

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

**ABORDAGEM PROBABILÍSTICA NA AVALIAÇÃO  
DE DEPÓSITOS DE ARGILA CERÂMICA**

*Roger Luis Stangler*

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS  
2001

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

**ABORDAGEM PROBABILÍSTICA NA AVALIAÇÃO  
DE DEPÓSITOS DE ARGILA CERÂMICA**

***Roger Luis Stangler***

Geólogo

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e 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

2001

Esta 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 – IG/UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
Coordenador do PPGEM

La Nature est un temple où de vivants piliers  
Laisent parfois sortir de confuses paroles;  
L'homme y passe à travers des forêts de symboles  
Qui l'observent avec des regards familiers.

Comme de longs échos qui de loin se confondent  
Dans une ténébreuse et profonde unité,  
Vaste comme la nuit et comme la clarté,  
Les parfums, les couleurs et les sons se répondent.

*Charles Baudelaire*



Aos meus pais,  
por todo apoio e incentivo,  
e pela eterna dedicação.

# Agradecimentos

Ao Professor Dr. João Felipe Costa, por sua eficiente orientação, incentivo, amizade e companheirismo, além do saudável convívio.

Aos membros da banca examinadora, pelas correções, sugestões, comentários e críticas, que aprimoraram essa dissertação.

À Dra. Margaret Armstrong, pela orientação em Fontainebleau.

À UFRGS, em especial ao LPM, por propiciar condições adequadas para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa.

A todos os colegas de laboratório, professores do DEMIN e funcionários, pela amizade e cooperação, em especial ao Eng. de Minas Sandro Schneider e ao Geól. Fernando Boff pela colaboração em algumas figuras, aos Engs. de Minas Gustavo Pilger e Sérgio Klein pelas discussões, à Eng. Civil Daiane Folle pelos comentários e ajuda nas revisões finais, aos então bolsistas de iniciação científica Evandro, Leandro e Paul pelo apoio computacional, e Zanuz, Cappone e Luís Eduardo pelo apoio na topografia, ao Geól. Ivan de Oliveira pela participação nos trabalhos de campo, ao Professor Dr. Adelir Strieder pelas discussões geológicas, e ao Geólogo Roberto Romano Neto pelo companheirismo nas disciplinas do Mestrado.

Ao Grupo Eliane (Cocal do Sul/SC), em especial aos Geólogos Márcio Geremias e Jorge Christ, pelo banco de dados utilizado gentilmente concedido.

À minha esposa Rose, que com seu amor e paciência soube validar o esforço desse trabalho, e à minha filha Bianca que com o brilho de seus olhos iluminou a fase final da dissertação.

A todos os familiares e amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram na realização dessa dissertação.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

# Índice

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xxiii
Resumo.....	xxv
Abstract.....	xxvi
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Estado-da-Arte.....	3
1.2 Meta.....	6
1.3 Objetivos específicos da dissertação.....	7
1.4 Metodologia .....	7
1.5 Organização dessa dissertação.....	9
Capítulo 2 - Contexto Geológico e Industrial.....	10
2.1 Localização .....	11
2.2 Contexto Geológico.....	11
2.2.1 Geologia Regional.....	11
2.2.2 Geologia Local .....	16
2.3 Aspectos Cerâmicos Envolvidos .....	29
Capítulo 3 - Definição dos Recursos Geológicos .....	39
3.1 Considerações Preliminares .....	40
3.2 Análise Exploratória dos Dados .....	44
3.2.1 Topografia .....	44
3.2.2 Banco de Dados.....	48
3.2.2.1 Limites Definitivos .....	50
3.2.2.2 Características Amostrais.....	54

3.3 Modelamento de Continuidade Espacial: Variografia.....	71
3.3.1 Planície .....	74
3.3.2 Tálus .....	78
3.3.3 Tendências Gerais .....	80
3.4 Estimativa e Classificação da Argila .....	81
3.4.1 Método de Krigagem .....	82
3.4.1.1 Krigagem Ordinária em Blocos .....	84
3.4.2 Resultados Obtidos.....	86
3.4.2.1 Planície .....	91
3.4.2.2 Tálus .....	96
3.4.2.3 Transição .....	100
3.5 Relação Estéril/Minério .....	104
3.6 Discussão dos Resultados.....	105
 Capítulo 4 - Análise das Reservas Recuperáveis .....	 107
4.1 Campo da Geoestatística Não-Linear .....	108
4.2 Definição de Reservas Recuperáveis .....	109
4.2.1 Reservas Recuperáveis X Reservas <i>in situ</i> .....	109
4.2.2 Reservas Recuperáveis na Extração de Argila Cerâmica.....	116
4.3 Simulações Estocásticas .....	117
4.3.1 Uso de Simulações em Reservas Recuperáveis	123
4.3.2 Simulação Seqüencial Gaussiana.....	126
4.3.3 Simulações no Subdomínio Planície.....	129
4.3.3.1 Mudança de Suporte <i>a posteriori</i> .....	130
4.3.3.2 Número de Realizações Obtidas.....	133
4.3.3.3 Espessura de Argila .....	135
4.3.3.4 Variáveis de Qualidade .....	141
4.4 Variabilidade da Argila no Subdomínio Planície.....	144
4.5 Reservas Recuperáveis de Argila no Subdomínio Planície	149
4.5.1 Avaliação Local .....	150
4.5.1.1 Critérios Mineiros .....	150
4.5.1.2 Critérios Cerâmicos.....	151

4.5.1.3	Combinação de Critérios Mineiros e Cerâmicos.....	155
4.5.2	Avaliação Global .....	159
4.5.2.1	Critérios Mineiros .....	160
4.5.2.2	Critérios Cerâmicos.....	163
4.5.2.3	Combinação de Critérios Mineiros e Cerâmicos.....	167
4.5.2.4	Comparativo com Outras Metodologias.....	171
4.6	Discussão dos Resultados .....	177
Capítulo 5 - Conclusões e Recomendações .....		179
5.1	Conclusões .....	179
5.1.1	Sumário dos Resultados Obtidos.....	179
5.1.2	Proposta Metodológica .....	180
5.1.3	Atendimento a Objetivos Específicos.....	182
5.2	Recomendações .....	184
Referências Bibliográficas.....		186
Apêndices .....		192
Apêndice A - Publicações Associadas à Essa Dissertação		
Apêndice B - Procedimentos Laboratoriais		
Apêndice C - Banco de Dados de Sondagem		
Apêndice D - Caracterização Global do Depósito		
Apêndice E - Considerações sobre o Método de ssG		
Apêndice F - Normalização		
Apêndice G - Testes de Bigaussianidade		
Apêndice H - Número de Realizações		
Apêndice I - Validações das Simulações		
Apêndice J - Independência de Probabilidades		

# Lista de Figuras

- Figura 1.1 Seqüência metodológica adotada..... 8
- Figura 2.1 Localização da área de estudo (distâncias em km). Fonte: Mapa Brasil - Quatro Rodas, 1994 ..... 12
- Figura 2.2 Contexto geológico e topográfico local da área de estudo (mapa-base: cópia parcial da Carta de São Bento Baixo, IBGE, escala original 1:50.000, coordenadas UTM)..... 13
- Figura 2.3 Geologia regional da área de estudo estudo (adaptada do Atlas de Santa Catarina, SEPLAN/SC, 1986)..... 14
- Figura 2.4 Contexto geológico regional da área em estudo (mapa-base: Carta Geológica de Turvo, CPRM, 1986, escala original 1:100.000, Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná)..... 15
- Figura 2.5 Fotografia aérea à esquerda e mapa topográfico à direita, ambos na mesma escala. Dois subdomínios geológicos são indicados no interior da área pesquisada (quadrado em vermelho): “t” para tálus e “p” para planície. Equidistância das curvas de nível: 5 m..... 18
- Figura 2.6 Visão parcial da área sondada (delimitada em vermelho) em primeiro plano, mostrando logo à montante do extremo NW as cabeceiras do canal principal do leque aluvial, e ao fundo os contrafortes da Serra Geral..... 19

Figura 2.7	Seções verticais esquemáticas cortando os dois subdomínios geológicos da área pesquisada (locados no mapa acima em vermelho; asterisco azul: local da foto da Figura 2.8) .....	21
Figura 2.8	Afloramento em corte vertical mostrando depósito de tálus com seixos imbricados jazendo sobre a argila aluvial (local da foto indicado na Figura 2.7) .....	22
Figura 2.9	Visão da área de SW para N, mostrando aproximadamente os limites do depósito de tálus no sopé do morro a N da área. ....	22
Figura 2.10	Vista da área de N para S, com limites aproximados dos dois domínios geológicos (« t » = tálus; « p » = planície).....	24
Figura 2.11	Fotografia aérea da região da área de estudo e fotointerpretação.....	26
Figura 2.12	Fotointerpretação de detalhe .....	27
Figura 2.13	Corte aberto para extração experimental de argila aproximadamente no centro da área pesquisada.....	28
Figura 3.1	Mapa base contendo a delimitação da área sondada (coordenadas XY locais em metros, adotadas para a malha de sondagem; altitudes indicadas acima do nível do mar) .	46
Figura 3.2	Mapa de relevo da área estudada, contendo informações topográficas e locação dos furos de trado executados (exagero vertical: 3 X; altitudes acima do nível do mar) .....	47
Figura 3.3	Elevação topográfica para a área de estudo. Coordenadas XYZ locais, em metros.....	47

- Figura 3.4 Locação de todos os furos de trado em malha 25x25m, mostrando amostras removidas em (a), e campo amostral definitivo, com contato geológico transicional demarcado em linha contínua (“T” = tálus; “P” = planície) em (b) ..... 53
- Figura 3.5 Mapa base com os valores amostrais de espessura na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar. .... 57
- Figura 3.6 Mapa base com os valores amostrais de absorção d’água na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar. .... 58
- Figura 3.7 Mapa base com os valores amostrais de retração linear na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar ..... 59
- Figura 3.8 Mapas de valores amostrais de acumulação de absorção d’água (a), e de acumulação de retração linear (b). Valores em %.m. .... 60
- Figura 3.9 Mapas de valores amostrais de acumulação de absorção d’água (a), e de acumulação de retração linear (b). Valores em %.m..... 61
- Figura 3.10 Distribuição amostral original (a) e desagrupada (b) para espessura ..... 63
- Figura 3.11 Distribuições amostrais de absorção d’água (a) e retração linear (b), ponderadas com espessura dos intervalos correspondentes. Histogramas de frequência acumulada,



- contendo os intervalos de classificação cerâmica, são mostrados em (c) para absorção d'água, e (d) para retração linear..... 64
- Figura 3.12 Distribuição amostral original (a) e desagrupada (b) para acumulação de absorção d'água, e acumulação de retração linear, respectivamente (c) e (d)..... 65
- Figura 3.13 Diagramas de correlação entre: (a) absorção d'água e retração linear, mostrando os limites de classificação cerâmica; (b) as duas acumulações; (c) absorção d'água e espessura; (d) retração linear e espessura; (e) acumulação de absorção d'água e espessura; (f) acumulação de retração linear e espessura ..... 66
- Figura 3.14 Histograma da espessura ..... 67
- Figura 3.15 Histograma original de absorção d'água (a) e retração linear (b), apresentando valores ponderados com espessura dos intervalos correspondentes. Histogramas de frequência acumulada, contendo os intervalos de classificação cerâmica, são mostrados em (c) para absorção d'água, e (d) para retração linear..... 69
- Figura 3.16 Distribuição amostral original para acumulação de absorção d'água (a), e acumulação de retração linear (b) ..... 69
- Figura 3.17 Diagramas de correlação entre: (a) absorção d'água e retração linear, mostrando os limites de classificação cerâmica; (b) as duas acumulações; (c) absorção d'água e espessura; (d) retração linear e espessura; (e) acumulação de absorção d'água e espessura; (f) acumulação de retração linear e espessura ..... 70

- Figura 3.18 Modelos variográficos (linhas contínuas) ajustados para o subdomínio planície, com base nos valores de variogramas experimentais (pontos), nas direções de máxima e mínima continuidade respectivamente para espessura (a)(b), acumulação de absorção d'água (c)(d), e acumulação de retração linear (e)(f). ..... 77
- Figura 3.19 Modelos variográficos (linhas contínuas) ajustados para o subdomínio tálus, com base nos valores de variogramas experimentais (pontos), nas direções de máxima e mínima continuidade respectivamente para espessura (a)(b), acumulação de absorção d'água (c)(d), e acumulação de retração linear (e)(f) ..... 79
- Figura 3.20 Sumário das direções de maior continuidade espacial para as variáveis regionalizadas em estudo nos dois subdomínios. .... 81
- Figura 3.21 Aproximação da relação de continuidade espacial (covariância ou variograma) ponto amostral/bloco pela relação ponto amostral/pontos discretizadores do bloco. Fonte: Goovaerts (1997, p.155)..... 85
- Figura 3.22 Comparativo de resultados finais entre estimações a partir dos modelos variográficos da planície contra estimações a partir dos modelos variográficos do tálus, para os blocos krigados na zona de transição, variáveis espessura (a), absorção d'água (b) e retração linear (c)..... 89
- Figura 3.23 Transformação dos originalmente dois subdomínios geológicos/geoestatísticos em três subdomínios de estimativa, com a adição da "transição" como subdomínio independente ..... 90

- Figura 3.24 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d)..... 93
- Figura 3.25 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável retração linear (%) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 94
- Figura 3.26 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável espessura (m) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 95
- Figura 3.27 Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados no subdomínio planície..... 96
- Figura 3.28 Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b)..... 96
- Figura 3.29 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 97

- Figura 3.30 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável retração linear (%) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 98
- Figura 3.31 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável espessura (m) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 99
- Figura 3.32 Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados: subdomínio tálus..... 100
- Figura 3.33 Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), subdomínio tálus..... 100
- Figura 3.34 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d)..... 101
- Figura 3.35 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável retração linear (%) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d)..... 102

- Figura 3.36 Resultados da krigagem em blocos 25x25m para a variável espessura (m) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d) ..... 103
- Figura 3.37 Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados: subdomínio transição..... 104
- Figura 3.38 Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), subdomínio transição..... 104
- Figura 4.1 Comparativo do teor real  $Z$  x teor estimado  $Z^*$  para blocos, estimando pelos métodos de polígonos de influência (à esquerda) e krigagem (à direita). Extraído de Marechal (1976a), em David (1977, p.309) ..... 113
- Figura 4.2 Recuperações estimadas para um dado teor de corte  $z_0$  ( $F$  freqüência): (a) influência do suporte [ $s^2(v/G)$  e  $s^2(c/G)$ : respectivamente variâncias de dispersão bloco/depósito e ponto/depósito]; (b) influência do padrão de informação [ $s^2_{\kappa^*}(v/G)$ : variância de dispersão dos blocos krigados no depósito  $G$ ]. Extraído de Journel & Huijbregts (1978, p.447 e 450)..... 114
- Figura 4.3 Exemplo ilustrativo de cabo submarino: (a) levantamento do fundo oceânico com espaçamento amostral de 100 m; (b) krigagem do fundo oceânico; (c) levantamento contínuo (verdadeiro perfil); (d) simulação condicional baseada em dados amostrais espaçados de 100 m, comparada com verdadeiro perfil. Extraído de Alfaro (1979), em Chilès & Delfiner (1999 p.450) ..... 119

- Figura 4.4 Quatro realizações da variável espessura na malha de alta resolução 1x1 m tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações ; abaixo, mapa amostral de referência ..... 137
- Figura 4.5 Quatro realizações da variável espessura em blocos 25x25 m, correspondentes àquelas apresentadas na Figura 4.5 no suporte quase-pontual (extraídas do grupo de cinquenta simulações); abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária ..... 139
- Figura 4.6 Quatro realizações da variável absorção d'água em blocos 25x25 m, tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações; abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária ..... 142
- Figura 4.7 Quatro realizações da variável retração linear em blocos 25x25 m, tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações; abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária ..... 143
- Figura 4.8 Médias bloco-a-bloco (*E-type*) das cinquenta realizações para espessura (a), absorção d'água (c) e retração linear (e), mostrando para bloco destacado no centro-oeste da área histogramas de variabilidade para valores simulados em cada variável, respectivamente (b), (d) e (f). Para as variáveis de qualidade são demarcadas nos histogramas os intervalos aceitáveis para argila cerâmica, quando as variáveis são consideradas individualmente ..... 146
- Figura 4.9 Mapas de variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) para as três variáveis: (a) absorção d'água; (b) retração linear; e (c) espessura..... 148

- Figura 4.10 Mapas de probabilidade em exceder bloco-a-bloco espessuras mínimas de: (a) 0,50m; (b) 0,70m; (c) 0,80m; (d) 1,00m..... 151
- Figura 4.11 Probabilidades bloco-a-bloco de ocorrência de argila tipo Monoporosa no suporte 25x25 m (a) somadas às probabilidades de ocorrência de argila tipo Biqueima (b) resultam nas probabilidades totais de ocorrência de argila cerâmica (c) ..... 154
- Figura 4.12 Diagrama de correlação entre probabilidades de ocorrência de argila cerâmica (Prob. A.C.) e probabilidades de espessura  $\geq 0,80$  m (=Prob. Esp. 0,80m), bloco-a-bloco . 158
- Figura 4.13 Mapas de probabilidades conjuntas bloco-a-bloco de ocorrência de argila cerâmica acima de determinadas espessuras: (a) 0,50m; (b) 0,70m; (c) 0,80m; (d) 1,00m.. 159
- Figura 4.14 Curvas mostrando cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis segundo diferentes níveis de seletividade mineira ..... 161
- Figura 4.15 Curvas mostrando cenários extremos e mediano de recuperação em  $t/m^2$  segundo diferentes níveis de seletividade mineira ..... 163
- Figura 4.16 Curvas mostrando cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis segundo diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica medidos bloco-a-bloco. .... 164
- Figura 4.17 Valores simulados médios de absorção d'água para diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica (suporte 25x25 m)..... 166

- Figura 4.18 Valores simulados médios de retração linear para diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica (suporte 25x25 m)..... 166
- Figura 4.19 Cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica (50, 80 e 100%) e sete diferentes níveis de seletividade mineira (P = chance de ocorrência de argila cerâmica; Ot = cenário otimista; Med = cenário mediano; Pes = cenário pessimista)..... 169
- Figura 4.20 Mapas de espessura recuperável de argila conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica e três diferentes níveis de seletividade mineira (P = chance de ocorrência de argila cerâmica; EM = espessura mínima minerável) ..... 171
- Figura 4.21 Curvas de reservas recuperáveis estimadas por krigagem ordinária em blocos (argila cerâmica = argila biqueima + argila monoporosa) ..... 172
- Figura 4.22 Curvas de parametrização de reservas obtidas a partir de: s1x1 = simulações no suporte 1m x 1m; s25x25med = simulações no suporte 25m x 25m (cenário mediano); k25x25 = krigagem de blocos 25m x 25m; Pol Infl = polígonos de influência em blocos 25m x 25m ..... 174
- Figura D.1 Espessura estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste .....Apêndice D
- Figura D.2 Retração Linear estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste .....Apêndice D



- Figura D.3 Absorção d'água estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste .....Apêndice D
- Figura D.4 Localização dos blocos 25x25m classificados como Estéril e Minério .....Apêndice D
- Figura D.5 Distribuição espacial de blocos estéreis e de minérios .....Apêndice D
- Figura D.6 Combinação da espessura estimada da camada de argila, em relevo, com os blocos classificados como "estéril", "argila biqueima" e "argila monoporosa" , em diferentes visadas .....Apêndice D
- Figura D.7 Combinação em diferentes visadas da espessura estimada da camada de argila, em relevo, com os atributos de qualidade (parâmetros industriais) estimados em blocos .....Apêndice D
- Figura D.8 Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), depósito total .....Apêndice D
- Figura D.9 Distribuição de percentuais dos recursos geológicos totais (independente de classificação) por subdomínio..Apêndice D
- Figura D.10 Distribuição de percentuais da argila classificada como cerâmica (total dos dois tipos) por subdomínio.....Apêndice D
- Figura D.11 Distribuição de percentuais da argila classificada como fora dos padrões, por subdomínio .....Apêndice D
- Figura D.12 Distribuição de percentuais da argila classificada como Monoporosa, por subdomínio .....Apêndice D

Figura D.13 Distribuição de percentuais da argila classificada como Biqueima, por subdomínio .....Apêndice D

Figura E.1 Simulação de Monte-Carlo gerada a partir de uma função de distribuição cumulativa  $F[u;z|(n)]$ . O "elésimo" valor simulado  $z^{(l)}(u)$  é obtido como o quantil  $p^{(l)}$  dessa distribuição condicional, onde  $p^{(l)}$  é um número randômico uniformemente distribuído em  $[0,1]$ . Extraído de Goovaerts (1997, p.352).....Apêndice E

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Análise mineralógica por difratometria de raios-X de argila da Planície.....	25
Tabela 2.2	Análise química de argila da Planície, por fluorescência de raios-X.....	25
Tabela 2.3	Especificações para os dois tipos de argila cerâmica.....	37
Tabela 3.1	Resumo das estatísticas básicas para todas as variáveis nos dois subdomínios.....	71
Tabela 3.2	Modelos de continuidade espacial (semi-variogramas) para as três variáveis regionalizadas, subdomínio planície.....	78
Tabela 3.3	Modelos de continuidade espacial (semi-variogramas) para as três variáveis regionalizadas, subdomínio tálus.....	80
Tabela 3.4	Número de blocos estimados em cada subdomínio e respectivas extensões em área.....	91
Tabela 4.1	Comparativo entre variâncias de espessura ( $m^2$ ). A variância amostral (pontual) é calculada sobre os dados desagrupados, enquanto os valores de variância obtidos das simulações nos dois suportes representam as médias de variâncias para as 50 realizações.....	140

Tabela 4.2	Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano segundo diferentes níveis de seletividade mineira, mostrando entre parênteses oscilações percentuais em relação a valores medianos .....	162
Tabela 4.3	Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano segundo diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica, mostrando entre parênteses oscilações percentuais em relação a valores medianos ...	165
Tabela 4.4	Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica e diferentes níveis de seletividade mineira .....	170
Tabela 4.5	Quadro de reservas recuperáveis estimado por krigagem ordinária em blocos, segundo diferentes níveis de seletividade mineira .....	173
Tabela 4.6	Quadro de reservas recuperáveis (t) estimado por diferentes métodos e suportes .....	176
Tabela D.1	Quadro-resumo de recursos geológicos medidos (t).Apêndice D	

# Resumo

A argila é uma matéria-prima básica nos processos de fabricação de pisos e azulejos. Especificações industriais devem ser cumpridas para sua utilização como componente das formulações cerâmicas. A homogeneidade é vital. Nos depósitos minerais fonte desse material, as características cerâmicas da argila, sua representatividade, variabilidade e interação com a geologia local precisam ser bem conhecidas, a fim de propriamente quantificá-la e classificá-la de forma georeferenciada. Isso consubstancia a tomada de decisões mineiras relacionadas. Essa dissertação apresenta uma alternativa metodológica de avaliação de recursos geológicos e reservas recuperáveis de argila cerâmica, em uma perspectiva probabilística. Métodos geoestatísticos como krigagem e simulação estocástica são aplicados em suporte de blocos de lavra. Recursos geológicos ocorrentes nos diversos setores de um depósito estudado são estimados acuradamente. Em sua porção mais favorável reservas recuperáveis são avaliadas, sob critérios cerâmicos e de seletividade mineira, tomados separadamente e em conjunto, em escala global e local. Para o estudo de caso apresentado, duas propriedades cerâmicas pós-queima são consideradas, absorção d'água e retração linear, além da espessura do horizonte argiloso. Modelos de cenários extremos e medianos de reservas são construídos, flexibilizando a apreciação do quadro geral obtido, e permitindo assim maior segurança na condução de decisões e eventuais operações mineiras. Comparativos com métodos tradicionalmente utilizados na avaliação deste tipo de depósitos, em suas diversas fases, comprovam as vantagens da metodologia proposta, a qual permite, além da quantificação e classificação cerâmica de reservas, uma incorporação de margem de riscos nas predições realizadas.

