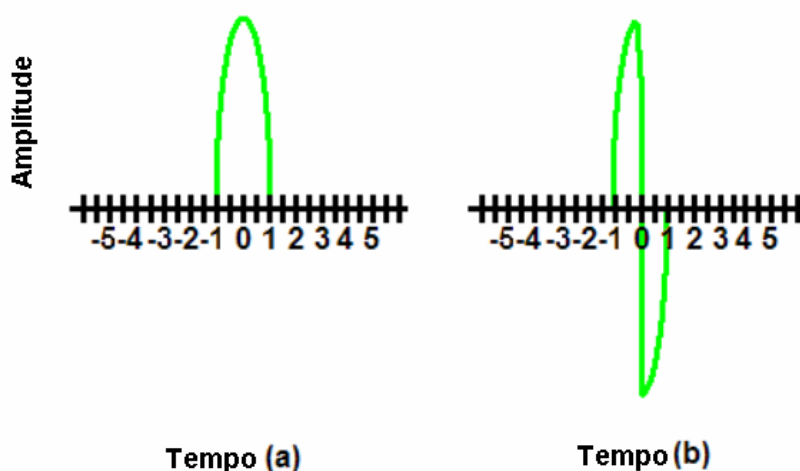


Figura B.12- Esquema de uma mudança constante de fase. (a) Onda de fase zero. (b) Onda (a) com mudança constante de fase de  $90^\circ$ .

### **B.2.10 Distribuição de Bins**

Os princípios básicos do processamento de dados sísmicos em duas dimensões se aplicam para processamento de dados sísmicos em três dimensões. Em processamento de dados sísmicos em duas dimensões, traços são atribuídos a pontos médios comuns (CMP). Em processamento de dados sísmicos em três

dimensões, traços são atribuídos a células comuns (bins). Portanto, a distribuição de bins influencia na interpretação geológica dos dados sísmicos (Yilmaz, 1987).

## Apêndice C – Arquivos de Parâmetros

Os parâmetros usados na execução dos programas da biblioteca GSLIB durante esse estudo, são apresentados a seguir.

```

Parameters for DECLUS
*****

START OF PARAMETERS:
todos_furos4.txt          -file with data
1  2  3  4                - columns for X, Y, Z, and variable
50.0    200.0             - trimming limits
dec_furos4_b.sum         -file for summary output
dec_furos4_b.out        -file for output with data & weights
1.0    0.001             -Y and Z cell anisotropy (Ysize=size*Yanis)
1                                           -O=look for minimum declustered mean (1=max)
101  550.0  650.0       -number of cell sizes, min size, max size
5                                           -number of origin offsets

```

**Figura C.1- Arquivo de parâmetros usado no desagrupamento dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica em coordenadas cartesianas.**

```

Parameters for DECLUS
*****

START OF PARAMETERS:
zstrat_4arred.txt       -file with data
1  2  3  4                - columns for X, Y, Z, and variable
50.0    200.0             - trimming limits
dec_zstr_b.sum         -file for summary output
dec_zstr_b.out        -file for output with data & weights
1.0    0.001             -Y and Z cell anisotropy (Ysize=size*Yanis)
1                                           -O=look for minimum declustered mean (1=max)
101  550.0  650.0       -number of cell sizes, min size, max size
5                                           -number of origin offsets

```

**Figura C.2- Arquivo de parâmetros usado no desagrupamento dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas.**

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
todos_furos4.txt          -file with data
1 2 3                    -columns for X, Y, Z coordinates
1 4 0                    -number of variables,col numbers
50.0      200.0          -trimming limits
gamv_cart5vert.out       -file for variogram output
300                      -number of lags
1                        -lag separation distance
0.5                     -lag tolerance
1                        -number of directions
0.0 90.0 1000 90.0 10.0 80 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                        -standardize sills? (0=no, 1=yes)
2                        -number of variograms
1 1 1                    -tail var., head var., variogram type
1 1 4                    -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
      2 = traditional cross semivariogram
      3 = covariance
      4 = correlogram
      5 = general relative semivariogram
      6 = pairwise relative semivariogram
      7 = semivariogram of logarithms
      8 = semimadogram
      9 = indicator semivariogram - continuous
     10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.3- Arquivo de parâmetros usado na construção do variograma experimental vertical dos dados de vagarosidade de onda acústica em coordenadas cartesianas.**