# Abstract

Clay is a key raw material in the wall and floor tiles manufacturing. Industrial specifications must be fulfilled for clay utilization as component into the ceramic formulations. Homogeneity is vital. In the mineral deposit, source of this material, the ceramic clay characteristics and their representativity, variability, and interaction with the local geology must be well known, in order to properly quantify and classify each portion of the deposit. This brings foundation to the related mining decision-making processes. This dissertation presents a methodology for resource/reserve assessment of ceramic clay, using a probabilistic perspective. Established geostatistical methods such as kriging and stochastic simulations are applied at a mining block support. Geological resources of a given deposit are accurately estimated. In its more favorable sector, recoverable reserves are evaluated under ceramic and mining selectivity criteria, taken either individually or jointly, globally and locally. For the presented case study, two post-firing ceramic properties are considered, water absorption and linear retraction, both measured in percentage, besides the clay seam thickness, in meters. Extreme and median reserves scenarios are modeled, enhancing decision making in mining alternatives. Comparisons with traditional methods used to evaluate this type of deposits proves the advantages of the proposed methodology, which allows, besides the quantification and ceramic classification of reserves, risk assessment.

# Capítulo 1

## Introdução

O setor de minerais industriais encontra-se atualmente em franca expansão, tanto em uso quanto em produção. Entre os minerais industriais incluem-se aqueles usados na indústria cerâmica, onde a argila é um ingrediente básico como matéria-prima nos processos de fabricação de pisos e azulejos. Além de vários tipos de argila e argilito, nas massas cerâmicas é usada uma combinação em proporções variáveis de: areia/arenito, caulim, talco, feldspato, e outros. Nas formulações cerâmicas, cada um dos componentes deve cumprir requisitos básicos em termos de especificações industriais (parâmetros de qualidade), sendo importante além disso manter a homogeneidade de suas características.

Nos depósitos fonte de matéria-prima cerâmica, as características da argila a ser minerada, incluindo vários parâmetros físicos e químicos, precisam ser devidamente conhecidas ao longo de todo depósito para guiar os trabalhos mineiros em geral. Isto requer uma classificação adequada da argila ocorrente, de forma georeferenciada, juntamente com uma compreensão dos aspectos geológicos associados. Não raro, minas são abertas com base apenas em características médias dos parâmetros, provenientes de poucas análises realizadas, sendo assim difícil antecipar a performance do material a ser extraído nos processos cerâmicos subsequentes. Frequentemente, isto traz surpresas desagradáveis durante a exploração ao longo da vida útil da jazida.

Mesmo nos casos onde há uma tentativa de classificação local da argila ocorrente, métodos tradicionais de estimativa, tais como polígonos de influência, têm se mostrado incapazes de caracterizar adequadamente os depósitos de argila. As limitações ocorrem tanto no tocante à definição dos limites reais das porções mais favoráveis do depósito quanto à sua variabilidade. Além disso, a acuracidade das estimativas propriamente ditas é deficiente neste tipo de avaliação.

Na tomada de decisões importantes tais como: (i) escolher qual depósito deve ser minerado primeiro entre algumas alternativas (avaliação global); (ii) qual parte do depósito escolhido deve ter prioridade (avaliação local); (iii) que grau de seletividade deve ter equipamento e método a ser usado na lavra, e ainda; (iv) uma avaliação dos riscos envolvidos em um empreendimento mineiro, é fundamental uma quantificação das incertezas associadas com as estimativas. Essas incertezas devem ser avaliadas tanto em termos de oscilação das reservas recuperáveis calculadas e relação estéril/minério, quanto na variabilidade das características cerâmicas destas, não apenas antevendo valores estimados fixos.

Devido à complexidade dos processos cerâmicos e sua dependência na qualidade dos diferentes componentes minerais utilizados, um modelamento geológico apropriado é vital para minimizar variações na linha de produção das fábricas. Essas oscilações causam consideráveis perdas financeiras, fazendo com que uma boa previsão de sua magnitude seja fundamental no planejamento e condução das atividades mineiras relacionadas.

No contexto delineado acima insere-se o presente trabalho, onde através de um estudo de caso é proposta uma metodologia geoestatística de avaliação de depósitos de minerais industriais deste tipo. A partir de métodos geoestatísticos, são classificados e quantificados recursos geológicos e reservas recuperáveis, segundo níveis diversos de seletividade. A incorporação de incertezas nestas estimativas é também aqui desenvolvida, indicando riscos associados, balizando assim a tomada de decisões mineiras.



## 1.1 Estado-da-Arte

Poucos trabalhos têm sido publicados com aplicações de geoestatística no campo cerâmico ou relacionado de alguma forma com argilas. Entretanto, vários trabalhos têm sido publicados versando sobre metodologias aplicadas em estudos de casos mineiros, em especial no que tange às inter-relações da avaliação geoestatística e geologia, e no que concerne à quantificação de reservas recuperáveis e incertezas envolvidas. Embora geralmente direcionados para outros tipos de substâncias minerais, estes trabalhos apresentam elementos de aplicação geral e por isso serão aqui referenciados.

Uma aplicação de geoestatística multivariada em depósitos de bentonita é desenvolvida por Borgman & Frahme (1975). Um exemplo de aplicação ampla de simulações condicionais para problemas de variabilidade em minerais industriais (no caso, calcário para cimento) é apresentado por Luster (1985). Peroni (1998) introduz uma variável espectro-colorimétrica no modelamento e planejamento de lavra de caulim, utilizando krigagem. Durão et al. (1999) avaliam a otimização da produção de massas cerâmicas modelando as propriedades físicas e químicas dos componentes argilosos, aplicando modelos de regressão baseados em lógica *fuzzy*. Stangler (1999) reporta um estudo de caso abordando a classificação de minério usando krigagem, no mesmo depósito de argila aqui estudado. A aplicação de simulações condicionais em depósito de caulim é apresentada por Peroni et al. (2000). A variabilidade da granulometria *in situ* de um depósito de caulim, culminando na parametrização de reservas, é estudada por Silva et al. (2000). Entretanto a abordagem aqui proposta, qual seja a classificação e parametrização de reservas, incorporando ao mesmo tempo a quantificação de incertezas no dimensionamento de reservas e em seus parâmetros de qualidade, para o campo específico de argilas cerâmicas a partir de amostras com suportes variáveis, é praticamente inédita na literatura relacionada.

A análise bidimensional, em depósitos estratiformes de condições geométricas semelhantes ao depósito em questão, é apresentada em Journel & Huijbregts (1978, p.386-391), em termos de plano de krigagem para depósito de laterita níquelífera, e David (1977, p.89-90), abordando o impacto

da espessura em acumulações. Casos semelhantes de trabalhos em suporte não constante, onde são utilizadas variáveis de trabalho como acumulações, são reportados por Matheron para depósito de bauxita [1962 (em Journel & Huijbregts, 1978 p.244-247)], Deraysme [1976 (em Journel & Huijbregts, 1978 p.285-293)] em depósito de níquel e Krige (1981) em depósito de cobre. Estimativas de quocientes ou produtos, incluindo acumulações com espessura, como no estudo de caso presente, são referenciadas em David (1977, p.221) e Journel & Huijbregts (1978, p.424-428).

Simulações condicionais são introduzidas originalmente por Journel (1974). Diferenças básicas entre estimativas e simulações, bem como princípios básicos de simulações condicionais, são desenvolvidos em Journel & Huijbregts (1978, Cap.VII), além da abordagem à simulação de blocos (p.511-517). Métodos de modelamento local e global de incertezas espaciais, a partir da utilização de simulações condicionais, são discutidos em Goovaerts (1997, Caps.7 e 8). Com rigorismo matemático mas sem deixar de ser eminentemente aplicativo, são apontadas e discutidas as limitações da krigagem, em função da freqüentemente indesejável suavização dos valores estimados. Há também o caráter discutível da variância de krigagem enquanto medida de qualidade de estimativa, levando-se em conta que em seu cálculo são desconsiderados os valores amostrais.

Métodos de simulação de variáveis contínuas e categóricas são desenvolvidos por Isaaks (1990), Deutsch (1992) e Dimitrakopoulos (1996). Alabert (1987a e 1987b) e Zhu (1991) apresentam novos métodos de simulação associando informações de diferentes fontes e grau de precisão.

Os principais algoritmos de simulação condicional, com ênfase de aplicação ao método de simulação seqüencial Gaussiana são apresentados, discutidos e comparados entre si em Goovaerts (1997, p.374-436) e Deutsch & Journel (1998, Cap.5). As questões da aplicação de simulações estocásticas e do tratamento de quantificação de incertezas e intervalos de confiabilidade são apresentados em Olea (1999).

Os métodos de simulação geoestatística reunidos no grupo de algoritmos de simulação seqüencial, obtendo valores randomicamente simulados a partir de distribuições de probabilidades condicionais cumulativas locais são introduzidos e desenvolvidos por Johnson (1987) e

Journal & Alabert (1989). Alabert (1987b) introduz o método da simulação seqüencial da indicatriz.

Definições e diferenças entre reservas recuperáveis e *in situ* são discutidas em Journal & Huijbregts (1978, p.444-445). Entre os critérios mencionados nesta diferenciação está a espessura de minério para diferentes níveis de seletividade, como no presente estudo de caso.

Uma abordagem comparativa entre métodos de geoestatística linear e não-linear para a estimativa de reservas recuperáveis locais é apresentada em Remacre (1984), onde é desenvolvido o método do condicionamento uniforme. Roth & Deraisme (2000) levam em consideração o efeito informação no uso deste método para estimar reservas recuperáveis.

Simulações condicionais e a medida das incertezas denotando os riscos envolvidos tem um papel extremamente importante no processo de tomada de decisões mineiras. Seu uso inclui, por exemplo, a avaliação de incerteza em teores previstos para planejamento mineiro, e o papel das funções de transferência (Rossi & Alvarado, 1998). Rossi (1999) aborda o modelamento de riscos, quantificando incerteza numa base bloco-a-bloco. O efeito de incertezas geológicas em análises de risco no valor de um projeto mineiro é estudado em Thwaites (1998) e Bonato (2000). Uma medida apropriada de incertezas na avaliação de reservas recuperáveis, a partir da aplicação de simulações condicionais é discutida e testada em Costa (1997) e Dimitrakopoulos (1998). Stangler et al. (2001a), Apêndice A, apresentam uma aplicação de simulação seqüencial Gaussiana para prever variações em reservas recuperáveis no mesmo depósito avaliado aqui, porém sem a avaliação de incerteza na qualidade do minério.

Análises de reservas recuperáveis a partir de métodos de simulações são apresentadas em Journal & Huijbregts (1978, Cap.VI), e com o método de krigagem disjuntiva em Rivoirard (1994). Journal & Huijbregts (1978, p.445-449) analisam a influência do suporte, inclusive comparando com método de polígonos de influência.

A questão da influência do suporte e de distribuição consideradas para a recuperação de reservas segundo diferentes teores de corte e o impacto em curvas de parametrização de reservas são abordados em David (1977), Clark (1979, Cap.3), e David (1988).

Srivastava (1994) e Goovaerts (1997, p.333-340) descrevem vários métodos e medidas de avaliar e visualizar incertezas locais usando os resultados de simulações condicionais. Ehlschlaeger et al. (1997) e Pilger (2000) apresentam maneiras de visualizar incerteza em informações georeferenciadas usando efeitos de animação.

Aplicações geoestatísticas no campo da topografia são encontradas em várias publicações (Olea, 1974; Krige & Rendu, 1975; Clarke, 1986; Gilbert, 1989; Herzfeld et al., 1993; Luís et al., 1994; Schmitt & Bisquay, 2000). Deraisme (1976, não publicado, em Journel & Huijbregts, 1978, p.59-61) aplica krigagem na cartografia na geometria de depósito de níquel. Oliveira et al. (1995) aplicam métodos de krigagem para avaliação de volume de cobertura estéril em mina de carvão. O risco ou incertezas associadas com estimativa de volumes e suas conseqüências em projetos mineiros no tocante à avaliação estéril-minério são investigados com métodos de krigagem e simulações condicionais em Stangler et al. (2001b), Apêndice A, na mesma área aqui estudada.

Em suma, tendo-se em mente o estado-da-arte descrito acima, e levando-se em conta problemas rotineiros encontrados nesse meio mineral cerâmico, esta dissertação pretende partir de um estudo de caso para analisar diversos aspectos metodológicos envolvidos na avaliação de uma jazida de argila cerâmica, com destaque para a avaliação de reservas recuperáveis e incertezas relacionadas.

## **1.2 Meta**

A partir dos problemas apontados de classificação e variabilidade, e levando-se em consideração o estado-da-arte atual no campo e métodos envolvidos, a presente dissertação propõe:

⇒ desenvolver uma metodologia geoestatística de análise qualitativa e quantitativa de depósitos de argila para uso cerâmico, avaliando recursos geológicos e reservas recuperáveis de forma probabilística, incorporando e quantificando incertezas globais e locais (escala de bloco de lavra) nas estimativas, possibilitando assim a orientação a decisões mineiras.

### **1.3 Objetivos específicos da dissertação**

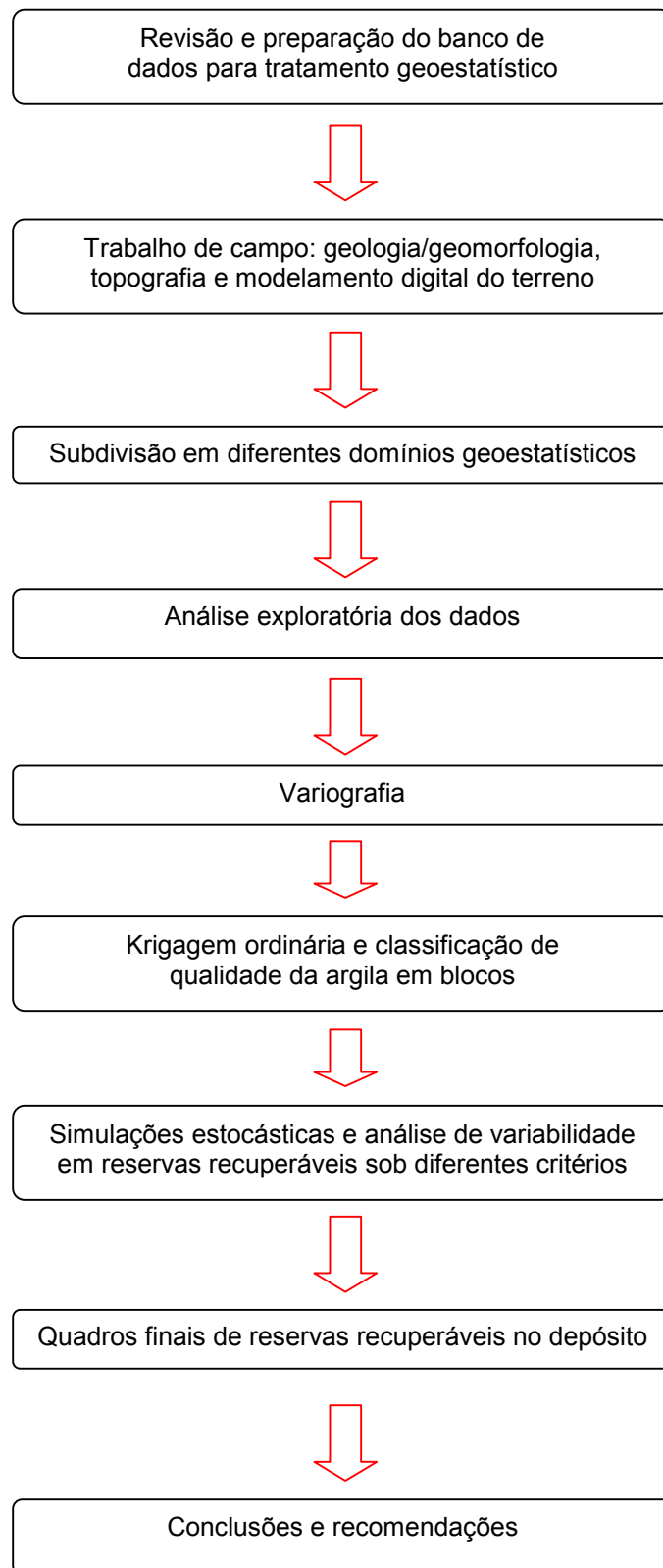
Através do estudo de caso de um depósito de argila cerâmica na região do pólo cerâmico de Criciúma/SC, a intenção dessa dissertação é atingir a meta proposta acima cumprindo os seguintes objetivos específicos:

- (i) integrar a geologia do depósito e o estudo geoestatístico, com o tratamento de dados em subdomínios geológicos/geoestatísticos homogêneos;
- (ii) caracterizar a variabilidade espacial das variáveis de interesse (parâmetros de qualidade e espessura da camada de argila);
- (iii) classificar e quantificar apropriadamente os recursos geológicos de argilas cerâmicas ocorrentes ao longo do depósito, no suporte de bloco de lavra, com base em parâmetros de qualidade estimados;
- (iv) avaliar probabilisticamente reservas recuperáveis, quantificando incertezas nas estimativas e na classificação da argila em blocos;
- (v) comparar resultados gerais obtidos com método tradicionalmente utilizado (polígonos de influência).

Ao atingir os objetivos acima listados, haverá um aprimoramento na tomada de decisões concernentes a investimentos em abertura de mina e no planejamento mineiro. Isso possibilitará a obtenção de matéria-prima cerâmica de qualidade e variabilidade mais favoráveis, como resultado do incremento no conhecimento global e local do depósito avaliado.

### **1.4 Metodologia**

Com base nos objetivos propostos, as etapas de trabalho representadas esquematicamente na Figura 1.1 foram desenvolvidas.



**Figura 1.1 - Seqüência metodológica adotada.**

## 1.5 Organização dessa dissertação

Os capítulos a seguir estão organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 introduz o estudo de caso a ser tomado como base para aplicabilidade do método proposto. Aspectos geológicos regionais e locais relevantes são apresentados, bem como os aspectos cerâmicos relacionados.

O capítulo 3 desenvolve a krigagem ordinária das variáveis envolvidas no suporte de blocos. As características do banco de dados utilizado, variáveis consideradas e estatísticas básicas são inicialmente introduzidos. Após, é apresentada a análise de continuidade espacial, na forma da variografia de todas as variáveis envolvidas, culminando no ajuste de modelos variográficos a serem utilizados nas estimativas e simulações subseqüentes. A partir dos valores estimados para as variáveis de qualidade, a argila ocorrente é classificada e quantificada, local e globalmente, nos diferentes subdomínios.

O capítulo 4 introduz inicialmente o conceito de reservas recuperáveis em avaliações de reservas, especialmente no caso de argila cerâmica. Após, revisa brevemente os princípios de simulações estocásticas, enfatizando o método aqui aplicado, de simulação seqüencial Gaussiana (ssG), e situando as diferenças de estimativas e implicações na avaliação de depósitos de minerais industriais cerâmicos. A seguir, apresenta a seqüência das simulações realizadas com as variáveis de interesse no estudo de caso. Finalmente, o quadro de reservas recuperáveis obtido a partir das simulações realizadas é apresentado, incluindo a análise de incertezas associadas nas predições. As incertezas são quantificadas a nível mineiro (espessuras mínimas mineráveis), a nível industrial (parâmetros de qualidade), e finalmente numa combinação dos dois critérios.

O capítulo 5 fecha essa dissertação, apresentando as conclusões obtidas a partir dos trabalhos realizados, bem como recomendações para trabalhos a seguir.

## Capítulo 2

### Contexto Geológico e Industrial

A metodologia aqui proposta toma como base um banco de dados composto de amostras oriundas de sondagem a trado manual, realizada em uma área de argila cerâmica no Sul do Estado de Santa Catarina. Tal área já foi abordada em trabalhos anteriores, sob diversos aspectos (Stangler, 1999; Stangler et al., 2001a e Stangler et al., 2001b, Apêndice A).

A região em foco tem sido desde o início do século um importante distrito carbonífero. Como as camadas de carvão encontram-se intimamente associadas a camadas de folhelhos, argilitos e siltitos, as atividades de “cerâmica branca” (envolvendo a fabricação de pisos e azulejos de cor de queima clara) iniciaram o seu desenvolvimento nos anos 60 a partir da constatação da grande potencialidade para ocorrência de matéria-prima cerâmica. Até então, esse material era encarado como rejeito nas minas de carvão, como até hoje o é nas minas do Estado do Rio Grande do Sul. Hoje em dia essa região constitui o segundo maior pólo cerâmico no Brasil e um dos maiores do mundo.

Ao longo deste capítulo, serão discutidos, logo após informações sobre localização e vias de acesso da área em estudo, os aspectos geológicos regionais e locais relevantes à avaliação geoestatística como um todo, bem como os aspectos cerâmicos relacionados.



## **2.1 Localização**

A área em estudo localiza-se na Região Sul do Brasil, S do Estado de Santa Catarina, Município de Nova Veneza, região de Criciúma (Figura 2.1). O acesso à área de Criciúma é feito inicialmente seguindo-se até Nova Veneza por via asfaltada (aproximadamente 17 km). Desta cidade, segue-se por 10 km aproximadamente em estradas não pavimentadas, em zona rural, até a localidade de São Bonifácio, imediatamente a S da área em estudo. De lá, por estradas de propriedade atinge-se o interior da área (Figura 2.2).

## **2.2 Contexto Geológico**

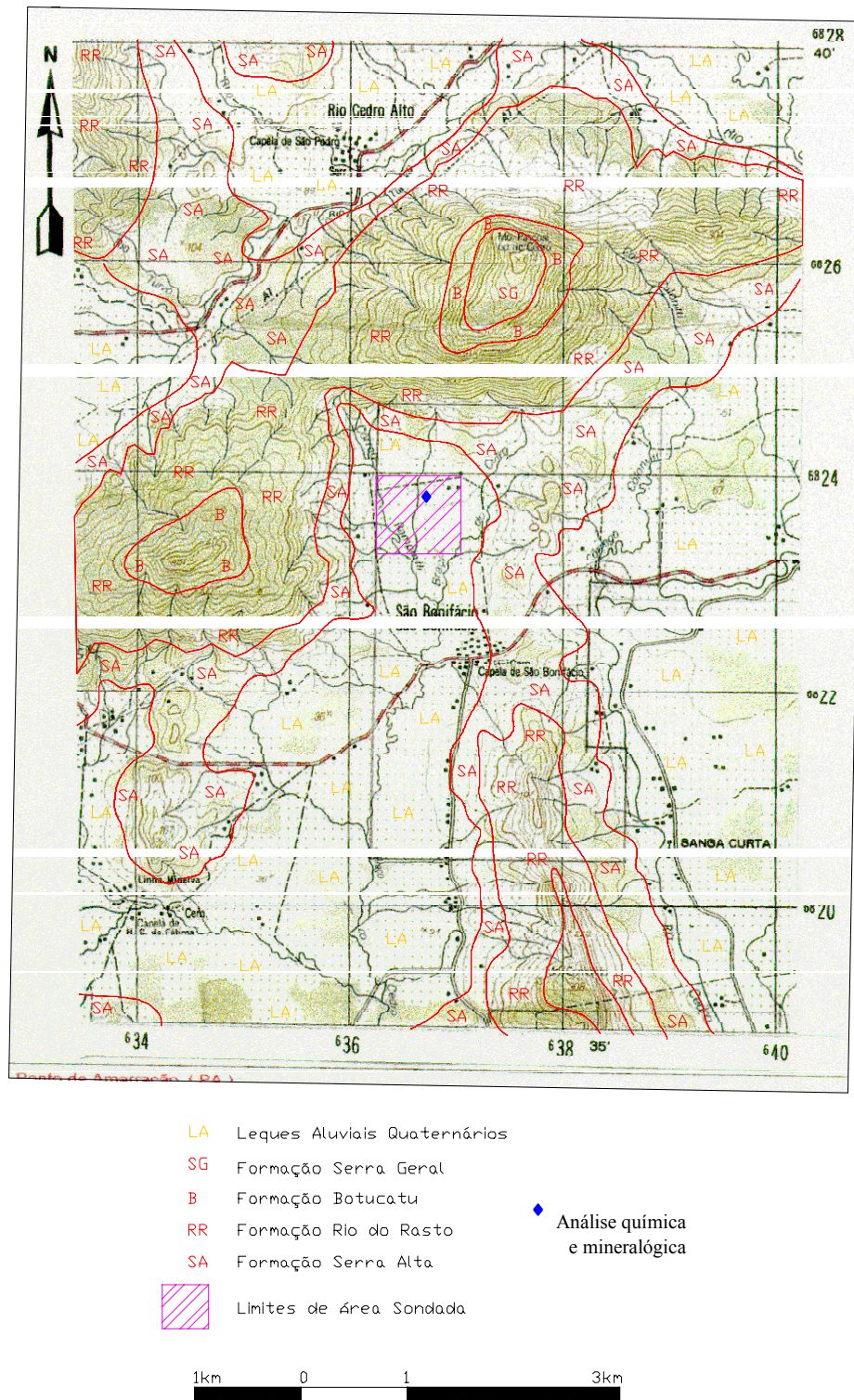
### **2.2.1 Geologia Regional**

A área em estudo encontra-se encravada numa transição de unidades geológicas regionais, contato entre domínios fragmentários da seqüência sedimentar paleozóica/mesozóica da Bacia do Paraná, a W-NW, e uma larga planície costeira quaternária, a E-SE (Figura 2.3), formada nos arredores da área por depósitos de leques aluviais e sedimentos fluviais recentes da bacia do Rio Mãe Luzia. Tais sedimentos são na maior parte compostos por argilas, uma vez que as rochas sedimentares tardi-paleozóicas ocorrentes nas colinas e morros adjacentes, principal fonte da sedimentação quaternária, são também constituídas principalmente por argilo-minerais.

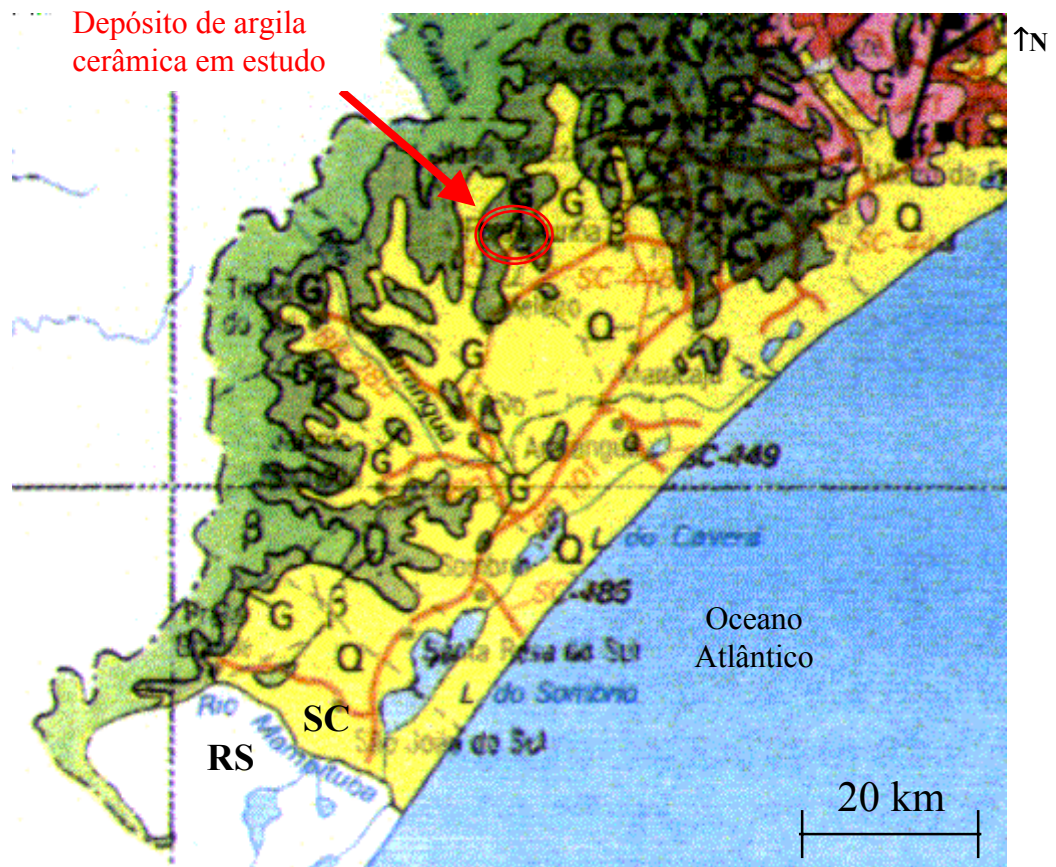
As rochas gonduânicas pertencem à parte superior da coluna estratigráfica da Bacia do Paraná, Grupo Passa Dois, Formações Serra Alta e Rio do Rasto (a Formação Teresina, intermediária entre essas duas, não foi individualizada na região). São recobertas por arenitos mesozóicos eólico-desérticos da Formação Botucatu, por sua vez encimados por centenas de metros de espessura de rochas efusivas (principalmente basaltos) da Formação Serra Geral, completando a seqüência (Figura 2.4). Descontinuidades laterais são freqüentemente observadas nas formações gonduânicas e sedimentos quaternários. Maiores detalhes da geologia e estratigrafia regional podem ser encontrados em Bortoluzzi et al. (1987).







**Figura 2.2 - Contexto geológico e topográfico local da área de estudo (mapa-base: cópia parcial da Carta de São Bento Baixo, IBGE, escala original 1:50.000, coordenadas UTM).**



### LEGENDA

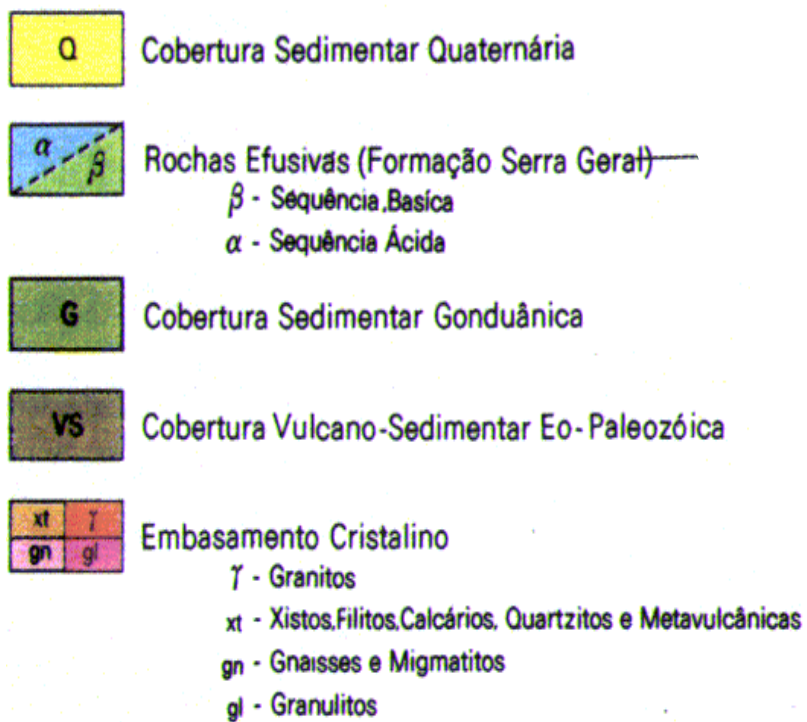
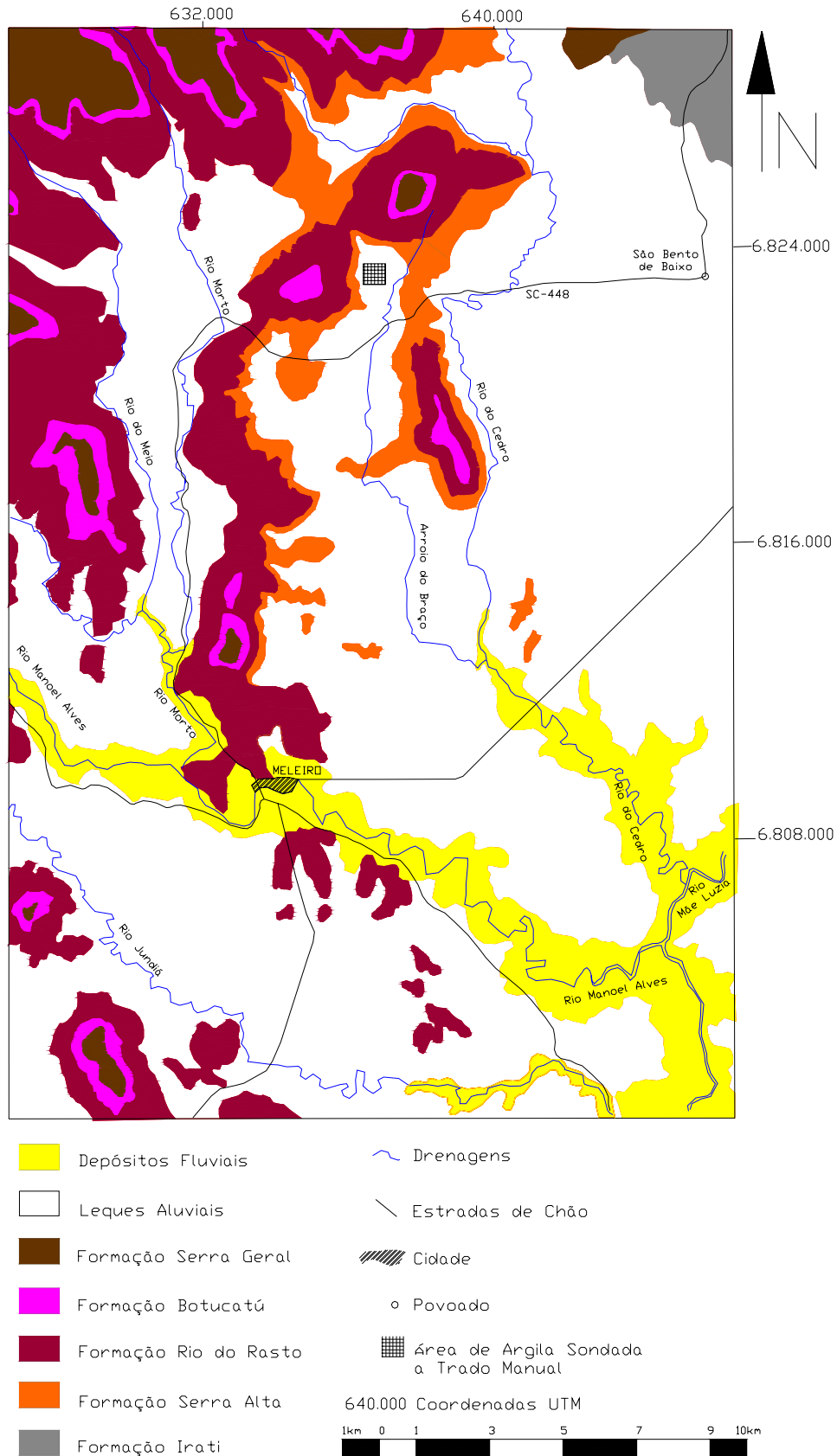


Figura 2.3- Geologia regional da área de estudo (adaptada do Atlas de Santa Catarina, SEPLAN/SC, 1986).





**Figura 2.4 - Contexto geológico regional da área em estudo (mapa-base: Carta Geológica de Turvo, CPRM, 1986, escala original 1:100.000, Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná).**

Em ambos os mapas geológicos citados (Figuras 2.3 e 2.4), é nítida a presença de uma forte estruturação tectônica NW-SE, condicionando a forma do relevo e por extensão os padrões encaixados de drenagem. Direções secundárias N-S e NE-SW são também observadas, controlando a orientação de algumas encostas. Implicações mais locais dessas estruturas no relevo e sedimentação em geral serão abordadas no item a seguir. Os sistemas estruturais NW-SE, mais antigos, foram cortados posteriormente por estruturas NE-SW que resultaram no atual alinhamento costeiro desta porção da região Sul do Brasil.

A pequena área (em torno de 60 ha) efetivamente pesquisada encontra-se locada no N central da Figura 2.4, nos domínios de sedimentos mais recentes de leques aluviais. De fato, na área propriamente dita e subjacências são encontrados pequenos leques e planícies aluviais e secundariamente depósitos coluviais, na maior parte compostos por argilas, uma vez que as rochas sedimentares tardi-paleozóicas ocorrentes nas colinas e morros adjacentes, principal fonte da sedimentação quaternária, são também constituídas principalmente por argilo-minerais. Estes sedimentos inconsolidados estão associados aos canais das drenagens vindas de morros a N e NW, as quais não estão representadas na Figura 2.4 devido à escala mais regional do mapa original digitalizado (1:100.000).

### **2.2.2 Geologia Local**

O depósito de argila objeto deste estudo está inserido no truncado ambiente geológico regional abordado anteriormente. A disposição local das formações geológicas no contexto topográfico da área e adjacências pode ser visualizada na Figura 2.2, indicando a relação das unidades com a topografia/geomorfologia correspondente.

A Formação Serra Geral, topo da seqüência, por apresentar litologias comparativamente mais resistentes à erosão, se destaca no topo dos morros, segurando a topografia. No outro extremo de idade geológica, os recentes sedimentos aluviais inconsolidados ocupam planícies truncadas pelas encostas dos morros. A Formação Serra Alta, composta de rochas pelíticas,

ocupa o sopé dos morros. Juntamente com a Formação Rio do Rasto sobreposta, composta em sua parte mais basal também de rochas predominantemente argilosas e onde ocorre uma quebra de relevo, constitui a fonte da sedimentação do vale plano logo a N de São Bonifácio, onde se encontra a área pesquisada.

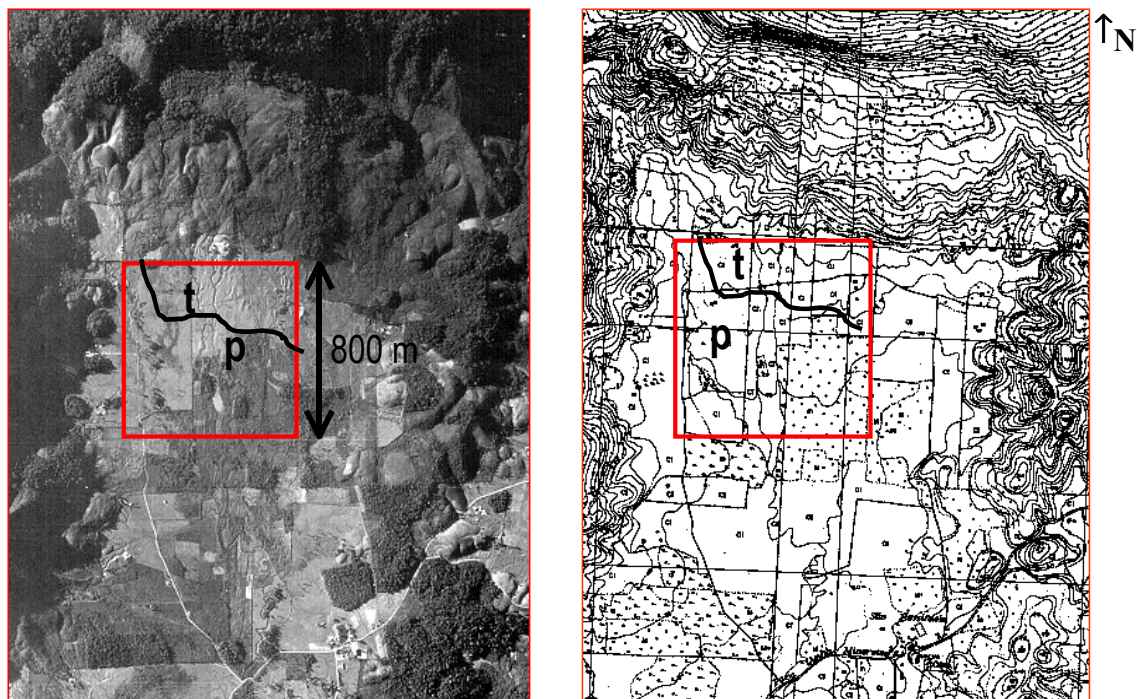
A argila ocorrente na planície quaternária, onde se insere a área sondada, resulta do transporte sedimentar oriundo das rochas sedimentares paleozóicas adjacentes, as quais no local são já predominantemente argilosas. Além do sistema estrutural NW-SE dominante, o qual condicionou a forma dos canais de drenagem no W da área efetivamente pesquisada e o morro a SE, canais subordinados de direção geral média NNE-SSW interceptam a parte N dessa área sondada. A direção NE-SW condicionou a orientação geral do morro a montante dessas drenagens. Estruturas mais restritas em direções subordinadas podem ter uma importância local importante, como no caso da encosta íngreme de direção WNW-ESE imediatamente a N da área sondada, originando o depósito de tálus no N dessa área, conforme será abordado adiante.

Trabalhos de mapeamento geológico/geomorfológico, conjugados a levantamento topográfico de detalhe e o exame de tendências da distribuição espacial de parâmetros cerâmicos obtidos em testes de laboratório a partir de amostras de trado manual (ambos abordados em maior detalhe mais adiante neste capítulo), ajudaram no delineamento de dois subdomínios geológicos: planície e tálus (Figura 2.5).

O subdomínio planície consiste de um sistema de leque aluvial formando uma planície de inundação, associado à drenagem principal NW-SE no local. Tal planície é parcialmente coberta por um depósito de tálus na porção N da área, compreendendo o segundo subdomínio identificado, denominado simplesmente tálus. O depósito de tálus foi formado por transporte de sedimentos grosseiros a finos, mal selecionados, a partir da encosta íngreme situada a N da área.

O pequeno vale plano é circundado por pequenos morros e colinas compostos de rochas paleozóicas argilosas ao redor, conforme mencionado anteriormente, sendo a porção N deste vale coberta parcialmente por um depósito de tálus. As condições geológicas locais indicam portanto um

ambiente sedimentar compreendendo um sistema de leque aluvial, coberto parcialmente por sedimentação coluvial (tálus).

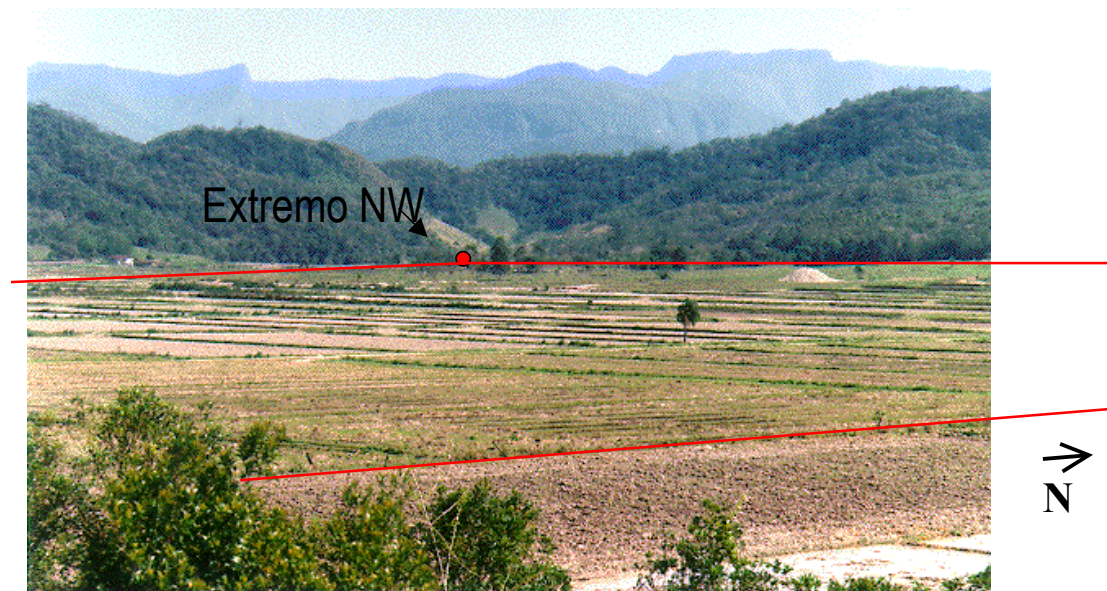


**Figura 2.5 - Fotografia aérea à esquerda e mapa topográfico à direita, ambos na mesma escala. Dois subdomínios geológicos são indicados no interior da área pesquisada (quadrado em vermelho): “t” para tálus e “p” para planície. Equidistância das curvas de nível: 5 m**

Segundo Leeder (1992), leques aluviais são depósitos localizados, normalmente de pequena escala (no máximo quilométrica). Constituem sedimentos formados por deposição a partir de drenagens vindas de bacias a montante em outra bacia maior a jusante. Já para Ethridge (1985), os leques aluviais constituem uma forma distinta de sistema geomorfológico e deposicional característica de áreas de *piedmonte*. Apresentam geralmente forma de cone, onde cursos d’água emergem de uma área mais alta em direção a um baixo adjacente. Conforme Kukal (1971), leques aluviais compreendem depósitos de cursos d’água cuja superfície forma um segmento de um cone que se irradia por inclinação encosta abaixo, a partir do ponto onde o curso d’água emerge da área montanhosa (ápice na boca do vale). O ápice corresponde ao ponto mais alto de um leque aluvial, onde o curso d’água emerge do fronte montanhoso. No caso em estudo, o ápice encontra-se a montante da planície, NW da área (Figura 2.6). O padrão de



fluxo é radial a partir da fonte, com limitações laterais muitas vezes balizadas pelo relevo local, como é o caso do estudo presente, a W da planície aluvial (baixas encostas onde ocorrem os folhelhos e siltitos da Formação Serra Alta).



**Figura 2.6 - Visão parcial da área sondada (delimitada em vermelho) em primeiro plano, mostrando logo à montante do extremo NW as cabeceiras do canal principal do leque aluvial, e ao fundo os contrafortes da Serra Geral.**

Os leques aluviais se desenvolvem onde o curso d'água e fluxo de massa emergem dos confins de um vale ou garganta (no caso, a NW da área, conforme mostra a Figura 2.6), em direção a uma bacia (Reading, 1986). A perda de confinamento permite expansão horizontal do fluxo, desaceleração e deposição parcial ou total da carga de sedimentos. Essa emergência do vale numa bacia é comumente associada com redução de gradiente, e isto favorece a desaceleração e deposição. No caso presente, tal fenômeno é bem demarcado pela formação de banhados e áreas mal drenadas em geral, favorecendo o atual uso dos terrenos para plantações de arroz (Figura 2.6).

O ambiente mais importante de uma deposição em leque é o de bacias sedimentares limitadas por falhas, onde movimentos de falhas periódicos permitem subsidência e daí preservação dos sedimentos aluviais (sistemas de *graben/semigrabens* e *horsts*). No caso presente, a conformação do vale

onde se deposita a argila pesquisada em sistema de *grabens* é evidente a partir da observação da Figura 2.5.

A deposição de um leque aluvial é causada principalmente por decréscimo em profundidade e velocidade de fluxo (Kukal, 1971). Os sedimentos de leques aluviais podem às vezes aparecer como sedimentos de tálus os quais se originam de forças gravitacionais. A forma das partículas/fragmentos nestes casos geralmente é irregular.

Os leques aluviais mostram, principalmente em ambientes mais úmidos, uma mudança gradual de um aluvião mais grosseiro, com formação de pequenas ilhas e meandros abandonados em fácies mais proximais, passando a um aluvião meandrante fino, até planícies de inundação mais distais. Usualmente há um decréscimo para jusante na granulometria média. No caso presente, toda essa transição parece ocorrer muito rapidamente, em pequena escala. A deposição é argilosa desde o início, em função da composição pelítica predominante das rochas-fonte. As nascentes da drenagem principal NW-SE, posicionadas a NW da área, cortam os folhelhos e siltitos pretos Serra Alta na transição para siltitos e argilitos (secundariamente arenitos finos) da base da Formação Rio do Rasto.

A coalescência de diferentes fontes de sedimentos de leques é comum, como no caso presente, da planície do leque principal com o tálus e seus canais secundários. A interdigitação é igualmente comum. Segundo Reading (1986), a coalescência lateral é especialmente comum em relevos associados com falhas ativas. No depósito em estudo, existe uma transição/interdigitação entre a parte mais distal do leque ligado à drenagem principal à W (domínio planície), e a porção mais distal do tálus. Será visto no capítulo seguinte que essa zona de transição, com características em comum para os dois subdomínios, mereceu um tratamento à parte para os trabalhos de estimativa. A Figura 2.7 ilustra esquematicamente a geometria do depósito em seus diferentes subdomínios. Note a presença de lentes de limonita no tálus, e a ocorrência da argila aluvial sotoposta ao depósito de tálus propriamente dito, ainda neste subdomínio.