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
zstrat_4arred.txt        -file with data
1 2 3                    -columns for X, Y, Z coordinates
1 4 0                    -number of variables,col numbers
50.0      200.0          -trimming limits
gamv_zstrat4vert.out    -file for variogram output
300                      -number of lags
1                        -lag separation distance
0.5                     -lag tolerance
1                        -number of directions
0.0 90.0 1000 90.0 10.0 80 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                        -standardize sills? (0=no, 1=yes)
2                        -number of variograms
1 1 1                    -tail var., head var., variogram type
1 1 4                    -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
      2 = traditional cross semivariogram
      3 = covariance
      4 = correlogram
      5 = general relative semivariogram
      6 = pairwise relative semivariogram
      7 = semivariogram of logarithms
      8 = semimadogram
      9 = indicator semivariogram - continuous
     10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.4- Arquivo de parâmetros usado na construção do variograma experimental vertical dos dados de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas.**

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
todos_furos4.txt                -file with data
1 2 3                            -columns for X, Y, Z coordinates
1 4 0                            -number of variables,col numbers
50.0      200.0                 -trimming limits
gamv_cart5hor4.out              -file for variogram output
30                               -number of lags
100                              -lag separation distance
50                               -lag tolerance
4                               -number of directions
112.5    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
135.0    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
157.5    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
180.0    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                                           -standardize sills? (0=no, 1=yes)
1                                           -number of variograms
1 1 1                                     -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.5-** Arquivo de parâmetros usado na construção dos variogramas experimentais horizontais dos dados (3D) de vagarosidade de onda acústica, em coordenadas cartesianas, nas direções azimutais de 112,5°, 135°, 157,5° e 180°.

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
zstrat_4arred.txt                -file with data
1 2 3                            -columns for X, Y, Z coordinates
1 4 0                            -number of variables,col numbers
50.0      200.0                 -trimming limits
gamv_zstrat4hor4.out            -file for variogram output
30                               -number of lags
100                              -lag separation distance
50                               -lag tolerance
4                               -number of directions
112.5    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
135.0    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
157.5    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
180.0    22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                                           -standardize sills? (0=no, 1=yes)
1                                           -number of variograms
1 1 1                                     -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.6-** Arquivo de parâmetros usado na construção dos variogramas experimentais horizontais dos dados (3D) de vagarosidade de onda acústica, em coordenadas estratigráficas, nas direções azimutais de 112,5°, 135°, 157,5° e 180°.

```

Parameters for KT3D
*****

START OF PARAMETERS:
todos_furos4.txt          -file with data
0 1 2 3 4 0              - columns for DH,X,Y,Z,var,sec var
50.0 200.0                - trimming limits
0                          -option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
xvk.dat                   -file with jackknife data
1 2 0 3 0                 - columns for X,Y,Z,vr and sec var
1                          -debugging level: 0,1,2,3
krig_cartes.dbg           -file for debugging output
krig_cartes.out           -file for kriged output
65 654200 50.0            -nx,xmn,xsiz
58 7443400 50.0           -ny,ymn,ysiz
585 1890.0 0.5            -nz,zmn,zsiz
5 5 1                     -x,y and z block discretization
3 16                      -min, max data for kriging
2                          -max per octant (0-> not used)
1200.0 1200.0 2.5         -maximum search radii
0.0 0.0 0.0              -angles for search ellipsoid
1 2.302                   -0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
0 0 0 0 0 0 0 0          -drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
0                          -0, variable; 1, estimate trend
extdrift.dat              -gridded file with drift/mean
4                          - column number in gridded file
2 26.0                    -nst, nugget effect
1 180.0 0.0 0.0 0.0      -it,cc,ang1,ang2,ang3
    200.0 200.0 3.0       -a_hmax, a_hmin, a_vert
1 50.0 0.0 0.0 0.0       -it,cc,ang1,ang2,ang3
    100000.0 100000.0 120.0 -a_hmax, a_hmin, a_vert

```

**Figura C.7-** Arquivo de parâmetros usado na krigagem tridimensional do atributo vagarosidade de onda acústica, em coordenadas cartesianas.

```

Parameters for KT3D
*****

START OF PARAMETERS:
zstrat_4arred.txt         -file with data
0 1 2 3 4 0              - columns for DH,X,Y,Z,var,sec var
50.0 200.0                - trimming limits
0                          -option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
xvk.dat                   -file with jackknife data
1 2 0 3 0                 - columns for X,Y,Z,vr and sec var
1                          -debugging level: 0,1,2,3
krig5zstrat.dbg           -file for debugging output
krig5zstrat.out           -file for kriged output
65 654200 50.0            -nx,xmn,xsiz
58 7443400 50.0           -ny,ymn,ysiz
585 -66.0 0.5             -nz,zmn,zsiz
5 5 1                     -x,y and z block discretization
3 16                      -min, max data for kriging
2                          -max per octant (0-> not used)
1200.0 1200.0 2.5         -maximum search radii
0.0 0.0 0.0              -angles for search ellipsoid
1 2.302                   -0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
0 0 0 0 0 0 0 0          -drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
0                          -0, variable; 1, estimate trend
extdrift.dat              -gridded file with drift/mean
4                          - column number in gridded file
2 26.0                    -nst, nugget effect
1 155.0 0.0 0.0 0.0      -it,cc,ang1,ang2,ang3
    290.0 290.0 2.5       -a_hmax, a_hmin, a_vert
1 75.0 0.0 0.0 0.0       -it,cc,ang1,ang2,ang3
    100000.0 100000.0 100.0 -a_hmax, a_hmin, a_vert

```

**Figura C.8-** Arquivo de parâmetros usado na krigagem tridimensional do atributo vagarosidade de onda acústica, em coordenadas estratigráficas.



```

Parameters for KT3D
*****

START OF PARAMETERS:
cota_capa.dat
0 2 3 0 4 0
-900.0 1.0e21
0
xvk.dat
1 2 0 3 0
1
krig_ctcaca.dbg
krig_ctcaca.out
65 654200 50.0
58 7443400 50.0
1 1 1
5 5 1
2 16
2
3000.0 1200.0 0.0
112.5 0.0 0.0
1 2.302
0 0 0 0 0 0 0 0
0
extdrift.dat
4
2 0.0
3 65.0 112.5 0.0 0.0
651.0 650.0 0.0
3 195.82 112.5 0.0 0.0
100000.0 1200.0 0.0

-file with data
- columns for DH,X,Y,Z,var,sec var
- trimming limits
-option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
-file with jackknife data
- columns for X,Y,Z,vr and sec var
-debugging level: 0,1,2,3
-file for debugging output
-file for kriged output
-nx,xmn,xsiz
-ny,ymn,ysiz
-nz,zmn,zsiz
-x,y and z block discretization
-min, max data for kriging
-max per octant (0-> not used)
-maximum search radii
-angles for search ellipsoid
-0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
-0, variable; 1, estimate trend
-gridded file with drift/mean
- column number in gridded file
-nst, nugget effect
-it,cc,ang1,ang2,ang3
-a_hmax, a_hmin, a_vert
-it,cc,ang1,ang2,ang3
-a_hmax, a_hmin, a_vert

```

Figura C.9- Arquivo de parâmetros usado na krigagem do atributo cota da capa da camada GCWS.

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
medias_kr.dat
1 2 0
1 3 3
-1.0 1.0e21
gamv_vag2.out
10
300.0
150.0
4
22.5 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
45.0 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
67.5 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
135.0 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
0
1
1 1 1

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

-file with data
- columns for X, Y, Z coordinates
- number of variables,col numbers
- trimming limits
-file for variogram output
-number of lags
-lag separation distance
-lag tolerance
-number of directions
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-standardize sills? (0=no, 1=yes)
-number of variograms
-tail var., head var., variogram type

```

Figura C.10- Arquivo de parâmetros usado na construção dos variogramas experimentais dos dados bidimensionais de vagarosidade média de onda acústica nas direções azimutais de 22,5°, 45°, 67,5° e 135°.

```

Parameters for KT3D
*****

START OF PARAMETERS:
medias_kr.dat
0 1 2 0 3 0
-1.0 1.0e21
0
xvk.dat
1 2 0 3 0
1
krvagari.dbg
krvagari.out
65 654200 50.0
58 7443400 50.0
1 0.0 1.0
5 5 1
3 16
2
1400.0 1200.0 0.0
45.0 0.0 0.0
1 2.302
0 0 0 0 0 0 0 0
0
extdrift.dat
4
2 0.18
1 10.0 45.0 0.0 0.0
700.0 400.0 10.0
1 3.0 45.0 0.0 0.0
100000.0 1200.0 10.0