Nos subambientes de sopé de montanha, e canal imediatamente a jusante, ocorrem acumulações localizadas de material como seixos pobremente classificados, angulares e grosseiros (Leeder, 1992). A

estratificação interna é pobre. A Figura 2.8 ilustra o que pode ser observado no NE da área pesquisada, no interior do subdomínio tálus, em relação a feições acima citadas, com imbricamento de seixos em meio à massa argilosa, principalmente de folhelhos da Formação Serra Alta, e eventualmente de arenitos e basaltos das formações sobrepostas.

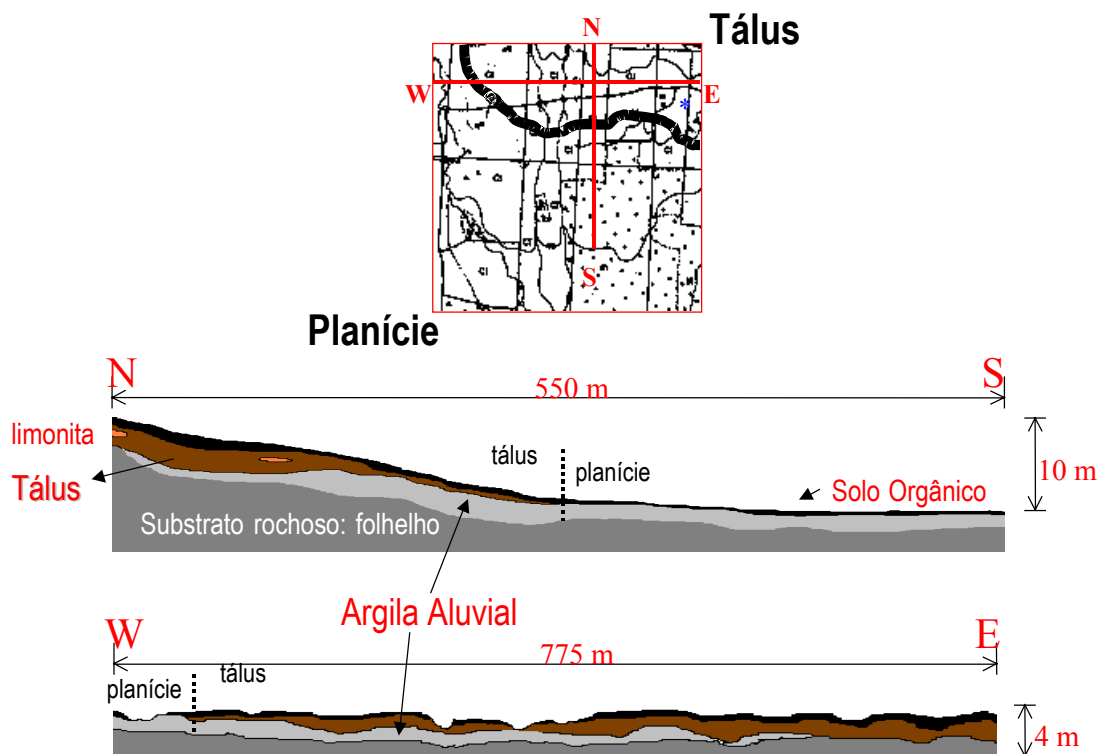


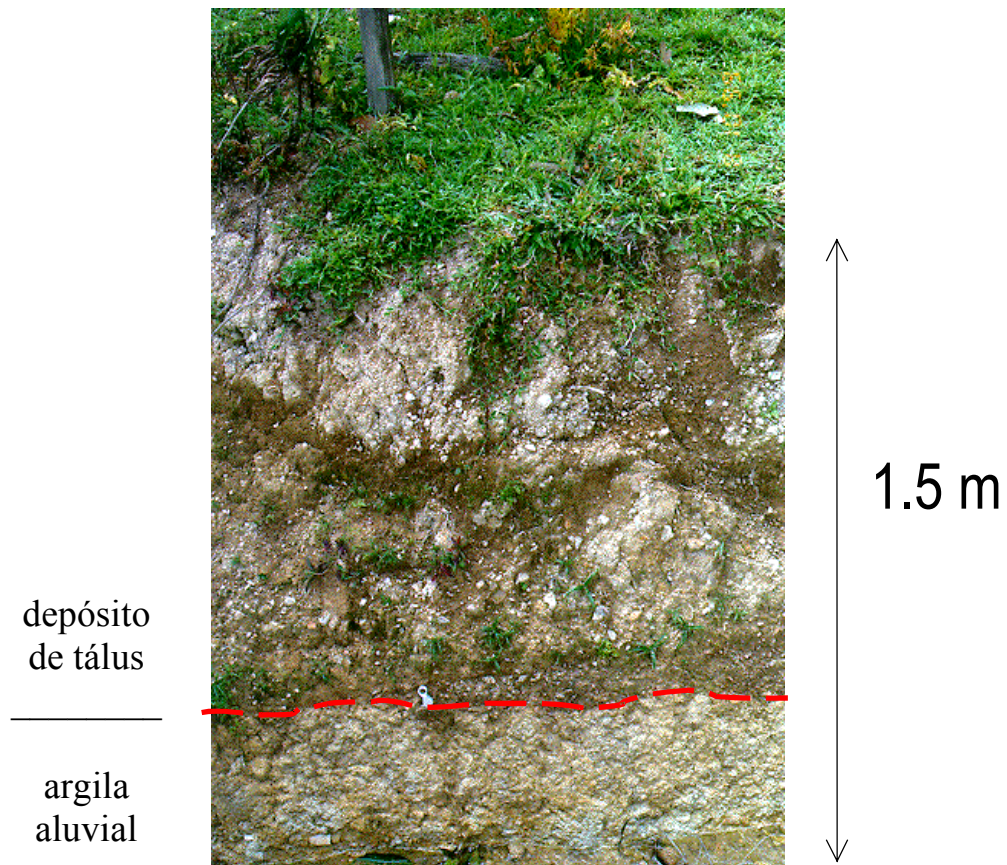
Figura 2.7 - Seções verticais esquemáticas cortando os dois subdomínios geológicos da área pesquisada (locadas no mapa acima em vermelho; asterisco azul: local da foto da Figura 2.8).

Nos tálus, ocorrem fluxos de detritos com movimentações de altas viscosidades. Para tais ocorrência são necessárias rochas-fonte cujo intemperismo resulta em finos detritos incluindo argila, e encostas inclinadas permitindo rápido fluxo e erosão. Em função da alta velocidade não há classificação no momento da desaceleração e deposição (Reading, 1986).

Segundo a análise de Easterbrook (1969), desmoronamentos ocorrem onde blocos individuais de rocha que foram desmembrados a partir da rocha-mãe, são transportados por gravidade encosta abaixo (*rockfalls*). Desta forma, se produz um depósito de tálus, i.e. uma acumulação de fragmentos



erráticos na base de encostas íngremes. Encostas de tálus são encontradas em grande abundância em regiões montanhosas onde escarpas são comuns. A situação geomorfológica do tálus em relação à planície aluvial e aos morros e encostas circundantes pode ser visualizada sob diversos ângulos nas fotos das Figuras 2.5, 2.9 e 2.10.



**Figura 2.8 - Afloramento em corte vertical mostrando depósito de tálus com seixos imbricados jazendo sobre a argila aluvial (local da foto indicado na Figura 2.7).**



**Figura 2.9 - Visão da área de SW para N, mostrando aproximadamente os limites do depósito de tálus no sopé do morro a N da área.**

A lenticularização junto aos canais é uma feição comum, com formação de lentes mais arenosas. No caso presente, isso é patente na parte W da área, junto à drenagem principal NW-SE, aumentando a variabilidade lateral local das variáveis. Para Kukal (1971), nas seções ao longo de leques aluviais, camadas depositadas por processos fluviais são comumente alternadas com fluxos de lama e detritos intermediários. A estratigrafia interna é controlada por mudanças proximais a distais nos processos deposicionais, e por mudanças cíclicas oriundas dos mecanismos de gradação/retrabalhamento (Leeder, 1992). No caso do depósito pesquisado, o retrabalhamento de canais através de erosão e deposição é comum, principalmente no tálus, por se tratar em épocas mais atuais de uma região sujeita a fortes e repentinas chuvas.

Segundo Reading (1986), mapas de distribuição de depósitos atuais em leques recentes indicam uma alta variabilidade e imprevisibilidade, mesmo entre leques adjacentes. A dificuldade de análise do mecanismo dos processos em detalhe, juntamente com o constante deslocamento do local de deposição sobre a superfícies do leque, levam à uma interdigitação essencialmente aleatória de planícies de inundação, fluxo de lama, depósitos de canal, etc. Incisão e segmentação de leques podem levar a seqüências bastante irregulares em termos de distribuição vertical de granulometria. Tais feições são conspícuas nos domínios da área estudada, particularmente nos limites do subdomínio tálus, com fortes implicações na análise geoestatística subsequente.

Além de falhas e fraturas, especialmente um falhamento WNW-ESE a N da área que propiciou a formação da escarpa nesta direção e a conseqüente formação de tálus por sedimentos transportados por gravidade (Figura 2.9), alternâncias climáticas devem ter agido na conformação atual do depósito como um todo. Existe um consenso na literatura científica relacionada que razões climáticas e/ou tectônicas interagem na conformação final do leque. Por exemplo, para Ethridge (1985) há a ação conjugada de controles extrabaciais como reativação de margem falhada de bacia, e de controles autocíclicos como eventos de chuva e inundação. Porém, a

influência da evolução de paleoclimas e inter-relação com atividades tectônicas não foram aqui investigados por fugirem ao escopo deste trabalho.

Os dois subdomínios geológicos, planície e tálus, foram usados para definir os dois correspondentes subdomínios geoestatísticos, e como tal serão tratados individualmente daqui por diante. De fato, há uma transição entre ambos os domínios, merecendo um tratamento em separado nas estimativas a serem abordadas no capítulo seguinte. A Figura 2.10 mostra o visível contraste geomorfológico que existe entre os dois domínios.



**Figura 2.10 - Vista da área de N para S, com limites aproximados dos dois domínios geológicos (« t » = tálus; « p » = planície).**

Além do sistema estrutural dominante NW-SE que condicionou a forma do canal de drenagem no W da área, e por extensão toda a sedimentação da planície resultante, canais subordinados orientados NNE-SSW a N-S interceptam a parte N do depósito (Figuras 2.11 e 2.12). A devida compreensão do papel da sedimentação e das estruturas tectônicas é fundamental na avaliação geoestatística subsequente.

A argila aluvial ocorrente na planície é predominantemente quartzo-caulinítica, conforme mostram as análises contidas nas Tabelas 2.1 e 2.2, cujo local de amostragem está indicado na Figura 2.2. Essas análises, realizadas em amostra coletada a partir de lote homogeneizado para lavra experimental (a ser comentada no final desse item), fornecem apenas uma idéia da composição química e mineralógica da argila ocorrente nesta porção mais central do depósito. De fato as características da argila de efetivo

interesse no presente caso são seus parâmetros industriais, conforme será visto no próximo item. O substrato rochoso a esta argila compreende um follhelho preto e físsil da Formação Serra Alta.

**Tabela 2.1 - Análise mineralógica por difratometria de raios-X de argila da planície.**

<b>Fases Identificadas</b>	<b>Teor (%)</b>
Caulinita	22,0
Quartzo	65,0
Feldpato Potássico	7,0
Magnetita	1,7
Acessórios*	4,3

\*fases não identificadas pela difração de raios-X.

**Tabela 2.2 - Análise química de argila da planície, por fluorescência de raios-X.**

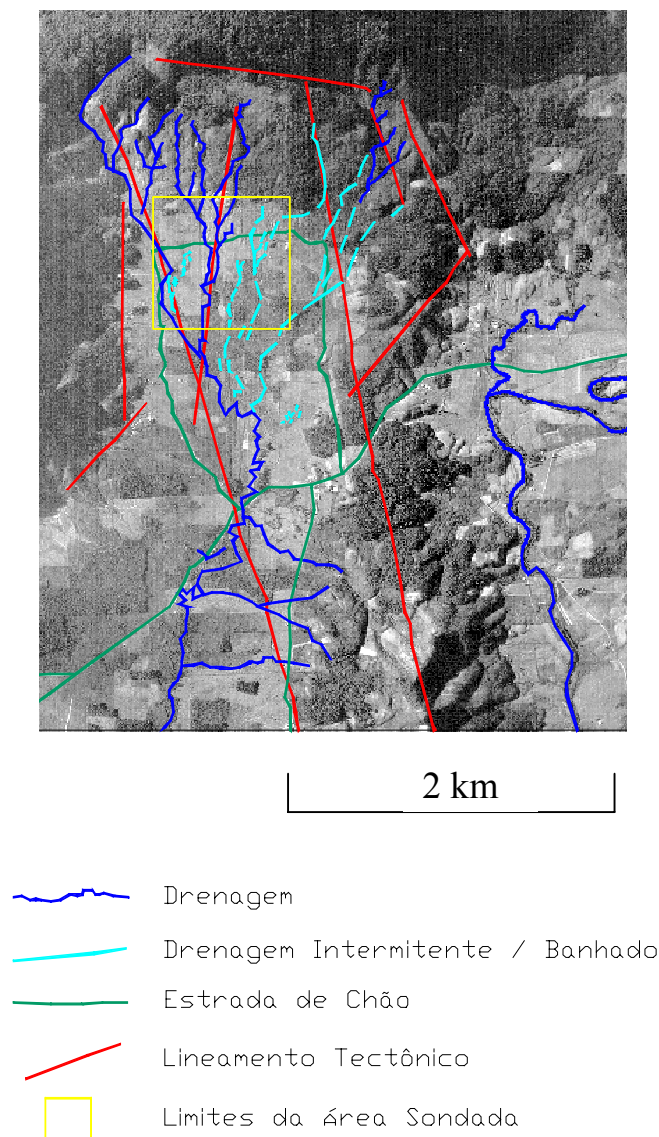
<b>Óxidos</b>	<b>Teor (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	80,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,68
CaO	0,12
Na <sub>2</sub> O	0,13
K <sub>2</sub> O	1,23
MnO	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,95
MgO	0,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
Perda ao Fogo	4,35

Caulinita, o argilo-mineral identificado, é mais abundante à superfície em climas temperados úmidos. Em depósitos mais profundos, montmorilonita e illita predominam.

Um procedimento largamente utilizado em estudos qualitativos de recursos naturais é a análise de fotografias aéreas da região de estudo. A partir de pares de fotos cobrindo uma região de interesse é possível através de fotointerpretação por estereoscopia delinear elementos marcantes de relevo, vegetação, drenagens, geologia, estruturas tectônicas, etc. No presente caso, fotointerpretou-se a região de interesse para argila cerâmica (área sondada e arredores).



A Figura 2.11 mostra uma montagem feita da superposição entre a base de fotografia aérea utilizada com a fotointerpretação realizada (escala original das fotos: 1:25.000). A fotografia em si permite a observação de características gerais do terreno, destacadas para a área efetivamente pesquisada e arredores pela fotointerpretação.



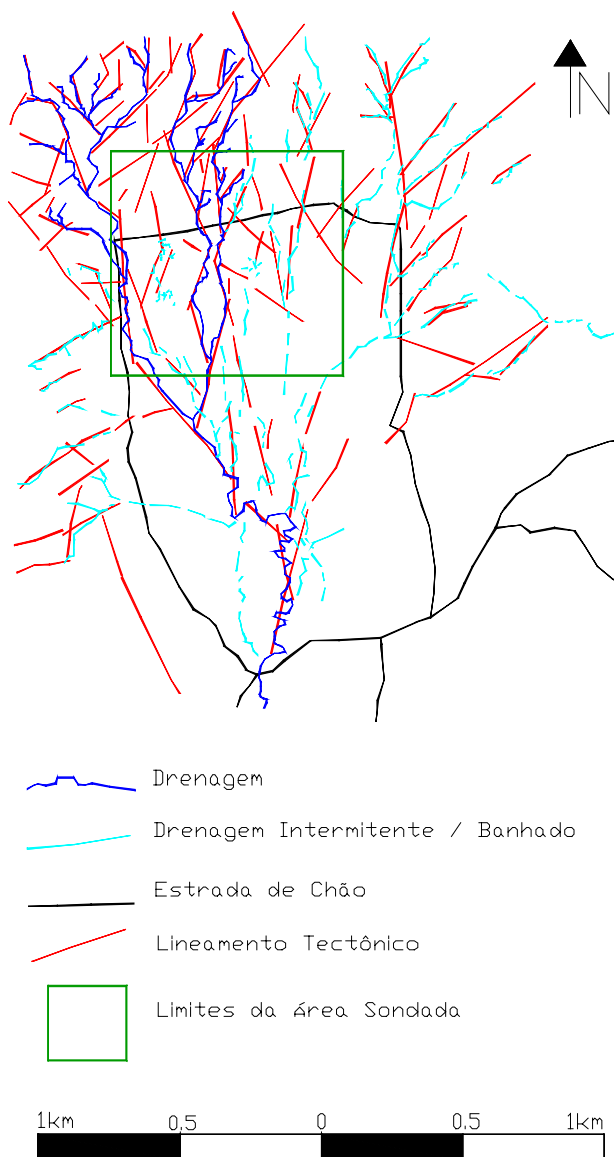
**Figura 2.11 - Fotografia aérea da região da área de estudo e fotointerpretação.**

Pode-se notar que na pequena bacia hidrográfica presente e atuante na sedimentação da argila pesquisada, as drenagens estão condicionadas



em maior ou menor grau às estruturas tectônicas maiores existentes, predominantemente na direção NW-SE. As estruturas também condicionam a geomorfologia local, além da composição pelítica das litologias, as quais emprestam um caráter arredondado aos morrotes mais baixos. A quebra de relevo entre os morros e a planície resulta na formação de pequenas regiões de pouco escoamento d'água como banhados, feições facilmente identificáveis nas fotos.

Um detalhamento das feições naturais do terreno pôde ser obtido através da fotointerpretação de ampliações das fotos para a escala 1:10.000, conforme pode ser visto na Figura 2.12.



**Figura 2.12 - Fotointerpretação de detalhe.**

A comparação das duas últimas figuras citadas exemplifica o impacto da escala adotada na observação da incidência de estruturas em uma ou em outra direção, bem como na associação com as drenagens. A visível predominância de estruturas maiores, encaixando as drenagens na direção NW-SE a NNW-SSE, observável na Figura 2.11, mostra-se mais variável em escala de detalhe, particularmente nos limites da área (Figura 2.12). Isto tem influências diretas nas estruturas de pequena escala nos variogramas, no sentido de não haver uma anisotropia muito definida em pequena escala.

A Figura 2.13 mostra um corte vertical de uma pequena extração experimental de argila aproximadamente no centro da área pesquisada, na transição entre os limites do tálus e da planície. Pode-se observar a contaminação por vezes ocorrente na argila, correspondente a incrustações de limonita.

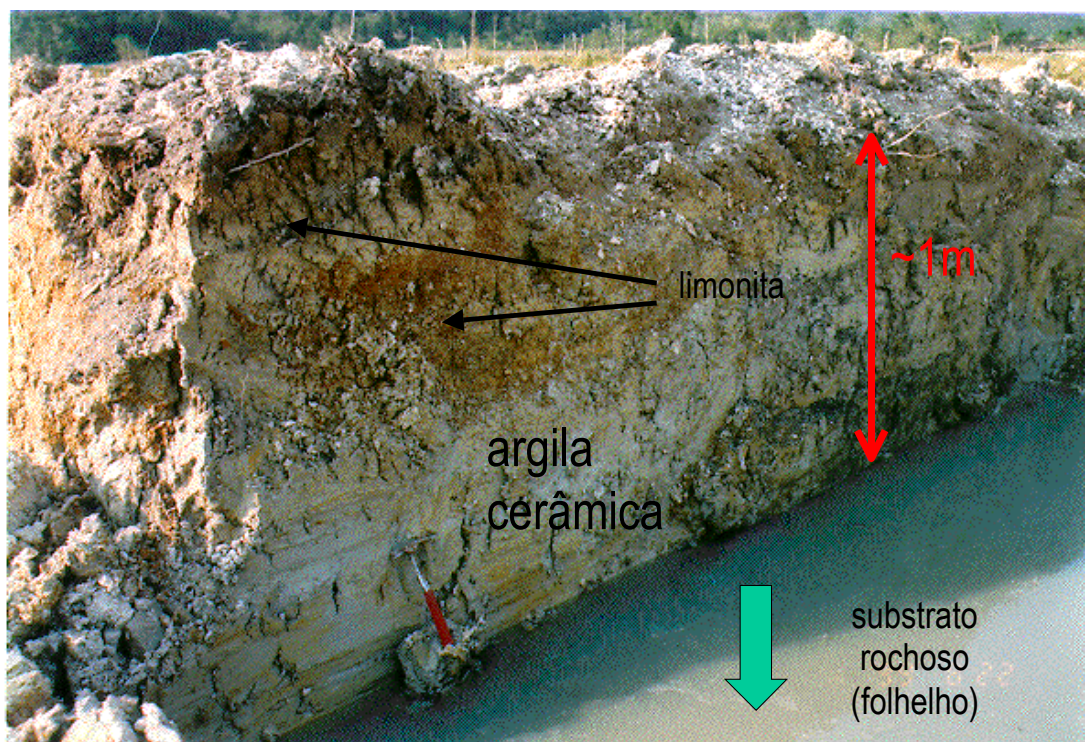


Figura 2.13 - Corte aberto para extração experimental de argila aproximadamente no centro da área pesquisada.

## 2.3 Aspectos Cerâmicos Envolvidos

Os minerais industriais, hoje em dia, estão presentes em praticamente todos os ramos da moderna sociedade industrializada. As argilas utilizadas como matérias-primas na fabricação de produtos cerâmicos incluem-se neste grupo.

Um produto cerâmico é um sólido composto de materiais que foram sujeitos a calor acima de  $468,3^{\circ}\text{C}$  (Lefond, 1983 p.33). As matérias-primas, que são usadas juntas em composição ou isoladamente em alguns casos, são selecionadas e utilizadas por várias razões, tais como: facilidade de fabricação, ajuda ao processamento, fornecimento de propriedades interessantes após processamento, inexistente ou controlável grau de toxidez ou risco, disponibilidade, custo, etc. Muitas funções fundamentais devem ser cumpridas em cada produto cerâmico, além de funções secundárias que são desejáveis em produtos especificados.

As informações discutidas no texto a seguir versando sobre aspectos cerâmicos relacionados à essa dissertação foram em sua maior parte extraídas de Barba et al. (1997). Neste trabalho, podem ser encontrados maiores detalhes do processamento cerâmico, transformações sofridas pelas matérias-primas, e seus papéis nos processos de fabricação de revestimentos cerâmicos.

Os pavimentos e revestimentos cerâmicos são peças constituídas normalmente por um suporte de natureza argilosa e porosidade variável, com ou sem recobrimento de natureza essencialmente vítrea. Atualmente, existe uma ampla diversidade tanto nas formas como características técnicas e decorativas dos produtos cerâmicos.

Nos revestimentos cerâmicos como azulejos, os suportes são porosos, favorecendo a aderência à parede e uma maior estabilidade dimensional. Por esta razão, a absorção d'água e a retração linear após queima, atributos de qualidade a serem investigados na análise geoestatística a seguir, são tão importantes. Já nos pavimentos cerâmicos (pisos), a porosidade é caracteristicamente baixa (baixa absorção d'água).

Os pavimentos cerâmicos devem necessariamente apresentar alta resistência mecânica (obtida com baixa porosidade). A redução de

porosidade geralmente vai acompanhada de uma alta retração de queima, de forma inversamente proporcional. Já para os azulejos, destinação da matéria-prima em estudo, é necessária uma alta estabilidade dimensional, o que é obtido mediante o uso de uma massa com baixa retração de queima (a qual geralmente está associada à uma alta porosidade), favorecendo uma maior facilidade na colocação.

Entre os revestimentos cerâmicos encontram-se os denominados revestimentos porosos, tipo de produto que se pretende obter da argila aqui avaliada. No processamento da matéria-prima utilizada, a conformação é feita exclusivamente por prensagem, devido à alta estabilidade bidimensional requerida para este tipo de produtos.

A fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos tem sofrido mudanças consideráveis e contínuas nos últimos anos, resultando em uma maior automatização do processo e uma melhora de qualidade do produto. As composições empregadas têm seguido uma evolução paralela a estas mudanças tecnológicas, adaptando-se a ciclos de queima rápidos e à fabricação para queima simultânea do esmalte e suporte. Por outro lado, as maiores exigências do mercado têm induzido à utilização de matérias-primas de maior qualidade e grau de elaboração.