-file with data
- columns for DH,X,Y,Z,var,sec var
- trimming limits
-option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
-file with jackknife data
- columns for X,Y,Z,vr and sec var
-debugging level: 0,1,2,3
-file for debugging output
-file for kriged output
-nx,xmn,xsiz
-ny,ymn,ysiz
-nz,zmn,zsiz
-x,y and z block discretization
-min, max data for kriging
-max per octant (0-> not used)
-maximum search radii
-angles for search ellipsoid
-0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
-drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
-0, variable; 1, estimate trend
-gridded file with drift/mean
- column number in gridded file
-nst, nugget effect
-it,cc,ang1,ang2,ang3
-a_hmax, a_hmin, a_vert
-it,cc,ang1,ang2,ang3
-a_hmax, a_hmin, a_vert

```

Figura C.11- Arquivo de parâmetros usado na krigagem bidimensional do atributo vagarosidade média.

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
medias_kr.dat
1 2 0
1 4 4
-1.0 1.0e21
gamv_vag2.out
10
300.0
150.0
4
22.5 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
45.0 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
67.5 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
135.0 22.5 300.0 0.0 0.0 0.5
0
1
1 1 1

-file with data
- columns for X, Y, Z coordinates
- number of variables,col numbers
- trimming limits
-file for variogram output
-number of lags
-lag separation distance
-lag tolerance
-number of directions
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
-standardize sills? (0=no, 1=yes)
-number of variograms
-tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

Figura C.12- Arquivo de parâmetros usado na construção dos variogramas experimentais dos dados bidimensionais de velocidade média de onda acústica nas direções azimutais de 22,5°, 45°, 67,5° e 135°.

```

Parameters for KT3D
*****

START OF PARAMETERS:
medias_kr.dat          -file with data
0 1 2 0 4 0          - columns for DH,X,Y,Z,var,sec var
-1.0 1.0e21          - trimming limits
0                    -option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
xvk.dat              -file with jackknife data
1 2 0 3 0           - columns for X,Y,Z,vr and sec var
1                    -debugging level: 0,1,2,3
krveloc.dbg          -file for debugging output
krveloc.out           -file for kriged output
65 654200 50.0       -nx,xmn,xsiz
58 7443400 50.0     -ny,ymn,ysiz
1 0.0 1.0           -nz,zmn,zsiz
5 5 1               -x,y and z block discretization
3 16                -min, max data for kriging
2                    -max per octant (0-> not used)
1400.0 1200.0 0.0   -maximum search radii
45.0 0.0 0.0        -angles for search ellipsoid
1 2.302             -0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
0 0 0 0 0 0 0 0 0   -drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
0                    -0, variable; 1, estimate trend
extdrift.dat         -gridded file with drift/mean
4                    - column number in gridded file
2 290               -nst, nugget effect
1 16113.23 45.0 0.0 0.0 -it,cc,ang1,ang2,ang3
700.0 400.0 0.0     -a_hmax, a_hmin, a_vert
1 4834.0 45.0 0.0 0.0 -it,cc,ang1,ang2,ang3
100000.0 1200.0 0.0 -a_hmax, a_hmin, a_vert

```

Figura C.13- Arquivo de parâmetros usado na krigagem bidimensional do atributo velocidade média.

```

Parameters for NSCORE
*****

START OF PARAMETERS:
zstrat_4arred.txt     -file with data
4 0                   - columns for variable and weight
50.0 200.0           - trimming limits
0                     -l=transform according to specified ref. dist.
../histsmth/histsmth.out - file with reference dist.
1 2                   - columns for variable and weight
ns_orzstrat.out       -file for output
ns_orzstrat.trn       -file for output transformation table

```

Figura C.14- Arquivo de parâmetros usado na normalização dos dados tridimensionais de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas.

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
ns_orzstrat.out          -file with data
1 2 3                   -columns for X, Y, Z coordinates
1 5 0                   -number of variables,col numbers
-900.0      1.0e21      -trimming limits
gamv_nszstrvert.out     -file for variogram output
300                    -number of lags
1                      -lag separation distance
0.5                    -lag tolerance
1                      -number of directions
0.0 90.0 1000 90.0 10.0 80 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                      -standardize sills? (0=no, 1=yes)
1                      -number of variograms
1 1 1                  -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.15- Arquivo de parâmetros usado na construção do variograma experimental vertical dos dados normalizados de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas.**