A fabricação deste tipo de produtos cerâmicos tem uma grande importância na economia do Estado de Santa Catarina e mesmo para o país, pela grande exportação envolvida no caso do ramo da chamada « cerâmica branca ». Revestimentos cerâmicos deste tipo possuem cor de queima mais clara, diferenciando-se da cerâmica vermelha, menos nobre, envolvendo pisos, tijolos, telhas e ladrilhos.

Os principais fatores requeridos para a localização de uma indústria cerâmica de porte, os quais o pólo industrial de Criciúma preenche integralmente, são:

- proximidade dos jazimentos de argila;
- tradição artesanal cerâmica;
- disponibilidade de mão de obra qualificada.

No processamento industrial para fabricação de revestimentos cerâmicos visto como um todo, várias etapas são envolvidas, desde o fornecimento de matérias-primas até o acabamento do produto final a ser comercializado no mercado. No tocante ao papel desempenhado pelas matérias-primas, no caso presente a argila correspondente ao minério em estudo, simplificada e resumidamente pode-se resumir essas etapas em:

- (i) preparação das massas cerâmicas (dosificação das diferentes matérias-primas): envolve a moagem;
- (ii) conformação das peças: pode ser feita por prensagem, extrusão ou colagem, sendo a primeira mais utilizada;
- (iii) secagem;
- (iv) esmaltação (opcional): dependendo se for monoqueima ou biqueima, a seqüência das etapas de esmaltação e queima será distinta.
- (v) queima: rápida ou lenta, monoqueima ou biqueima;
- (vi) produto acabado.

Como massa cerâmica, pode-se entender uma mistura de matérias-primas em diferentes proporções, sofrendo diversas transformações físico-químicas até alcançar as propriedades requeridas pelo produto acabado. Por outro lado, podem ser classificados como matérias-primas cerâmicas os minerais ou acumulações de rochas com as quais se podem fabricar produtos cerâmicos, em seu estado natural ou com tratamento prévio. Nas indústrias cerâmicas do Sul de Santa Catarina, normalmente os únicos tratamentos prévios aplicados são a homogeneização e secagem *in natura*.

A composição da massa deve ser formulada de acordo com as características da peça cerâmica desejada e do processo de fabricação a empregar. Uma boa matéria-prima deve apresentar homogeneidade suficiente *in natura*. Por isso o estudo da variabilidade de sua qualidade ao longo do depósito é vital, sendo abordada nesta dissertação através de simulações estocásticas (Capítulo 4).

Vários tipos de substâncias minerais são utilizadas nas formulações cerâmicas, tais como: argilas, siltes, areias, caulim, quartzo, feldspato, talco,

carbonatos e filitos, entre outras. Cada uma dessas matérias-primas desempenha funções distintas, sendo utilizada em proporções variáveis, dependendo dos processos específicos de cada empresa, o tipo de produto final almejado e a disponibilidade/custo das matérias-primas existentes no mercado local. As principais matérias-primas cerâmicas basicamente classificam-se em plásticas (e.g. caulim e argilas) e não-plásticas (e.g. quartzo e feldspato).

As argilas, em todas as suas variações encontradas na natureza, desempenham um papel crucial nos processamentos cerâmicos. Em formulações cerâmicas para revestimentos, a argila é matéria-prima chave, tendo em estado cru uma hidroplasticidade derivada de seu tamanho coloidal de partícula e sua grande afinidade com água. Por outro lado, areia silicosa é um formador de vidro ou carga não-plástica. Contaminantes naturais, como óxido de ferro por exemplo, adulteram muitas argilas e algumas areias, agindo como fundentes e reduzindo o ponto de fusão dos componentes minerais, ao mesmo tempo em que age como pigmento vermelho.

Argila representa um termo amplo e genérico aplicado para toda substância mineral de granulometria fina, que manifesta um comportamento plástico quando se mescla com uma quantidade limitada de água. As argilas são compostas predominantemente por materiais argilosos, essencialmente silicatos aluminosos hidratados. Os argilo-minerais raramente são puros, e as impurezas nas argilas muitas vezes conferem ao material características desejáveis. Um dos componentes mais frequentes é a sílica, geralmente na forma de quartzo (como é o caso presente, onde quantidades apreciáveis de quartzo são encontradas na composição da argila caulinítica). Muitos dos argilo-minerais também contêm quantidades apreciáveis de ferro, álcalis e elementos alcalinos terrosos.

Segundo Lefond (1983, p.585), argila é o nome dado ao material coloidal, hidratado e inorgânico, encontrado abundantemente na crosta terrestre. Corresponde a substâncias originadas pela desintegração, por agentes intempéricos, de rochas aluminosilicáticas e materiais óxidos similares da crosta terrestre levando à formação de vários tipos de argila (no caso presente, resultante de intemperismo e transporte de rochas originalmente já argilosas).

Como termo granulométrico, argila é usada para a categoria que inclui as menores partículas. O tamanho máximo de partículas é definido diferentemente em várias escalas granulométricas. A escala largamente utilizada de Wentworth define argila como o material mais fino que aproximadamente 4 micrômetros, ou 1/256 mm (Lefond, 1983 p.585).

Alguns pesquisadores costumam utilizar o termo argila para qualquer material argiloso, de granulometria fina, natural e terroso. Quando usado como tal, o termo inclui argila, folhelho ou argilito/siltito, e alguns solos argilosos. As argilas estão entre os minerais industriais líderes tanto em tonelagem produzida quanto em valor total.

Normalmente, a qualidade da argila é medida por suas características nos vários processos de fabricação listados acima, em especial nas características que conferem às peças cerâmicas após serem submetidas aos processos de queima. Por essa razão, as empresas de mineração ligadas aos grupos cerâmicos tais como o Grupo Eliane (Cocal do Sul/SC), testam as amostras coletadas do material ocorrente em campo (a partir de furos de trado/sonda rotativa, afloramentos ou mesmo poços), em condições semelhantes às realmente encontradas nas fábricas, porém em escala de laboratório. O objetivo da realização dos ensaios cerâmicos é verificar a qualidade das argilas testadas, guiando os trabalhos de pesquisa e extração mineral. Os procedimentos laboratoriais utilizados para as análises de amostras de argila, objeto de pesquisa do presente trabalho, podem ser vistos no Apêndice B.

Para as indústrias cerâmicas localizadas no pólo cerâmico de Criciúma/SC, especialmente o Grupo Eliane, detentor dos direitos minerários da área de argila em estudo, os principais parâmetros de qualidade inspecionados nas matérias-primas em teste normalmente são os seguintes (Geremias, 2001, comunicação pessoal):

- **Pré-queima (amostra *in natura*):** densidade aparente (diretamente proporcional ao empacotamento), cor, umidade, granulometria, composição química/mineralógica.

- **Pós-queima:** retração linear, absorção d'água, cor de queima, coração negro (monoqueima), dilatação térmica (biqueima).

A fundamentação da cerâmica e sua importância econômica estão associadas à uma modificação completa, após queima, das propriedades das massas previamente moldadas, resultando em materiais duros, resistentes à água e aos produtos químicos, e podendo apresentar grandes variações em determinadas características. Assim, as propriedades apresentadas pelas peças cerâmicas pós-queima são normalmente mais fundamentais que as pré-queima, norteados os trabalhos de pesquisa e lavra relacionados a este tipo de material. As propriedades tecnológicas mais importantes são:

- retração linear
- absorção d'água
- coeficiente de dilatação
- cor de queima

A combinação dessas diferentes características permite classificar as argilas/matérias-primas cerâmicas em diferentes usos (diferentes tipos de minério), ou, dependendo do caso, descartá-la para fins cerâmicos, passando assim a ser enquadrada como estéril. Portanto, como pode ser visto, a argila enquanto matéria-prima cerâmica corresponde a um bem mineral pertencente ao campo dos minerais industriais.

Para a jazida presentemente em consideração, as seguintes propriedades cerâmicas pós-queima foram testadas em laboratório a partir das amostras de sondagem a trado: (i) absorção d'água e (ii) retração linear.

Absorção d'água é o parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. É definido como o ganho em peso, expresso em percentual, que experimentam as peças ao introduzi-las em água em ebulição durante um determinado período de tempo (geralmente 2 horas). Assim,

$$AA (\%) = (M_a/M_s) \cdot 100 \quad (2.1)$$



onde: AA = absorção d'água ; Ma = massa de água absorvida e Ms = massa do sólido seco.

O comportamento do material durante a queima se avalia mediante a variação de sua retração linear com a temperatura. A retração linear, RL, é definida como:

$$RL (\%) = [(Li-Lf)/Li]*100 \quad (2.2)$$

onde: RL = retração linear ; Li = comprimento inicial da peça a cru e Lf = comprimento final pós-queima.

No caso em estudo, essas propriedades foram medidas em laboratório para as amostras oriundas da sondagem a trado após sua submissão a reais condições de processamento cerâmico: 50 minutos de queima a 1115°C. As mudanças sofridas por uma composição cerâmica com argila a temperaturas superiores a 1000°C são permanentes e irreversíveis. Essas mudanças são físicas e químicas, envolvendo forma, tamanho, estrutura e composição.

Para argilas deste tipo, tem-se observado que a proporção entre argila e areia influencia na qualidade do material para aplicação cerâmica. A fração areia nos depósitos da região normalmente corresponde predominantemente à composição de quartzo, o qual é mais refratário nos processamentos cerâmicos. Em geral, após queima a altas temperaturas, quanto mais argiloso for o material maior é sua retração linear, enquanto que a absorção d'água aumenta à medida que a fração mais quartzosa aumenta.

Existem vários tipos de classificação industrial de argila cerâmica. Além da divisão básica entre cerâmicas branca e vermelha, já discutida, tais classificações envolvem sempre especificações industriais, que variam conforme a companhia fabricante e o produto final desejado. Dentre as diversas classificações industriais existentes para placas cerâmicas para revestimentos, as de interesse presente em relação aos atributos medidos em laboratório dependem do tipo de tratamento térmico. Conforme o produto, a queima do suporte e esmalte pode ser simultânea (monoqueima e monoporosa) ou consecutiva (biqueima).

Para argilas tipo monoqueima e monoporosa, como a placa passa apenas uma vez no forno, queimando massa e esmalte juntos, produtos mais nobres são obtidos, em decorrência da maior solidariedade de comportamento entre base e esmalte.

A argila tipo monoqueima é normalmente de cor de queima escura, sendo principalmente utilizada em pisos. Quando comparado à argila monoporosa, apresenta um grau de compactação maior; o esmalte utilizado é menos permeável. A absorção d'água pós-queima é baixa, normalmente menor que 5%.

A argila tipo monoporosa apresenta cor de queima clara, além da curva de queima distinta, resultando em uma maior absorção d'água (maior porosidade), menor retração linear e um maior brilho no produto final, decorrente do tipo de esmalte brilhante utilizado. O grau de compactação é menor que na argila monoqueima. Atualmente sua utilização principal é na fabricação de azulejos.

Já para argilas tipo biqueima, a placa passa duas vezes no forno: a primeira para queimar a base logo após a conformação e depois para sinterizar o esmalte. É mais destinada a revestimentos de parede (tipo azulejo).

Para a jazida em apreço, o interesse do Grupo Eliane centra-se na obtenção de matérias-primas utilizáveis como argila monoporosa (mais nobre) e argila biqueima. Para enquadrar-se nestes padrões de qualidade, a argila deve preencher determinados requisitos industriais em relação às suas características pós-queima, especialmente absorção d'água, retração linear e cor de queima.

A cor de queima é um parâmetro mais subjetivo e sujeito à mudanças com o tempo conforme as mudanças do mercado consumidor dos produtos finais. Em geral, para tais tipos de argila, especialmente a argila monoporosa, cores mais claras em tons de branco ou bege claro são preferidas; enquanto que para a argila biqueima cores marrom escuras são aceitas.

A cor de queima não se mostrou uma variável crítica para o depósito em estudo, conforme abordado em Stangler (1999). Por essa razão, não foi incluída como variável de qualidade no estudo geoestatístico desenvolvido, assumindo-se que tal parâmetro seja aceitável para a maior parte das

amostras, especialmente em se tratando de argilas tipo biqueima, de ocorrência mais expressiva na área. Para uma argila quartzo-caulinítica (bastante silicosa) como a ocorrente na área em estudo (Tabelas 2.1 e 2.1), a cor de queima geralmente tende a ser mais clara, o que se confirma nesta área, onde mais de 90% das amostras apresentam cor clara (bege) pós-queima (Stangler, 1999). As amostras de cor rosa ou vermelho concentram-se preferencialmente no tálus.

A Tabela 2.3 sumariza os limites aceitos para cada tipo de argila cerâmica, de acordo com os parâmetros de qualidade definidos acima. Para classificação em um dos dois tipos, o preenchimento dos requisitos deve ser simultâneo para as duas variáveis. No caso do material ser enquadrável em distintos tipos conforme a propriedade considerada, sua classificação é como biqueima. Já para o caso do enquadramento em um dos dois tipos apenas para uma propriedade, o material passa a ser considerado como estéril.

**Tabela 2.3 - Especificações para os dois tipos de argila cerâmica.**

	Absorção d'água (%)	Retração Linear (%)
Argila tipo Monoporosa	10 - 15 %	0 - 1,5 %
Argila tipo Biqueima	10 - 20 %	0 - 2,5 %

É importante ter em mente que a mistura de materiais é muito comum na mineração ligada a matérias-primas cerâmicas deste tipo. Normalmente, este constitui o único tratamento (homogeneização) dado ao material antes de seguir para o processamento cerâmico propriamente dito. Ou seja, no estudo de caso presente materiais com características na transição para um ou outro tipo podem ser misturados com um ou com outro destes, dependendo das necessidades do momento.

Assim, os parâmetros de qualidade absorção d'água e retração linear correspondem no presente estudo geoestatístico às variáveis de qualidade a serem avaliadas. Juntamente com a espessura do horizonte argiloso,

constituirão a base para a classificação e quantificação de recursos/reservas e incertezas associadas, apresentadas nos capítulos 3 e 4 dessa dissertação.

# Capítulo 3

## Definição dos Recursos Geológicos

Informações industriais e geológicas, tais como as discorridas no capítulo anterior, devem embasar qualitativamente avaliações de reservas de matérias-primas cerâmicas. Entretanto, para o início do processo de tomada de decisões mineiras concernentes a depósitos minerais deste tipo, o ponto de partida é a quantificação dos recursos geológicos existentes.

No presente capítulo são avaliados e classificados os recursos geológicos (*in situ*) de argila presentes na área em estudo, através de estimativas por método geoestatístico (krigagem em blocos).

Na parte inicial, são brevemente revisados conceitos e fundamentos teóricos básicos da geoestatística, para a devida compreensão da metodologia aplicada no restante desta dissertação. O banco de dados propriamente dito em estudo é então a seguir introduzido. Características topográficas são apresentadas em diferentes escalas, seguidas da análise exploratória das variáveis de interesse (estatísticas básicas e distribuição geográfica dos valores amostrais). Os modelos de continuidade espacial, necessários às estimativas e simulações subseqüentes, são logo após ajustados através de variografia.

Na parte final do capítulo são aplicados tais modelos variográficos utilizando técnicas de geoestatística linear, obtendo através de krigagem ordinária valores estimados para blocos de lavra. Com isso a argila cerâmica ocorrente é classificada numa base bloco-a-bloco, nos diferentes subdomínios, e os recursos geológicos existentes são assim quantificados.

### 3.1 Considerações Preliminares

De acordo com Olea (1991 p.31), o termo “geoestatística” tem sido usado com conotações diversas e conflitantes. Por um lado, compreende o estudo de fenômenos que variam no espaço (e/ou tempo, conforme Deutsch & Journel, 1998 p.9). Por outro, numa acepção mais ampla de domínio da geologia matemática ou “geomatemática”, compreende a aplicação de métodos estatísticos para uso nas ciências da terra, em especial na geologia. A aplicação de métodos geoestatísticos na predição de teores/atributos geológicos e mineiros, bem como de reservas minerais diz respeito ao senso empregado na primeira definição. A geoestatística inclui ferramentas estatísticas que permitem o entendimento e o modelamento de variabilidade espacial (Deutsch & Journel, 1998 p.9).

A geoestatística assim entendida apareceu nos anos 50, com os trabalhos de Daniel Krige (1951) de avaliação de minas de ouro na África do Sul. Seu desenvolvimento teórico foi possível graças aos estudos de George Matheron no início da década de 60, que introduziu a “Teoria das Variáveis Regionalizadas” e conceitos como variograma e krigagem. Segundo Matheron (em Andriotti, 1988), a geoestatística compreende a aplicação do formalismo das funções aleatórias ao reconhecimento e à estimativa de fenômenos naturais.

O conceito de variável regionalizada engloba simultaneamente uma componente aleatória e uma componente estruturada dos fenômenos medidos e geoposicionados. É aleatório porque tais fenômenos não podem ser deterministicamente estimados em um dado local não amostrado, porém estruturam-se de forma probabilística, seguindo determinadas leis de continuidade espacial, onde os valores amostrais não são independentes entre si e de sua localização geográfica, como na abordagem estatística básica.

Variáveis aleatórias podem apresentar uma série de valores possíveis de acordo com alguma distribuição probabilística, por sua vez dependente de sua localização no domínio amostrado e da quantidade de informação disponível (Deutsch & Journel, 1998 p.10). Podem ser contínuas, como as

três variáveis de interesse no presente estudo de caso, ou categóricas, como tipo de rocha ou solo, por exemplo.

Uma função aleatória compreende uma série de variáveis aleatórias de um determinado atributo, definidas no interior de um domínio de interesse (Deutsch & Journel, 1998 p.9-10). Em pontos não amostrados, valores desconhecidos podem ser previstos se forem considerados como realizações (possíveis valores) de sua variável aleatória correspondente. A família destas variáveis aleatórias é definida como função aleatória, ou ainda processo estocástico, ou simplesmente campo aleatório (Armstrong, 1998 p.16-17). Uma função aleatória é caracterizada pela distribuição conjunta de qualquer série de variáveis  $Z(x_1)$ ,  $Z(x_2)$ , ...  $Z(x_k)$ , definidas nos pontos  $x_1$ ,  $x_2$ , ...  $x_k$ . Para esse tipo de modelos, é necessário assumir algumas premissas sobre as características destas distribuições, a fim de aplicar tais modelos em métodos de estimativa (krigagem) ou simulação estocástica, conforme será abordado nesta dissertação.

O embasamento teórico relacionado está apresentado amplamente por vários autores na literatura geoestatística básica, entre os quais: David (1977), Journel & Huijbregts (1978), Clark (1979), Isaaks & Srivastava (1989), Goovaerts (1997) e Armstrong (1998). A teoria de variáveis regionalizadas, base da geoestatística como ciência e originalmente proposta por Matheron (1963), é amplamente discutida em Journel & Huijbregts (1978, Cap.1). A descrição espacial de variáveis e a modelização da continuidade espacial e funções relacionadas, essencial a qualquer estudo geoestatístico, é abordada de forma bastante ampla em Isaaks & Srivastava (1989, Cap.4). As diferenças básicas entre modelamentos determinísticos e probabilísticos e as relações dos últimos com modelos de funções aleatórias, incorporando o conceito de incertezas em predições, são discutidas por Goovaerts (1997, Cap.3). Critérios de revisão dos dados e escolha das variáveis regionalizadas são abordados em Journel & Huijbregts (1978 p.196 a 201).

Métodos geoestatísticos consagrados, aplicados ao longo dessa dissertação, como a krigagem ordinária para estimativas de recursos (presente capítulo), e simulações seqüenciais Gaussianas para o estudo de variabilidade de reservas recuperáveis (Capítulo 4), incluem-se no conjunto de métodos geoestatísticos construídos sob a premissa da estacionaridade

(“geoestatística estacionária”), comuns em aplicações mineiras como a presente. Num senso mais restrito, na estatística tradicional uma variável é assumida como estacionária se sua distribuição em todos os seus momentos não varia sob translação (Armstrong, 1998 p.18). Desta forma, uma função aleatória é estacionária, e assim mantém-se ao longo do domínio de interesse, se para qualquer incremento de distância  $h$  a distribuição de  $Z(x_1)$ ,  $Z(x_2)$ , ...  $Z(x_k)$  é a mesma que a de  $Z(x_1+h)$ ,  $Z(x_2+h)$ , ...,  $Z(x_k+h)$ , tornando a inferência estatística possível numa simples realização.

Porém, para aplicações geoestatísticas propriamente ditas, especialmente no campo mineiro, a invariabilidade dos momentos é impossível de ser verificada a contento, a partir dos geralmente limitados dados experimentais. Assim, são usualmente requeridos que apenas os dois primeiros momentos (média e covariância) sejam constantes, caracterizando o que se conhece por “fraca” estacionaridade ou estacionaridade de 2ª ordem (Armstrong, 1998 p.18). Em suma, o valor esperado (média) da variável aleatória  $Z(x)$  precisa ser constante para todos os pontos  $x$ , conforme:

$$E[Z(x)] = m(x) = m \quad (3.1)$$

Além disso, a função covariância entre dois pontos  $x$  e  $x+h$  (ponto separado de  $x$  a uma distância correspondente ao vetor  $h$ , de magnitude e direção definidas) depende do vetor  $h$  mas não do valor no ponto  $x$  propriamente dito, conforme:

$$E[Z(x) Z(x+h)] - m^2 = C(h) \quad (3.2)$$

Assim sendo, a variância dos dados é, por construção, igual ao valor esperado da covariância numa distância 0:  $C(0)$ .

Olea (1999, p.74) define que os dados em si não podem ser considerados como estacionários; de fato a hipótese de estacionaridade é que é assumida no modelo. Como essa premissa é bastante forte e difícil de ser verificada integralmente, será visto mais adiante que para métodos de krigagem ordinária e de simulação seqüencial Gaussiana aqui aplicados, uma estacionaridade local pode perfeitamente ser assumida nos modelos



empregados, relaxando ainda mais a exigência de estacionaridade global de 2ª ordem para aplicação de tais métodos.

A observação de respeito à premissa da estacionaridade de 2ª ordem, no sentido de trabalhar-se com domínios homogêneos geoestatisticamente, foi fundamental no presente trabalho na divisão correspondente aos subdomínios geológicos/geoestatísticos, como será visto adiante. Métodos não-estacionários, bastante freqüentes em aplicações de estudos de reservatórios petrolíferos, não serão aqui abordados.

A ferramenta básica para modelamento espacial de fenômenos naturais, e por extensão para estimativas e estudos de variabilidade por simulações, é o semi-variograma, ou mais genericamente falando, o variograma. Outros tipos de funções aleatórias quantificam também relações espaciais de continuidade entre pontos amostrais (“variogramas” *latu sensu*). Porém aqui nesta dissertação, sempre que o texto se referir a variogramas, compreenda-se a função semi-variograma.

O variograma quantifica correlações espaciais entre observações, dispostas a diferentes distâncias e direções definidas. O diferencial destas correlações entre si, conforme a localização dos pontos amostrados em relação a eles próprios e ao ponto a ser estimado/simulado, fornece os pesos atribuídos a cada amostra, a serem empregados nas predições. Maiores discussões em torno da variografia e o modelamento de continuidade espacial em geral, com sua aplicação no presente estudo de caso, serão abordados no item 3.3.

O método de estimativa geoestatística por excelência é a krigagem, em suas diversas modalidades. Compreende técnicas de regressão linear que minimizam a variância de estimativa para um dado modelo de continuidade espacial (modelo variográfico), envolvendo a resolução de sistemas de equações. A krigagem fornece valores mais prováveis para cada ponto ou bloco (como o presente estudo) a ser estimado. Maiores detalhes teóricos serão abordados no item 3.4.1 .

O estudo de variabilidade de uma determinada variável regionalizada é comumente executado via simulações estocásticas, quando gera-se uma série de realizações possíveis para cada ponto, segundo funções aleatórias. Isso resulta em diferentes cenários, os quais podem fornecer uma dimensão,

tanto local quanto global, do grau de variabilidade ou de incerteza que se tem de um determinado atributo em um determinado depósito.

Entre os diversos tipos de simulação estocástica incluem-se aqueles que apelam para uma abordagem multi-Gaussiana, entre os quais o método de simulação seqüencial Gaussiana, adotado no presente trabalho. Maiores detalhes teóricos serão abordados na parte inicial do Capítulo 4.