```

Parameters for GAMV
*****

START OF PARAMETERS:
ns_orzstrat.out          -file with data
1 2 3                   -columns for X, Y, Z coordinates
1 5 0                   -number of variables,col numbers
-900.0      1.0e21      -trimming limits
gamv_nszstrhor4.out     -file for variogram output
30                      -number of lags
100                     -lag separation distance
50                      -lag tolerance
4                      -number of directions
112.5 22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
135.0 22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
157.5 22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
180.0 22.5 150 0.0 22.5 0.05 -azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0                      -standardize sills? (0=no, 1=yes)
1                      -number of variograms
1 1 1                  -tail var., head var., variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.16- Arquivo de parâmetros usado na construção dos variogramas experimentais horizontais dos dados normalizados (3D) de vagarosidade de onda acústica, em coordenadas estratigráficas, nas direções azimutais de 112,5°, 135°, 157,5° e 180°.**

```

Parameters for SGSIM
*****

START OF PARAMETERS:
ns_zstratcpeso.out          -file with data
1 2 3 6 5 0                - columns for X,Y,Z,vr,wt,sec.var.
-800.0      1.0e21          - trimming limits
0                            -transform the data (0=no, 1=yes)
simz3_89.trn                - file for output trans table
0                            - consider ref. dist (0=no, 1=yes)
nada.out                    - file with ref. dist distribution
1 2                          - columns for vr and wt
50.17      199.82           - zmin,zmax(tail extrapolation)
1          50.17            - lower tail option, parameter
1          199.82           - upper tail option, parameter
1                            -debugging level: 0,1,2,3
simz3_89.dbg                -file for debugging output
simz3_89.out                -file for simulation output
1                            -number of realizations to generate
65      654200      50.0    -nx,xmn,xsiz
58      7443400    50.0    -ny,ymn,ysiz
585     -66.0      0.5     -nz,zmn,zsiz
69149                                -random number seed
3      16                            -min and max original data for sim
8                            -number of simulated nodes to use
0                            -assign data to nodes (0=no, 1=yes)
1      3                            -multiple grid search (0=no, 1=yes), num
2                            -maximum data per octant (0=not used)
1200.0  1200.0  2.5           -maximum search radii (hmax,hmin,vert)
0.0     0.0     0.0           -angles for search ellipsoid
49      49      11            -size of covariance lookup table
0       0.60    1.0           -ktype: 0=SK,1=OK,2=LVM,3=EXDR,4=COLC
../data/ydata.dat           - file with LVM, EXDR, or COLC variable
4                            - column for secondary variable
2      0.1                            -nst, nugget effect
1      0.6     0.0     0.0     0.0    -it,cc,ang1,ang2,ang3
          290.0  290.0  2.5     -a_hmax, a_hmin, a_vert
1      0.3     0.0     0.0     0.0    -it,cc,ang1,ang2,ang3
          100000.0 100000.0 100.0 -a_hmax, a_hmin, a_vert

```

Figura C.17- Arquivo de parâmetros usado na simulação sequencial Gaussiana dos dados normalizados de vagarosidade de onda acústica em coordenadas estratigráficas.

```

Parameters for GAM
*****

START OF PARAMETERS:
bk_simz3_60.out            -file with data
1 2 2                      - number of variables, column numbers
-90.0      1.0e21          - trimming limits
varbk_simz3_60Over.out    -file for variogram output
1                            -grid or realization number
65      654200      50.0    -nx,xmn,xsiz
58      7443400    50.0    -ny,ymn,ysiz
585     -66.0      0.5     -nz,zmn,zsiz
1 200                        -number of directions, number of lags
0 0 2                        -ixd(1),iyd(1),izd(1)
0                            -standardize sill? (0=no, 1=yes)
1                            -number of variograms
1 1 1                        -tail variable, head variable, variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

Figura C.18- Arquivo de parâmetros usado na construção do variograma experimental vertical dos dados simulados (realização 60) de vagarosidade de onda acústica (espaço original).