### **3. 2 Análise Exploratória dos Dados**

Esta etapa de trabalho constou da análise inicial dos dados disponíveis para o estudo de caso, englobando sua revisão, organização, sistematização, e investigação de feições mais marcantes, preparando-os assim para o tratamento geoestatístico subsequente. Características estatísticas básicas dos dados de pesquisa por sondagem a trado manual (objeto de estudo dessa dissertação) são calculadas, bem como o exame da disposição dos valores amostrais ao longo da área pesquisada.

A análise dos dados disponíveis começa neste item com um exame das feições topográficas da área e arredores. A conformação da superfície do terreno, em especial mudanças no seu gradiente de inclinação, ajudou na definição de domínios geológicos discutida no capítulo anterior.

#### **3.2.1 Topografia**

A representação topográfica da área e arredores é aqui apresentada tanto a partir de trabalhos topográficos anteriores - cartas do IBGE (1:50.000) e da CEPCAN (1:10.000) - quanto a partir de levantamento planialtimétrico de detalhe, específico para os trabalhos nos limites da área.

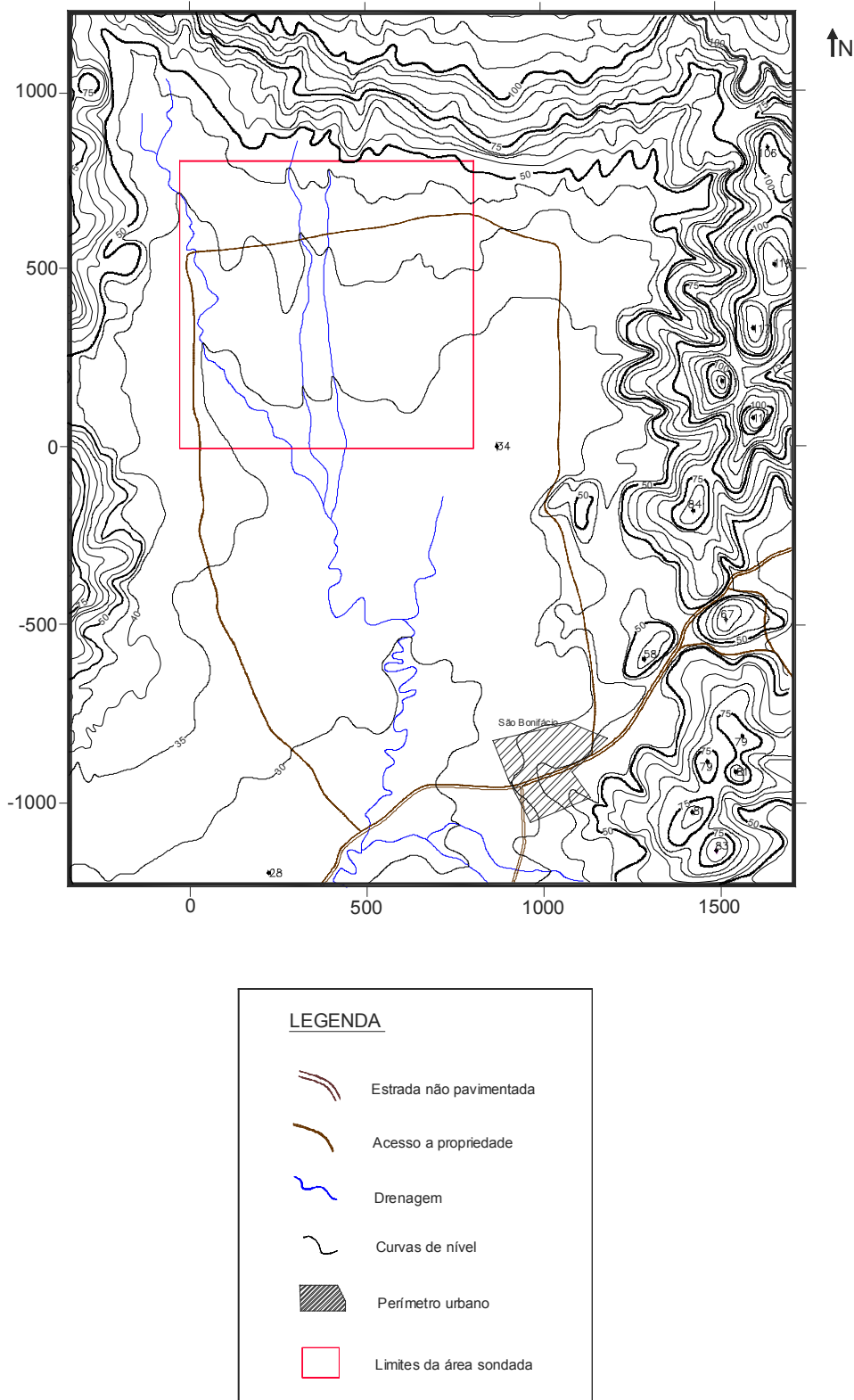
Como base topográfica de semi-detalle pré-existente, foi utilizada a carta de São Bento Baixo (IBGE, escala 1:50.000), com curvas de nível com equidistância de 20m, cobrindo a área pesquisada (Figura 2.2). subsequentes. A partir de plantas topográficas em escala 1:10.000 disponíveis para a zona carbonífera do Sul do Estado de Santa Catarina

(CEPCAN - Comissão Executiva do Plano do Carvão Nacional, 1956) - onde se encontra a área em questão - conjugou-se as informações de relevo, carta topográfica, geologia e posteriormente parâmetros relevantes levantados pelas sondagens a trado. Inicialmente foi digitalizada a porção de interesse nas cartas citadas na escala 1:10.000, representando as feições mais importantes tais como: curvas de nível, estradas, área sondada e as drenagens principais. O mapa foi georeferenciado com o sistema de coordenadas locais adotado para a sondagem. O resultado final do mapa pode ser visualizado na Figura 3.1.

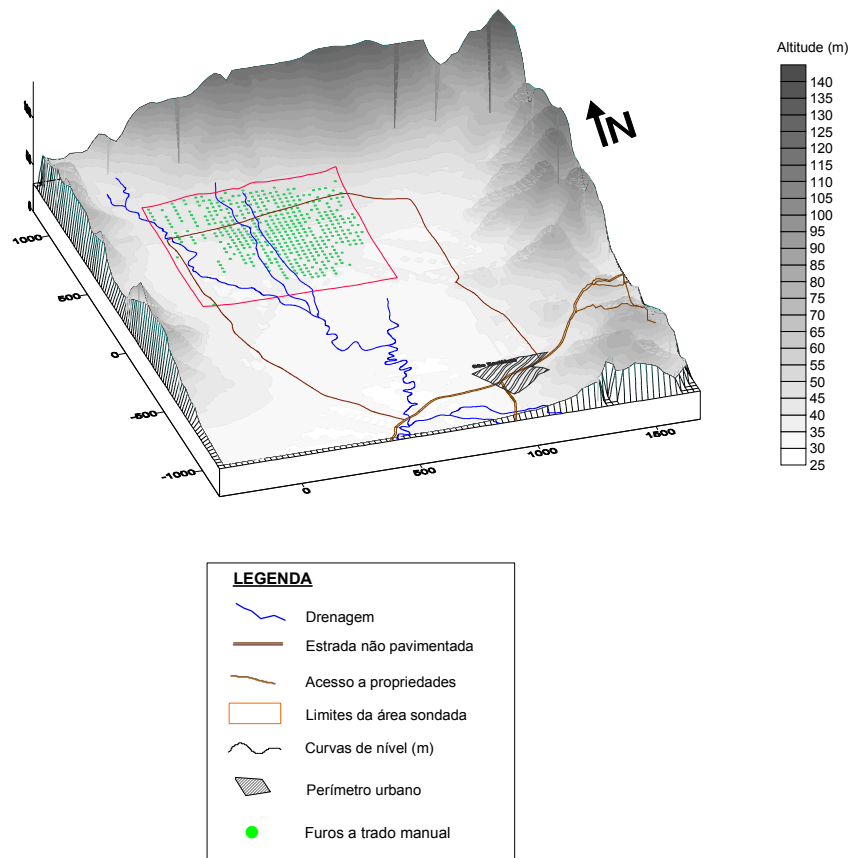
No intuito de investigar a potencialidade da área de interesse para ocorrência de reservas significativas de argila cerâmica, uma campanha sistemática de sondagem a trado manual foi executada, conforme será detalhado no item 3.2.2 . A Figura 3.2 mostra a situação da malha de furos, locada sobre o mapa-relevo local. Observa-se que os furos a trado foram executados em uma pequena planície plana, com suave inclinação de N para S, um pouco mais acidentada em sua porção N (tálus). Este vale é circundado por morros, particularmente a N por uma encosta mais íngreme.

Após os trabalhos iniciais de demarcação da área a ser sondada, mostrou-se necessário um modelamento digital de terreno para melhor delimitar os dois subdomínios geológicos, servindo como base também para a posterior análise de relações estéril-minério (item 3.5). Um modelo digital de terreno, na definição genérica contida em Schmitt & Bisquay (2000), é um mapa que fornece a altitude em cada ponto, nos limites de uma determinada área de interesse. Numa perspectiva computacional, compreende imagens definidas a partir de uma malha regular.

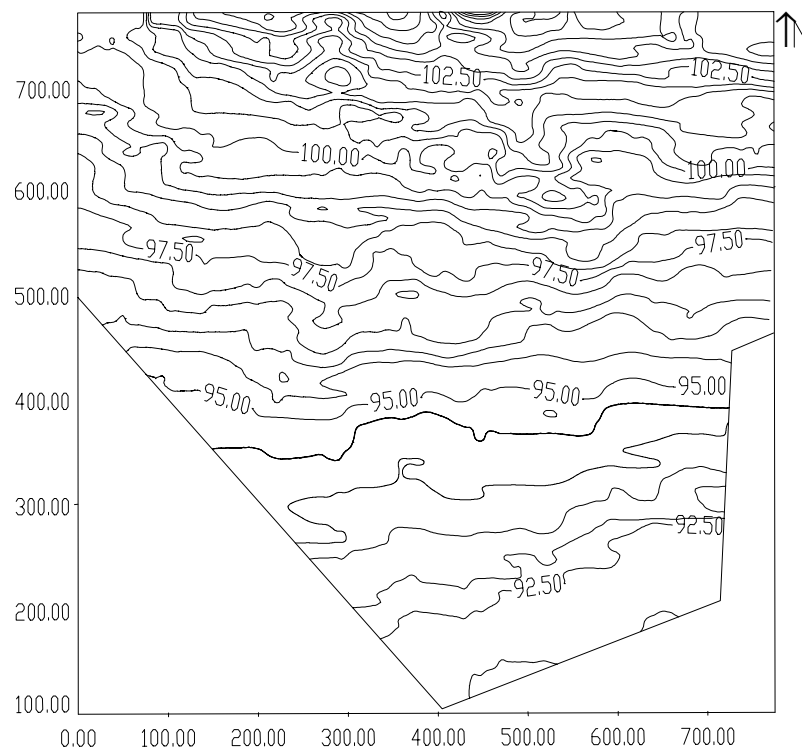
Um levantamento topográfico planialtimétrico de detalhe foi realizado nos limites da área sondada. Os dados coletados em campo foram utilizados para construir um mapa topográfico via interpolação por krigagem ordinária [Stangler et al. (2001b), Apêndice A] numa malha regular 10 x 10 m e curvas de nível com equidistância de 0.5 m. A Figura 3.3 apresenta o mapa de contorno final obtido para elevação, onde foi usado um sistema de coordenadas local (as coordenadas XY são as mesmas do sistema de coordenadas da sondagem a trado). Note que esse mapa cobre a área total sondada.



**Figura 3.1 - Mapa base contendo a delimitação da área sondada (coordenadas XY locais em metros, adotadas para a malha de sondagem; altitudes acima do nível do mar).**



**Figura 3.2 - Mapa de relevo da área estudada, contendo informações topográficas e localização dos furos de trado executados (exagero vertical: 3 X; altitudes acima do nível do mar).**



**Figura 3.3. Elevação topográfica para a área de estudo. Coordenadas XYZ locais, em metros.**

### 3.2.2 Banco de Dados

O banco de dados original é constituído de 476 amostras de comprimento variável, oriundas de 452 furos de sondagem a trado manual ( $\phi = 1''$ ), em área de direitos minerários pertencentes ao Grupo Eliane (Cocal do Sul/SC). A amostragem foi distribuída numa área total de 775m x 775m, em malha regular mas incompleta de 25m x 25m, conforme mostra a Figura 3.4a. Neste mapa, já estão diferenciados os dois subdomínios geológicos mencionados anteriormente, separados com base na geologia e topografia, conforme já abordado nesta dissertação e em trabalho anterior (Stangler et al., 2001a, Apêndice A), e ainda em tendências cerâmicas e variográficas distintas, conforme será visto ao longo deste capítulo.

O Apêndice C apresenta o banco de dados já discriminando amostras dos dois diferentes subdomínios considerados. A necessidade de subdivisão do banco de dados original em função do reconhecimento de populações distintas, cumprindo requisitos de estacionaridade conforme discutido no início deste capítulo, juntamente com os critérios a serem considerados em subdivisões são discutidos em Isaaks & Srivastava (1989, p.75-76).

O suporte amostral é variável, com amostras de distintos comprimentos. Isso é devido à relativa pequena espessura dos intervalos comparados com a dimensão horizontal do depósito, inviabilizando a subdivisão em intervalos regulares menores. Suporte, no contexto geoestatístico, é o tamanho/volume físico de uma amostra ou bloco sobre o qual é definida a medida. Mais especificamente, é o “volume  $n$ -dimensional no qual valores linearmente médios de uma variável regionalizada podem ser computados” (Olea, 1991 p.76).

Para a maior parte dos furos, apenas um intervalo amostral está presente. Nestes casos, cada um dos intervalos foi analisado posteriormente como uma amostra simples, unitária. Estes intervalos foram coletados em cada furo a partir do limite vertical entre a cobertura estéril de solo orgânico e o horizonte argiloso de interesse, até a base desse horizonte em seu contato com o substrato rochoso abaixo (folhelho escuro da Formação Serra Alta), não penetrável pelo trado manual.

As variáveis registradas nos trabalhos de exploração e aqui consideradas foram:

- (i) identificação do furo: de F007 a F748 (seqüência incompleta);
- (ii) coordenadas locais X e Y (0 a 775 m nos dois eixos);
- (iii) espessura da cobertura estéril (não amostrada), em metros;
- (iv) espessura do horizonte argiloso amostrado, em metros.

As variáveis de laboratório foram obtidas a partir de ensaios cerâmicos realizados nos testemunhos de sondagem coletados. Correspondem aos parâmetros de qualidade abordados anteriormente (item 2.3), medidos pós-queima:

- (i) absorção d'água (%);
- (ii) retração linear (%).

Tais atributos industriais constituem efetivamente as variáveis de interesse na avaliação final de reservas, juntamente com a espessura do horizonte argiloso amostrado, tratada daqui em diante simplesmente como "espessura".

Entretanto, para fins de tratamento geoestatístico, especialmente para krigagem e simulação em blocos, uma variável regionalizada deve ser aditiva, i.e., o valor médio de uma variável sobre um determinado volume ou área deve ser simplesmente a média aritmética de todos os  $n$  valores aí presentes. Assim, variáveis como permeabilidade por exemplo, não são aditivas. Da mesma forma, para se ter aditividade qualquer variável deve ser expressa em amostras coletadas sob um mesmo suporte. Como no caso presente isso não acontece, pois as amostras foram coletadas em diferentes comprimentos de testemunhos de furos de trado, é necessário calcular as acumulações das variáveis de qualidade, para torná-las em igual suporte. Isso foi feito apenas multiplicando os valores originais de laboratório por cada correspondente espessura amostrada. Desta forma, os valores de estimativa/simulação final para a variável propriamente dita podem ser obtidos dividindo a acumulação

estimada/simulada por sua respectiva espessura estimada/simulada, bloco-a-bloco.

O uso destas “variáveis de trabalho” é comum na literatura geoestatística (David, 1977 p.89-90, Krige, 1981 e Journel e Huijbregts, 1978 p.244-247).

Portanto, as variáveis efetivamente submetidas à variografia, krigagem e simulação são listadas abaixo:

- (i) espessura (m);
- (ii) acumulação de absorção d'água (%.m);
- (iii) acumulação de retração linear (%.m).

Características originalmente registradas como a cor do material *in natura* e a cor pós-queima não foram aqui consideradas como variáveis de interesse na análise geoestatística: a cor pós-queima pelos motivos abordados no item 2.3, e a cor *in natura* por não ter sido verificada nenhuma relação sistemática entre as cores pré e pós-queima (Stangler, 1999).

### **3.2.2.1 Limites Definitivos**

Antes de qualquer estudo de continuidade espacial e estimativas/simulações resultantes, é essencial definir os limites geográficos do(s) domínio(s) a ser(em) considerado(s) apropriadamente. Da mesma forma é importante definir-se desde o início o tipo de abordagem a ser imposta, 2D ou 3D (bi ou tridimensional), determinando assim a maneira como a informação amostral será tratada. Essas são etapas preliminares importantes e conseqüentemente importantes decisões daí são tomadas (Armstrong, 1998 Cap.5).

Neste sentido, um estudo de tendências gerais na distribuição de valores amostrais nas variáveis de qualidade foi executado. Especial atenção foi dispensada a valores anômalos e seu posicionamento geográfico no depósito, bem como a variações verticais dos furos de múltiplas amostras, conforme será abordado adiante.



A maior parte dos dados provém de furos de trado manual com apenas um intervalo amostrado, de suporte (espessura) variável, conforme comentado anteriormente. Para tais situações, a abordagem em 2D trabalhando com acumulações (multiplicação do parâmetro por sua espessura) é mais adequada. Entretanto, neste banco de dados inicial observa-se em alguns furos o registro de mais de um intervalo amostrado, junto ao subdomínio tálus. Esta é a porção mais espessa do depósito, apresentando algumas variações verticais macroscópicas, as quais incluem as já mencionadas intercalações de material estéril limonítico, e também o emplihamento da argila da planície sobreposta pelo tálus, conforme discutido no item 2.2.2, e mostrado nas seções verticais esquemáticas da Figura 2.7.

Essas variações macroscópicas verticais foram observadas para 20 furos na parte norte central do depósito (Figura 3.4a), mais 8 furos na porção NE do tálus, cujas amostras acabaram sendo suprimidas do banco de dados final, conforme será abordado adiante neste item. Nestes casos, a amostragem foi subdividida em dois ou três intervalos, verticalmente. Destes furos, sete interceptaram argila com intercalações decimétricas de contaminações limoníticas, correspondendo a um material considerado ceramicamente estéril e contaminante (Figuras 2.7 e 2.13). Tais intercalações foram separadas, juntando os segmentos acima e abaixo dessas e formando uma única amostra a ser analisada.

A distribuição espacial das variáveis e a espessura foram estudados em detalhe nesta região, incluindo observações em campo, tentando correlacionar seus comportamentos aparentes com as condições geológicas e geométricas locais. Este estudo mostrou quão errática esta região é, comparada com o restante do depósito (mesmo quando comparada ao subdomínio tálus como um todo, que por sua geologia já compõe um domínio heterogêneo por natureza), e também a dificuldade em visualizar alguma continuidade horizontal para possíveis níveis com constância suficiente. A irregularidade do comprimento amostral e suas relativamente pequenas dimensões não permitiram uma maneira racional de regularizá-las verticalmente.

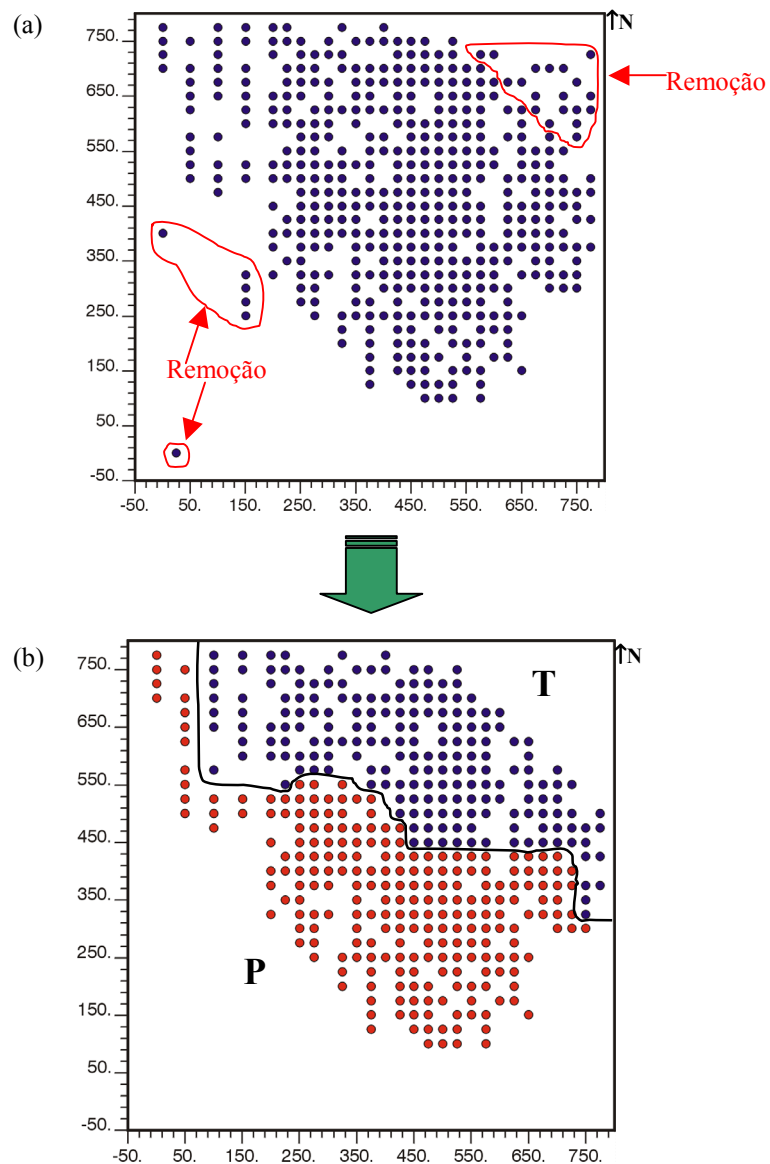
Em relação aos sete furos com intercalações limoníticas, normalmente a presença deste tipo de contaminação neste tipo de depósitos é devida à existência de fraturas e/ou às transições de granulometria, o que parece ser o caso, uma vez que aparece na parte mais espessa do domínio do tálus e de todo o depósito em estudo, com todas as variações faciológicas já comentadas. De todos os 20 furos com mais de uma amostra, apenas quatro apresentam juntos no mesmo furo dois intervalos positivos (do ponto de vista cerâmico), de forma descontínua lateralmente. Além disso, quase todos os furos apresentam os intervalos basais de qualidade cerâmica muito melhor que os de topo (apenas duas amostras dos furos com intercalações limoníticas enquadram-se nos tipos cerâmicos de interesse).

Com base em todos os aspectos descritos acima, foi decidido trabalhar com acumulações numa abordagem bidimensional (2D), considerando apenas os intervalos basais. Estas amostras removidas incluem os intervalos de topo de furos com intercalações limoníticas.

Algumas amostras locadas em regiões periféricas foram eliminadas para o estudo geoestatístico posterior, nas bordas NE do subdomínio tálus, e SW do subdomínio planície (Figura 3.4). No primeiro caso, essa supressão foi devido à baixa qualidade cerâmica das amostras, com valores afastando-se em conjunto consideravelmente das especificações industriais requeridas, sugerindo na verdade uma outra população geoestatística (Stangler, 1999). A baixa qualidade cerâmica deste material, aliado ao fato de encontrar-se em região residencial, indica uma probabilidade muito baixa de um dia essa região ser minerada para tal bem mineral. No caso do canto SW da área perfurada, as amostras foram removidas em função de seu isolamento geográfico, decorrente da presença de canal de drenagem separando-as do restante do depósito.

Portanto, após a remoção de amostras, das originalmente 477 amostras distribuídas em 452 furos, restaram 422 amostras, uma por furo e com comprimento variável, distribuídas da seguinte forma: 231 amostras na planície e 191 no tálus. Uma amostra do subdomínio planície foi perdida por problemas de laboratório; independente disso, a espessura de argila amostrada foi registrada. Isso significa que há apenas 230 amostras para as variáveis de qualidade (por extensão para suas acumulações).

O mapa definitivo de locação das amostras pode ser visto na Figura 3.4b. Somente essas amostras foram efetivamente levadas em consideração em toda a avaliação geoestatística subsequente. Desta forma, acredita-se que se torne mais viável o emprego de metodologias geoestatísticas sob a hipótese da estacionaridade com populações mais homogêneas, conforme discutido no item 3.1.



**Figura 3.4** Locação de todos os furos de trado em malha 25m x 25m, mostrando amostras removidas em (a), e campo amostral definitivo, com contato geológico transicional demarcado em linha contínua (“T” = tálus; “P” = planície) em (b).

### 3.2.2.2 Características Amostras

A organização, sistematização e sumarização dos dados, numa fase inicial de trabalhos geoestatísticos, é usualmente imprescindível, para que se possa melhor diligenciar os trabalhos a seguir. Os elementos e passos necessários a uma organização preliminar dos dados associada à descrição univariada das variáveis de interesse são claramente descritos em Isaaks & Srivastava (1989, Cap.2).

Após a definição do campo a ser considerado para toda a avaliação geoestatística subsequente, pode-se agora visualizar mais confortavelmente os mapas de amostragem para todas as variáveis, a fim de que se tenha uma idéia inicial da distribuição espacial horizontal dos valores amostrais, simultaneamente ao estudo de suas características estatísticas básicas. Através da observação de estruturas visualmente bem marcadas, bem como de suas distribuições univariadas e inter-relações entre as variáveis, é possível começar a tentar correlacionar feições observadas com fenômenos geológicos. A investigação estatística básica das variáveis, mesmo não fornecendo em si nenhuma informação espacial, indica feições e tendências numéricas globais dessas variáveis.

A conjugação das informações estatísticas básicas com a localização e arranjo dos valores amostrais, tanto das variáveis originais quanto das transformadas (acumulações), provê assim uma base física de referência para condução da etapa imediatamente subsequente, a variografia. A abordagem das informações dos dados discutidas acima é feita a seguir, separadamente para cada um dos subdomínios geológico/geoestatísticos.

#### **Distribuições Geográficas**

##### *Planície*

O subdomínio planície, localizado na porção S da área total avaliada, apresenta para as três variáveis de interesse (e respectivas acumulações) características de disposição geográfica que evidenciam algumas tendências.

Tais tendências são distintas do outro subdomínio tálus, notadamente para as variáveis de qualidade (em especial retração linear).

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram os valores das três variáveis nas amostras dos furos de trado executados, locados no mapa-base topográfico já com a discriminação dos dois subdomínios geológicos mencionados. As amostras periféricas cortadas foram propositalmente mantidas nestes mapas (comparar com Figura 3.4), no intuito de mostrar: (i) suas marcantes diferenças nas tendências cerâmicas em relação ao restante das amostras, na direção da pior qualidade para o canto NE do tálus; e (ii) o isolamento geográfico no SW da área, em relação à planície e à área como um todo.

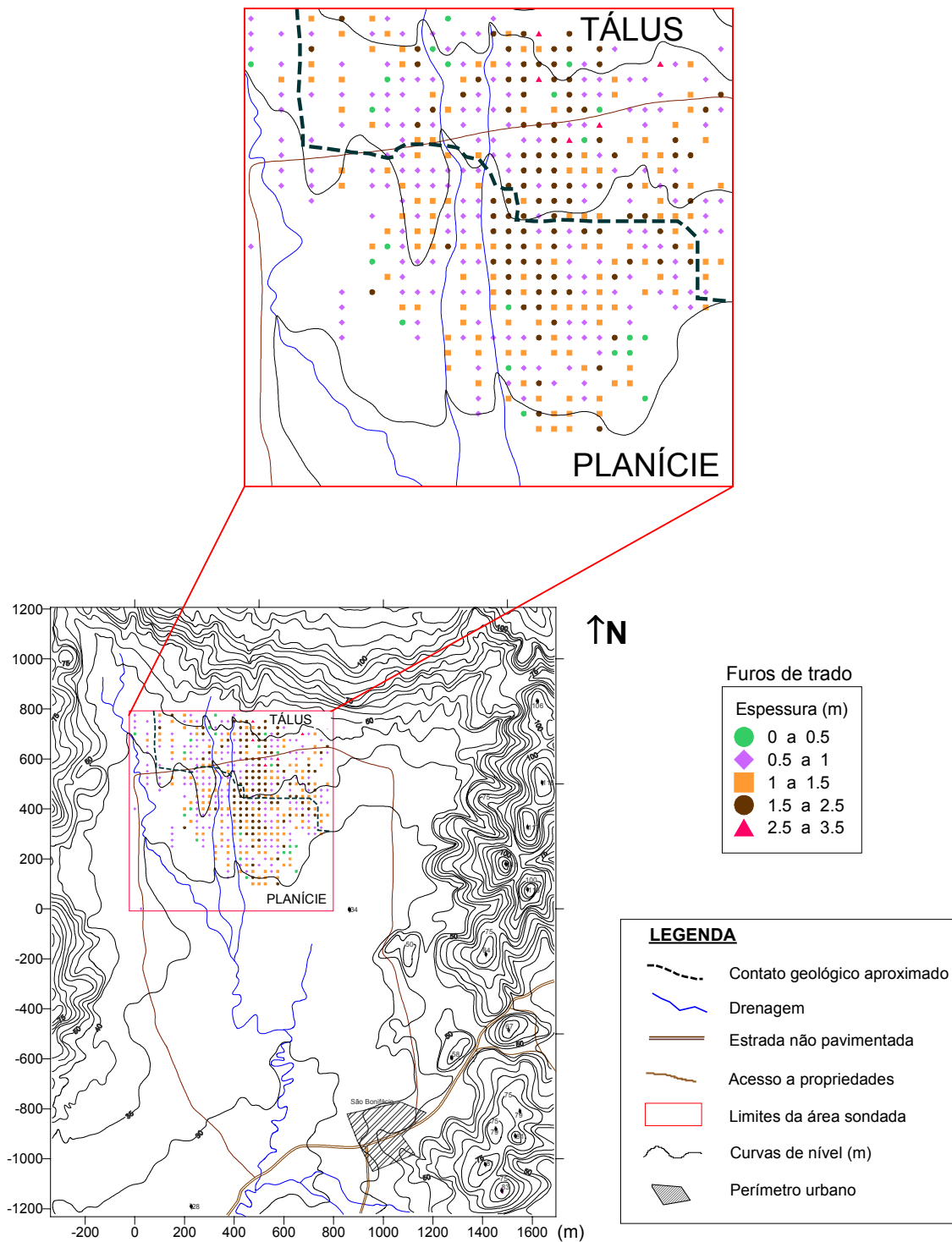
Para a variável espessura (Figura 3.5), observa-se uma concentração de intervalos mais espessos no centro da área, orientados N-S, mostrando a influência dos canais de drenagem relacionados com o tálus. Esses canais de direção N-S estão atualmente mais a W deste paleo-canal, mostrando a migração dos cursos d'água e o retrabalhamento existentes. Valores menores tendem a concentrar-se mais na periferia, de forma irregular. A classe de valores entre 1,0 e 1,5 m é amplamente predominante.

Em relação à absorção d'água (Figura 3.6), é nítida a tendência dos valores serem maiores na planície que no tálus. Os maiores valores concentram-se junto ao extremo NW do subdomínio, indicando um material comparativamente mais arenoso, por estar mais próximo da área fonte, conforme discussões do Capítulo 2 sobre a relação entre a geologia e características cerâmicas. Enquanto isso, os menores valores tendem a se concentrar no flanco E, na transição para o subdomínio tálus. Pode-se observar também uma continuidade de orientação NW-SE para valores similares entre si.

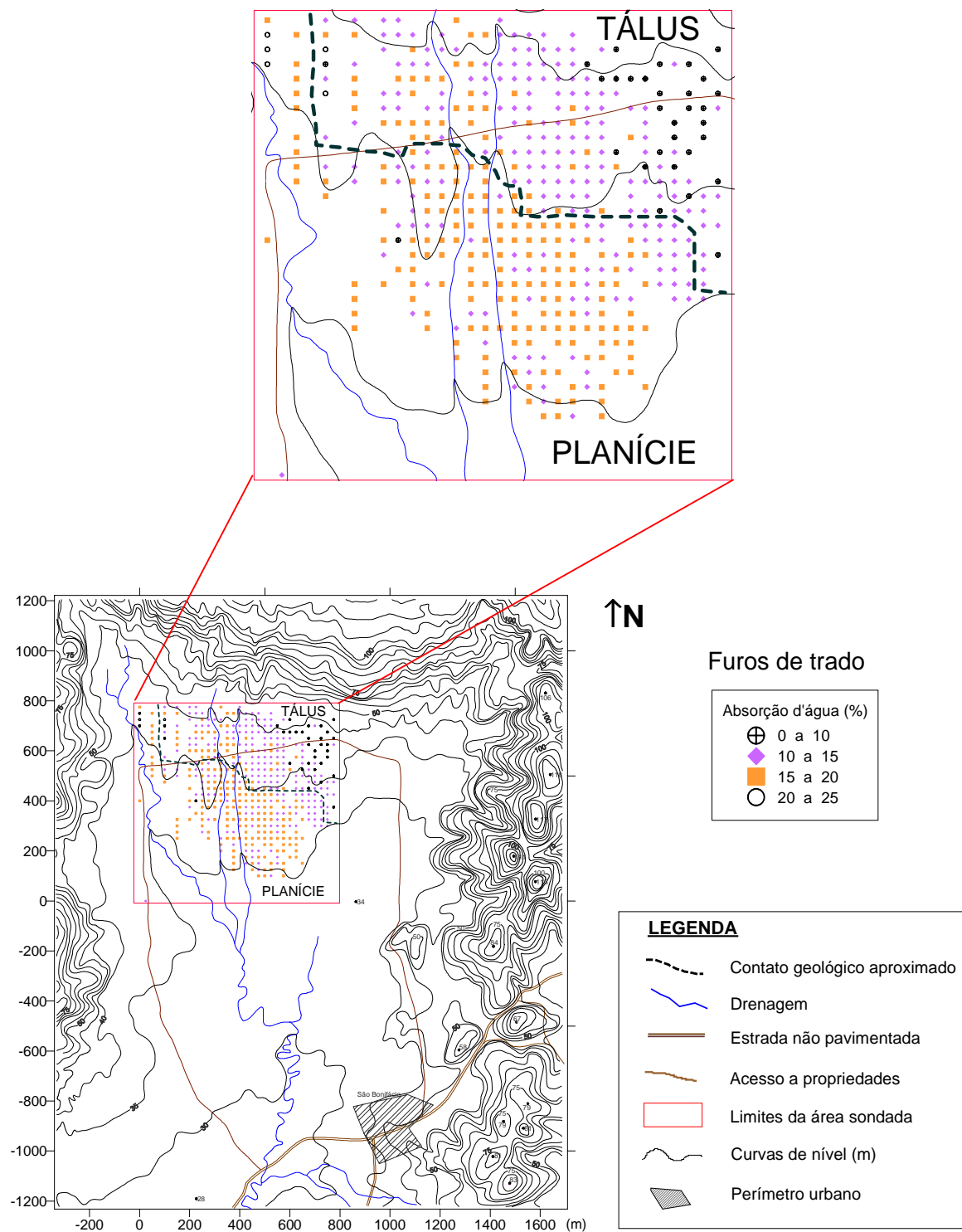
Para retração linear (Figura 3.7), essa mesma orientação NW-SE persiste. Os valores em geral são nitidamente menores que no tálus, indicando uma tendência oposta à da absorção d'água. Isso vem ao encontro da forte correlação negativa entre as duas variáveis, a ser abordada adiante, nesse mesmo item. Alguns valores mais altos e mais erráticos espalham-se na porção SW, mais próxima da drenagem principal, região de maior migração e retrabalhamento, o que possivelmente contribuiu para essa maior variabilidade dos valores.

As acumulações de variáveis de qualidade com espessura, compreendendo efetivamente as variáveis de trabalho, aditivas, conforme discutido anteriormente, apresentam comportamento distinto para a distribuição geográfica dos valores.

A acumulação de absorção d'água (Figura 3.8a) é nitidamente mais influenciada pela espessura do que pela variável original propriamente dita (vide Figuras 3.5 e 3.6, comparando com Figura 3.8a), com maiores valores concentrados no centro-norte, na transição para o tálus. Por sua vez, a retração linear permanece mais independente da espessura na sua acumulação, guardando grandes semelhanças de comportamento espacial com a variável original (Figuras 3.5 e 3.7, comparando com Figura 3.8b): maior continuidade a NW-SE e maiores valores na porção NE. Tais tendências de influências nas acumulações se confirmam amplamente na análise estatística básica, conforme será abordado adiante.

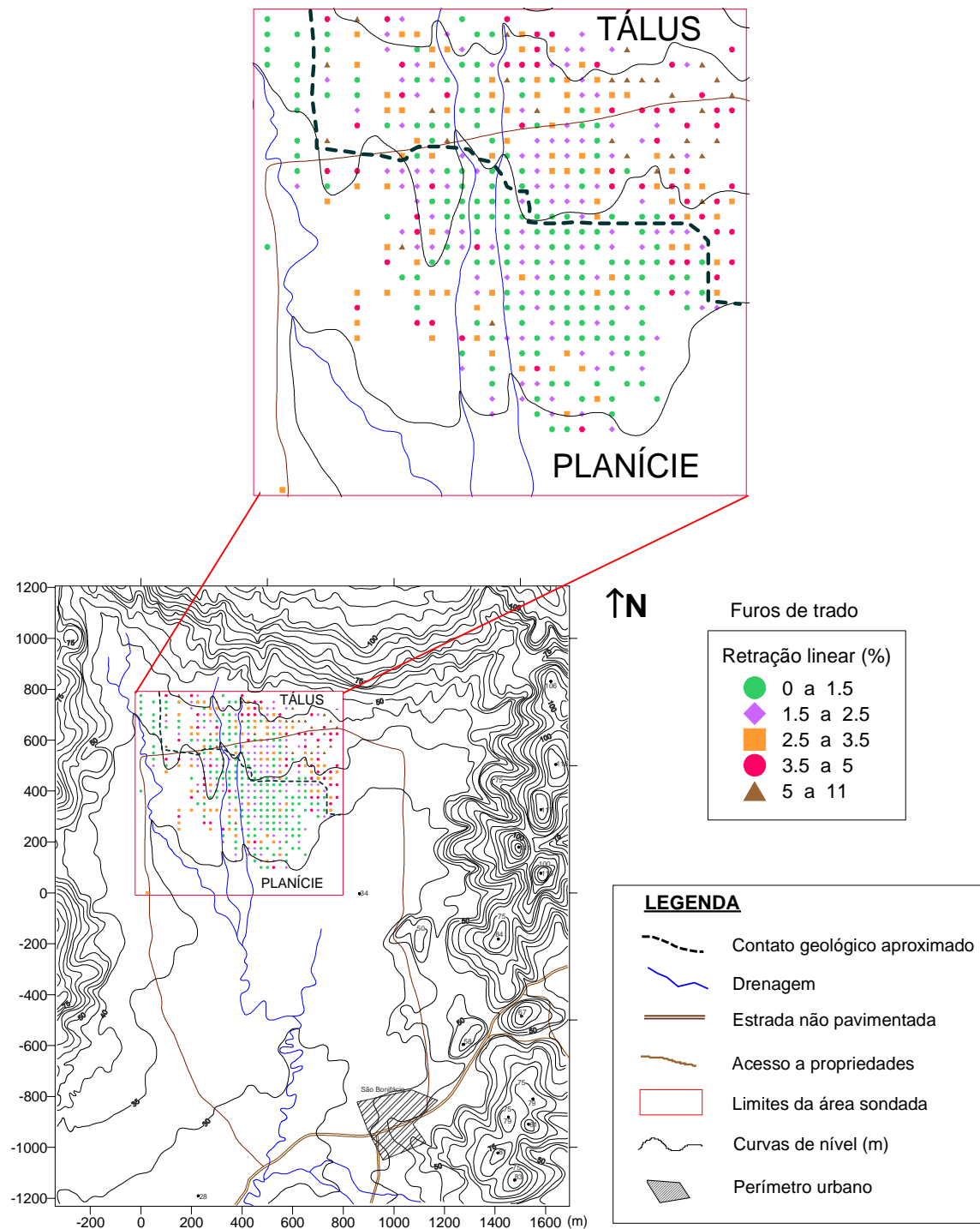


**Figura 3.5 - Mapa base com os valores amostrais de espessura de argila na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar.**

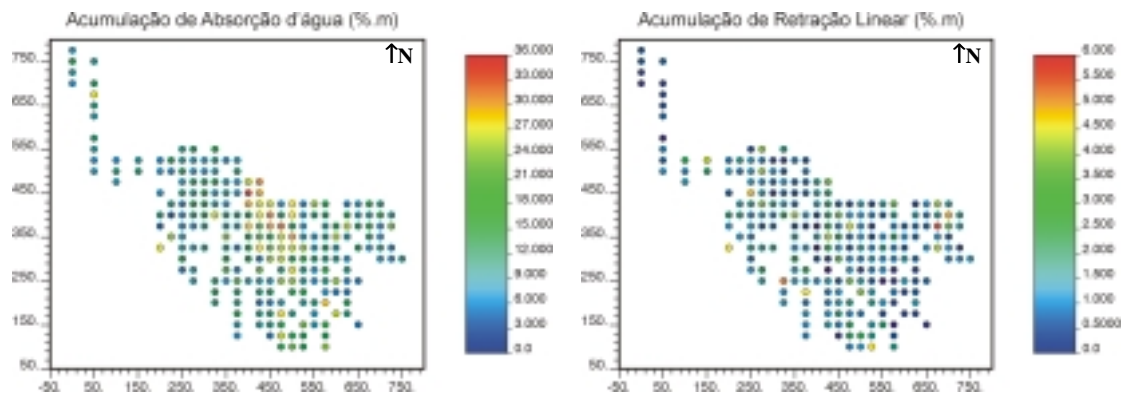


**Figura 3.6 - Mapa base com os valores amostrais de absorção d'água na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar.**





**Figura 3.7 - Mapa base com os valores amostrais de retração linear na área sondada, ampliado acima para região efetivamente pesquisada (malha 25m x 25m). Altitudes em metros acima do nível do mar.**



**Figura 3.8 - Mapas de valores amostrais de acumulação de absorção d'água (a), e de acumulação de retração linear (b). Valores em %m.**

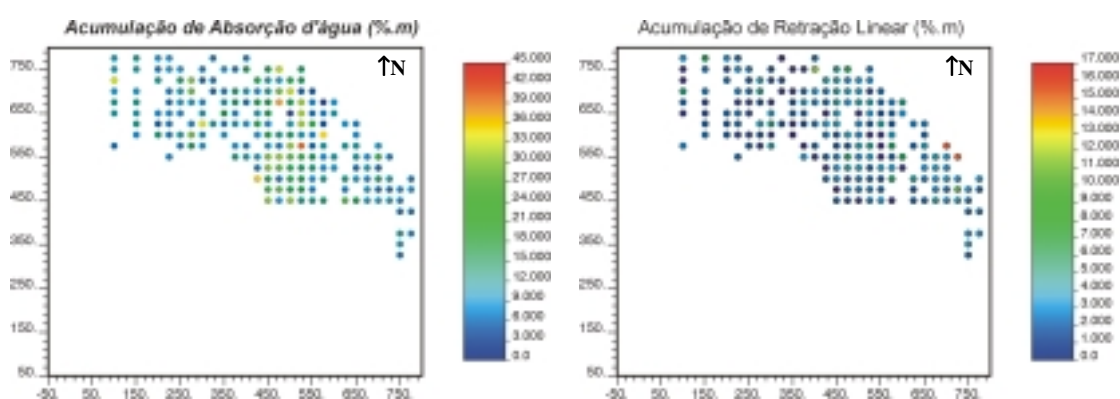
### *Tálus*

O subdomínio tálus, localizado na porção N da área total avaliada, a exemplo da planície apresenta para as três variáveis de interesse (e respectivas acumulações) características de disposição geográfica que evidenciam algumas tendências particulares. Tais tendências são distintas do outro subdomínio planície, notadamente para as variáveis de qualidade.

Para a variável espessura (Figura 3.5), persiste a concentração de intervalos mais espessos no centro da área, orientados N-S, mostrando a influência dos canais de drenagem. A gradação para valores mais baixos é brusca nesta região, contribuindo para o incremento do efeito pepita nos variogramas, conforme será visto adiante. Esses canais de direção N-S estão atualmente mais a W deste paleo-canal, mostrando a migração dos cursos d'água e o retrabalhamento existentes. Persiste a concentração de valores mais baixos na periferia, já observada para a planície.

Em relação à absorção d'água (Figura 3.6), é nítida a tendência dos valores serem maiores no subdomínio planície que no tálus, com valores mais extremos nas bordas NW e NE, neste último caso constituindo a maior parte das amostras suprimidas. A continuidade NW-SE observada para planície já não é tão evidente no tálus. Para retração linear (Figura 3.7), os valores em geral são nitidamente mais altos que na planície, além de muito mais erráticos, denotando a heterogeneidade intrínseca deste subdomínio.

As acumulações de variáveis de qualidade com espessura, compreendendo efetivamente as variáveis de trabalho, apresentam comportamento distinto para a distribuição geográfica dos valores (Figura 3.9). Persistem as tendências observadas para a planície, ainda que de forma mais irregular, de maior influência da espessura na acumulação de absorção d'água, contrapondo-se à maior independência da retração linear quando acumulada. A presença de valores significativamente altos para a acumulação de retração linear, na borda NE, é fruto de valores altos para a variável original propriamente dita.



**Figura 3.9 - Mapas de valores amostrais de acumulação de absorção d'água (a), e de acumulação de retração linear (b). Valores em %.m.**

### Análise Estatística

O caráter descritivo do exame de características estatísticas básicas das variáveis situa as tendências numéricas absolutas dos dados populacionais, tais como seu valor central (média), sua dispersão (desvio padrão/variância), simetria da distribuição e possíveis valores extremos e/ou populações distintas presentes. Ainda, o exame conjunto de correlações entre diferentes variáveis fornece subsídios para o estudo de seus comportamentos mútuos, o que pode ser útil na análise espacial subsequente. Esse tipo de informações ajuda sobremaneira na condução e balizamento das etapas seguintes.

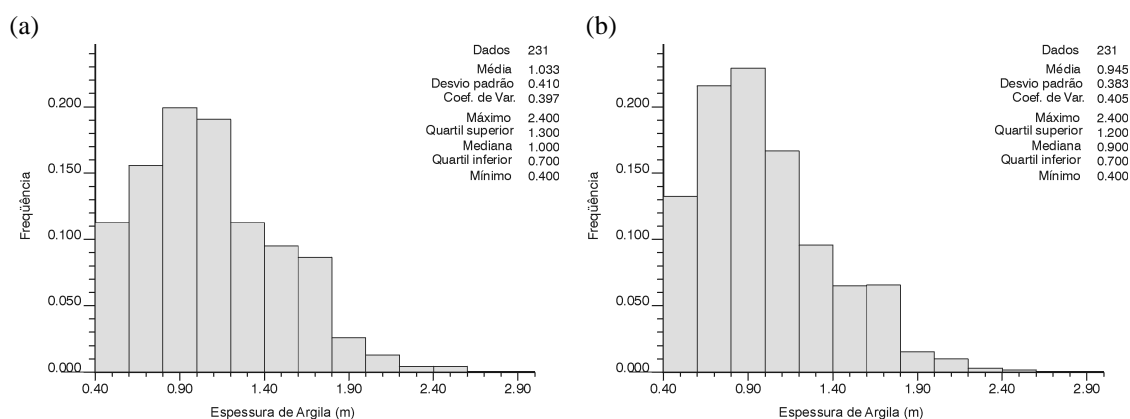
## Planície

As estatísticas básicas das variáveis de interesse no subdomínio planície são apresentadas a seguir. Para as variáveis de qualidade, tanto as variáveis originais propriamente ditas - embora não consideradas diretamente na avaliação geoestatística - quanto suas acumulações são discutidas.