```

Parameters for GAM
*****

START OF PARAMETERS:
bk_simz3_60.out          -file with data
1 2 2                   - number of variables, column numbers
-90.0 1.0e21            - trimming limits
varbk_simz3_60.out      -file for variogram output
1                       -grid or realization number
65 654200 50.0          -nx,xmn,xsiz
58 7443400 50.0         -ny,ymn,ysiz
585 -66.0 0.5           -nz,zmn,zsiz
4 60                   -number of directions, number of lags
0 1 0                  -ixd(1),iyd(1),izd(1)
1 1 0                  -ixd(2),iyd(2),izd(2)
1 0 0                  -ixd(1),iyd(1),izd(1)
1 -1 0                 -ixd(2),iyd(2),izd(2)
0                       -standardize sill? (0=no, 1=yes)
1                       -number of variograms
1 1 1                  -tail variable, head variable, variogram type

type 1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram
9 = indicator semivariogram - continuous
10= indicator semivariogram - categorical

```

**Figura C.19-** Arquivo de parâmetros usado na construção do variograma experimental horizontal dos dados simulados (realização 60) de vagarosidade de onda acústica nas direções azimutais de 0°, 45°, 90° e 135° (espaço original).

## Apêndice D – Programas Desenvolvidos

Esse apêndice apresenta códigos fontes de programas que foram desenvolvidos durante o presente estudo, a fim de auxiliar no processamento dos dados. Esses códigos fontes foram escritos em linguagem Fortran 90.

### **D.1 Programa Cotacapa**

O programa cotacapa.exe foi desenvolvido para auxiliar no processo de “retro-transformação” dos valores de elevação em coordenadas estratigráficas para valores de elevação em coordenadas cartesianas. Esse programa repete os valores de uma coluna (com até 5000 linhas) o número de vezes desejado. O arquivo que se deseja modificar deve apresentar apenas uma coluna de valores. O código fonte desse programa é apresentado a seguir:

```
program cotacapa
  implicit none
  character(30)::filein,fileout
  real::A(5000)
  integer::i,nlin,nrepet,repete
  write (*,*) 'Banco de dados (nome e extensao):'
  read (*,*) filein
  write (*,*) 'Numero de pontos do grid cotacapa:'
  read (*,*) nlin
  write (*,*) 'Nome do arquivo de saida (nome e extensao):'
  read (*,*) fileout
```

```
write (*,*) 'Numero de pontos em z (elevacao):'  
read (*,*) nrepet  
Open (Unit=4, file=filein, action='read')  
Open (Unit=5, file=fileout, action='write')  
do i=1,nlin  
    read (4,*)A(i)  
enddo  
do repete=1,nrepet  
    do i=1,nlin  
        write (5,*)A(i)  
    enddo  
enddo  
close(4)  
close(5)  
end program cotacapa
```

## **D.2 Modificação do Programa Postsim.exe**

O programa postsim.exe (Deutsch e Journal, 1992) foi utilizado para o cálculo da média de valores pertencentes a um mesmo furo virtual. A modificação no código fonte desse programa foi realizada para que valores excluídos de um furo virtual não fossem considerados no cálculo da média. A seção do código fonte do programa postsim.exe onde ocorreram modificações é apresentada a seguir:

Compute the E-type?

```
fora=0  
  if(iout.eq.1) then  
    if(cut(nsim).lt.tmin) then  
      etype = UNEST  
    else  
      etype = 0.0  
      do is=1,nsim  
        if (cut(is).lt.tmin) then  
          fora=fora+1  
        end if  
      end do  
    end if  
  end if
```



```
        else
            etype = etype + cut(is)
        endif
    end do
    etype = etype / real(nsim-fora)
endif

write(lout,'(f9.4)') etype
```

### **D.3 Programa Excluir**

O programa `excluir.exe` foi criado para auxiliar na exclusão de valores abaixo da camada GCWS pertencentes aos arquivos de saída das realizações da sGs. Esse programa exclui valores da primeira até a n-ésima linha de um arquivo que contém apenas uma coluna de valores. O código fonte desse programa é apresentado a seguir:

```
program excluir
implicit none
character(30)::filein
real::A,B,nlin,fora,linha
write (*,*) 'Banco de dados (nome e extensao):'
read (*,*) filein
write (*,*) 'Numero de linhas no banco de dados:'
read (*,*) nlin
Open (Unit=4, file=filein, action='read')
Open (Unit=5, file='saida.txt', action='write')
fora=0
do linha = 1,nlin
    read (4,*)A,B
        if (linha>501410)then
            write (5,'(F11.5)')B
        else
            fora=fora+1
        endif
    enddo
```

```
                end if  
  
            enddo  
  
        close(4)  
  
        close(5)  
  
        write (*,*)fora  
  
    end program excluir
```