Para este subdomínio, foram necessárias medidas de desagrupamento dos dados (*declustering*, ou “declusterização”, neologismo comumente usado na comunidade geoestatística brasileira), uma vez que os furos, embora distribuídos numa malha regular 25m x 25m, não foram em alguns locais realizados, em função de problemas de umidade, residências, estradas, etc. Isso propiciou uma disposição das amostras não exatamente uniforme (conforme pode ser observado nos mapas amostrais), requerendo portanto uma correção a fim de obter-se uma distribuição estatística mais representativa da população. Embora esse agrupamento dos dados (“clusterização”) não seja muito pronunciado, ainda assim é necessário seu desagrupamento para que se tenha uma distribuição de referência para as simulações, as quais foram apenas realizadas no domínio planície, conforme será visto adiante. Essa é a razão pela qual histogramas “declusterizados” foram calculados e apresentados apenas para este subdomínio.

Vários métodos de desagrupamento são usados nestes casos, e como tal são disponíveis na literatura pertinente (veja Isaaks & Srivastava, 1989, Cap.10, e Goovaerts, 1997 p.77-82, para uma discussão nos diferentes métodos de desagrupamento existentes). Esses métodos baseiam-se na premissa intuitiva de que dados em áreas mais densamente amostradas possuem uma representatividade comparativamente menor do que dados mais isolados. Isso confere a estes últimos pesos maiores no cálculo da distribuição estatística, pois supostamente são representativos de áreas maiores. No presente trabalho, foi adotado o método de células de desagrupamento (*declustering cells*, Deutsch, 1989), o qual subdivide a área total em células (=janelas móveis) de tamanho determinado a fornecer a menor média global da variável, e ao mesmo tempo uma distribuição global mais representativa da população restrita ao domínio amostrado.

A Figura 3.10 mostra os histogramas de freqüência para espessura antes e depois de aplicado o desagrupamento. A forma global do histograma e seu coeficiente de variação permaneceram praticamente inalterados com esta correção, apenas com um suave deslocamento da média, mediana e quartil superior em direção a valores mais baixos.



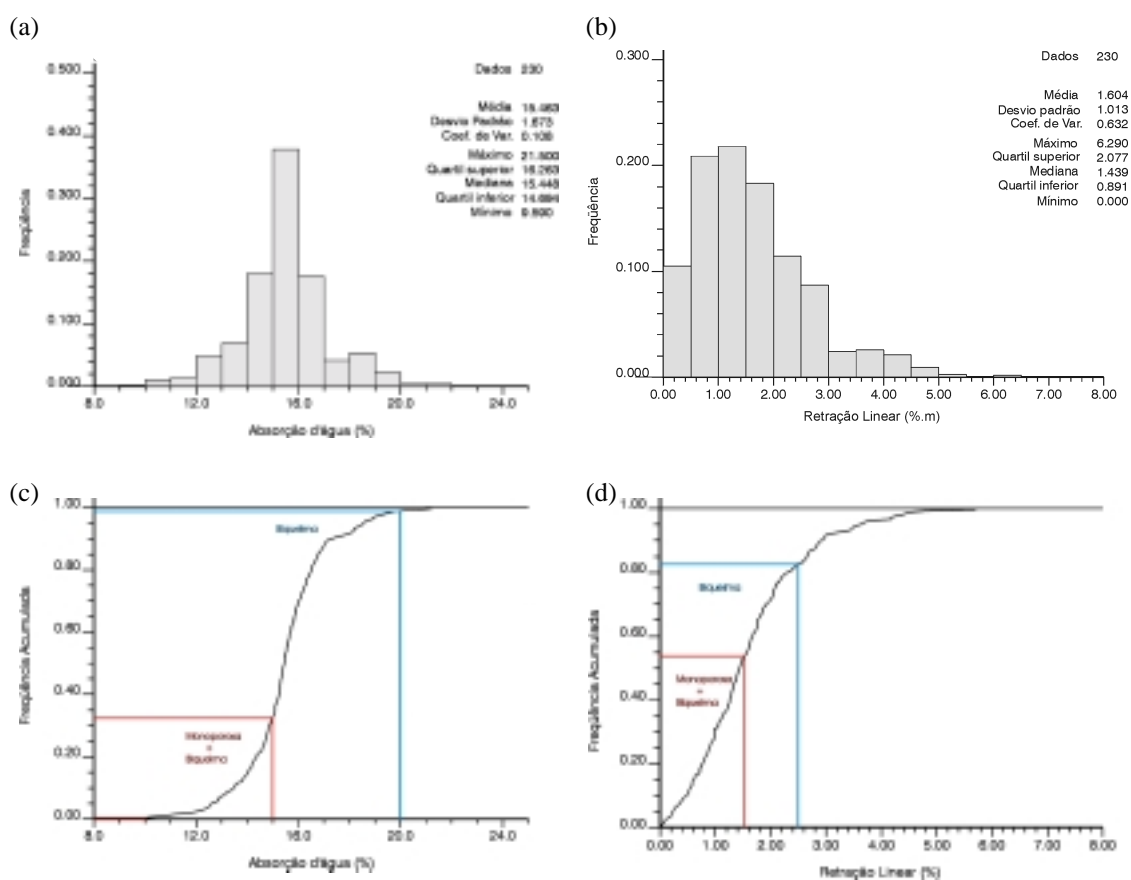
**Figura 3.10 - Distribuição amostral original (a) e desagrupada (b) para espessura.**

Os histogramas de freqüência das variáveis de qualidade são mostrados na Figura 3.11. Uma amostra foi inutilizada em laboratório, razão pela qual para espessura há uma amostra a mais que para essas variáveis.

A análise conjunta das distribuições, apresentando os valores ponderados com a espessura dos intervalos onde as amostras originais foram coletadas (suporte variável, conforme comentado anteriormente), 3.11a para absorção d'água, e 3.11b para retração linear, mostra claramente algumas tendências destes parâmetros de qualidade. A absorção d'água apresenta um histograma altamente simétrico e um CV (coeficiente de variação = desvio padrão dividido pela média) muito baixo, mostrando uma grande concentração dos valores em torno de sua média, por sua vez praticamente coincidente com a mediana. Por outro lado, a retração linear apresenta assimetria positiva, sem a ocorrência de valores extremos muito discrepantes. O CV é comparativamente bem maior, denotando a maior variabilidade dessa variável de qualidade.

A porção inferior da Figura 3.11 ("c" e "d") apresenta os histogramas de freqüência acumulada para ambas as variáveis de qualidade, mostrando

intervalos de classificação cerâmica da argila conforme Tabela 2.3. É notória a grande incidência de amostras classificadas nos tipos cerâmicos, quando as variáveis são consideradas isoladamente, especialmente para absorção d'água. Como foi visto no item 2.3, o grupo de Biqueima inclui também intervalos da argila tipo Monoporosa, somente se enquadrando num dos grupos quando consideradas as duas variáveis em conjunto. Mais adiante será visto o impacto na classificação das amostras quando as duas variáveis são consideradas simultaneamente, mostrando uma redução significativa nas amostras consideradas como minério.

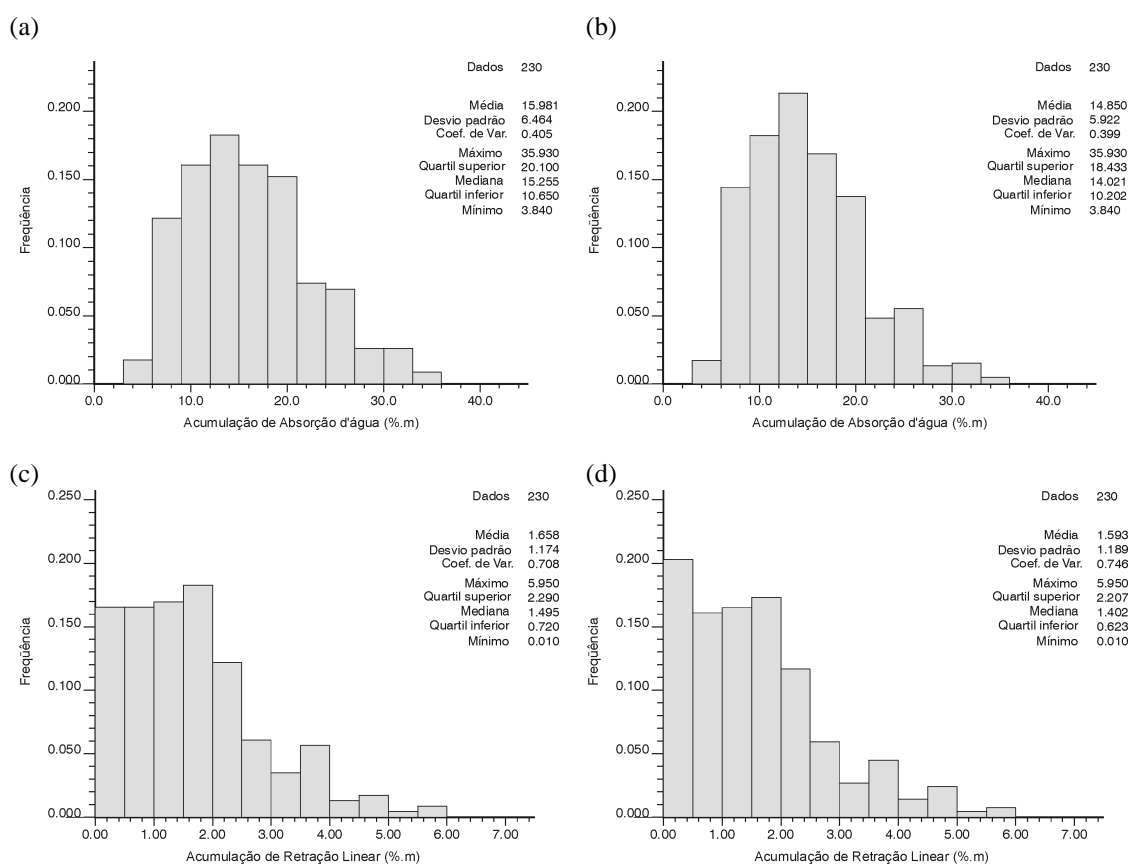


**Figura 3.11- Distribuições amostrais de absorção d'água (a) e retração linear (b), ponderadas com espessura dos intervalos correspondentes. Histogramas de frequência acumulada, contendo os intervalos de classificação cerâmica, são mostrados em (c) para absorção d'água, e (d) para retração linear.**

A Figura 3.12 mostra os histogramas de frequência das acumulações das variáveis de qualidade. Pode-se observar que, para acumulação de absorção d'água (Figura 3.12a e b), os histogramas são significativamente semelhante aos histogramas da espessura (Figura 3.10), com virtualmente mesmos CVs. Essa forte influência é decorrente da grande similaridade para

os valores de absorção entre si, com um histograma altamente simétrico e concentrado na mediana/média, fazendo com que, na transformação por acumulação, ao multiplicar-se valores pouco variáveis pelos valores da espessura, comparativamente mais dispersos, estes últimos acabem ditando as feições gerais da distribuição resultante. Num caso extremo, se todos os valores de absorção fossem iguais entre si, seria o mesmo que multiplicar todos os valores de espessura por uma constante: as relações variográficas e forma dos histogramas não iriam mudar. Em contrapartida, a acumulação de retração linear (Figura 3.12c e d), variável comparativamente mais errática, exibe praticamente mesma forma e características de histograma que a variável original, mostrando assim sua maior independência da espessura.

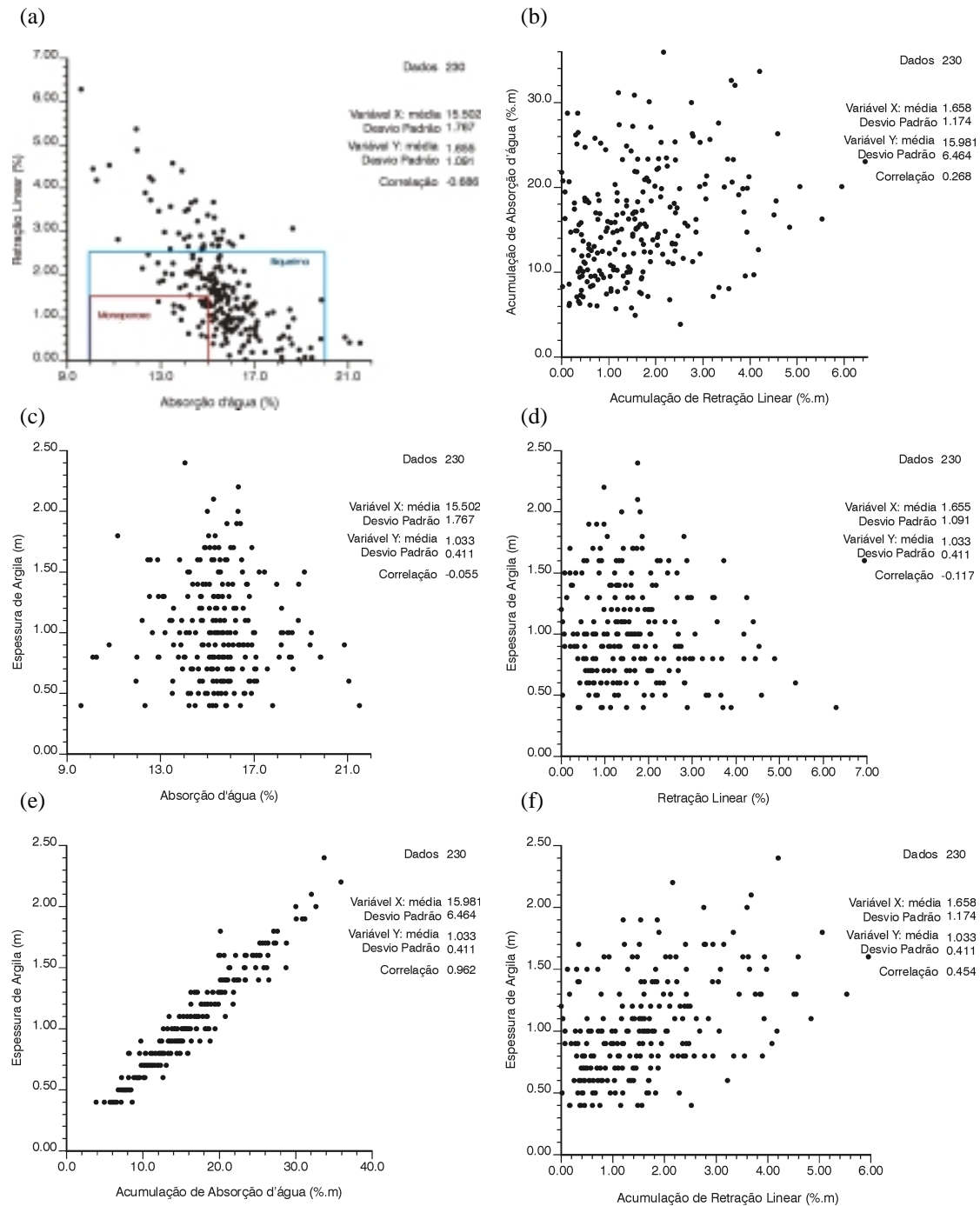
O processo de desagrupamento para as variáveis de qualidade (Figura 3.12) acarretou em reduções nas médias, nos quartis superiores e nas medianas para ambas as variáveis. As formas dos histogramas, porém, foram mantidas praticamente inalteradas.



**Figura 3.12 - Distribuição amostral original (a) e desagrupada (b) para acumulação de absorção d'água, e acumulação de retração linear, respectivamente (c) e (d).**

As correlações entre as variáveis de qualidade originais entre si e com espessura, bem como das respectivas acumulações entre si e com a espessura são apresentadas nos diagramas da Figura 3.13.

## PLANÍCIE



**Figura 3.13 - Diagramas de correlação entre: (a) absorção d'água e retração linear, mostrando os limites de classificação cerâmica; (b) as duas acumulações; (c) absorção d'água e espessura; (d) retração linear e espessura; (e) acumulação de absorção d'água e espessura; (f) acumulação de retração linear e espessura.**

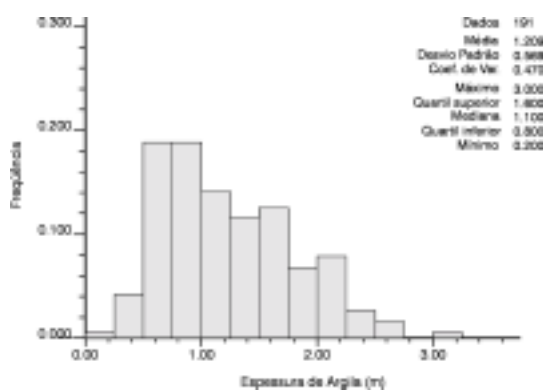


A relativamente alta correlação negativa que existe entre as variáveis de qualidade originais (Figura 3.13a) é diminuída quando se plota as respectivas acumulações entre si (Figura 3.13b). Isso faz com que tal relação entre as variáveis originais não possa ser usufruída na avaliação geoestatística, quando são empregadas as acumulações. A Figura 3.13a mostra ainda os limites de classificação para cada tipo cerâmico, em cada variável, indicando a redução significativa do enquadramento amostral nos tipos cerâmicos, em relação à mesma classificação feita para cada variável independentemente, reiterando o já anunciado neste item.

A total falta de correlação entre as variáveis de qualidade e a espessura é evidente ao observar-se as Figuras 3.13c e 3.13d. Em consonância com a já abordada dependência da absorção d'água em relação à espessura, quando acumulada, a Figura 3.13e mostra a forte correlação positiva entre a espessura e esta variável acumulada. O mesmo não acontece com a retração linear (Figura 3.13f).

### Tálus

As estatísticas básicas das variáveis de interesse no subdomínio tálus são apresentadas a seguir. A Figura 3.14 mostra o histograma de frequência para espessura. Em linhas gerais, a forma global do histograma, assimétrica positiva, é muito semelhante ao da espessura na planície (por conseqüência também o coeficiente de variação), apenas mais irregular. A média é um pouco mais alta, assim como os extremos são mais dispersos.



**Figura 3.14 - Histograma da espessura.**

Os histogramas de frequência das variáveis de qualidade são mostrados na Figura 3.15. A absorção d'água apresenta um histograma com uma leve assimetria negativa, e CV baixo. Já a retração linear apresenta assimetria suavemente positiva, com a ocorrência de poucos valores altos mais discrepantes (correspondentes aos valores mais baixos da absorção d'água), todos situados no limite NE do subdomínio, não chegando a caracterizar uma 2<sup>a</sup> população, mas antes uma transição para amostras de características cerâmicas diferentes, as quais foram suprimidas (item 3.2.2.1). O CV maior indica uma variabilidade comparativamente alta.

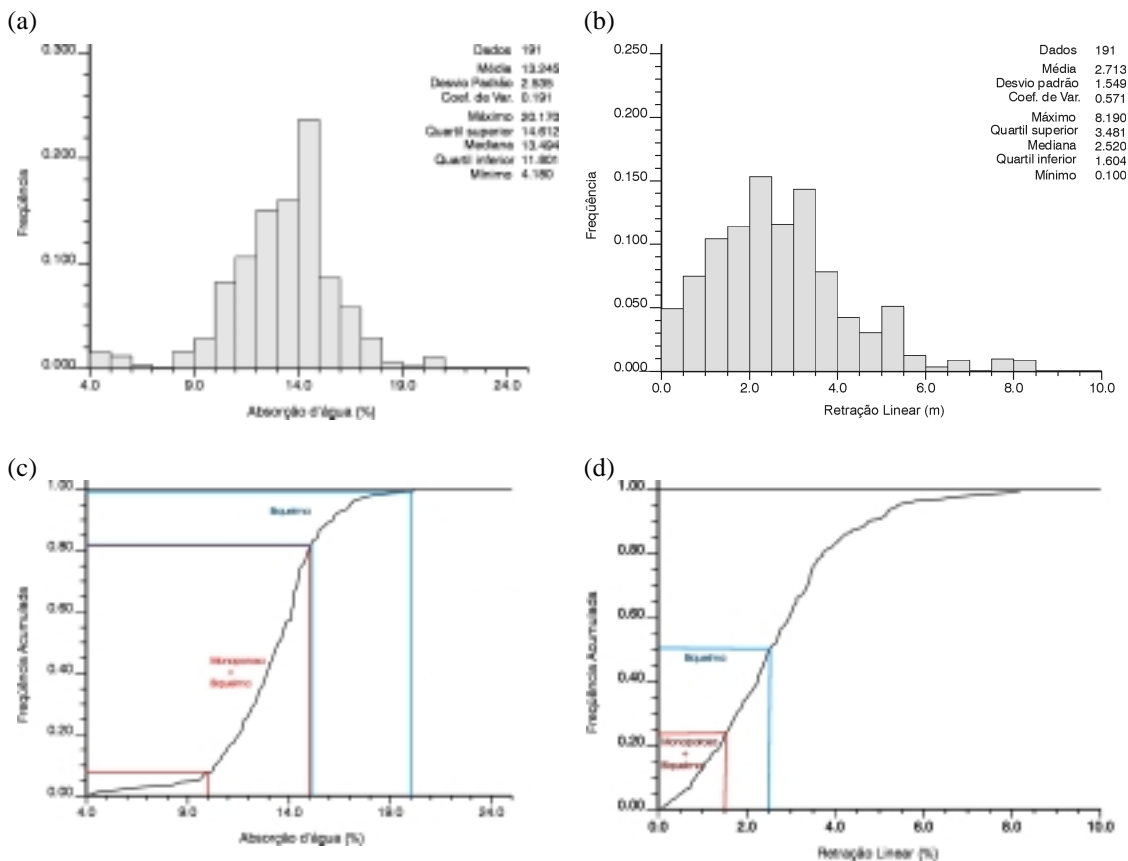
A porção inferior da Figura 3.15 (“c” e “d”) apresenta os histogramas de frequência acumulada para ambas as variáveis de qualidade, mostrando intervalos de classificação cerâmica da argila conforme Tabela 2.3. Há uma diminuição considerável de amostras classificadas nos tipos cerâmicos, quando as variáveis são consideradas isoladamente, em relação à planície, especialmente para retração linear. Isso atesta a baixa qualidade cerâmica média das amostras deste subdomínio. Ao confrontar-se globalmente a Figura 3.11 com a Figura 3.15, ficam claras as diferenças entre as características amostrais das variáveis de qualidade entre os dois subdomínios, notadamente melhores na planície do ponto de vista cerâmico.

A Figura 3.16 mostra os histogramas de frequência das acumulações das variáveis de qualidade. Pode-se observar que, para ambas as variáveis de trabalho, os histogramas apresentam uma assimetria positiva, significativamente diferente das variáveis originais, portanto numa situação distinta da planície, em relação à acumulação de retração linear. No caso da acumulação de absorção d'água, novamente seu histograma é bastante influenciado pela espessura, similarmente ao observado na planície.

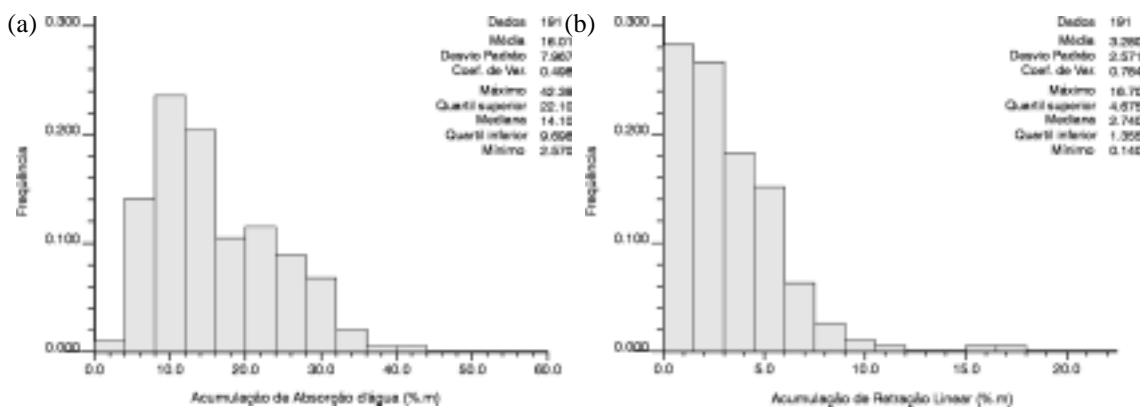
As correlações entre as variáveis de qualidade originais entre si e com espessura, bem como das respectivas acumulações entre si e com a espessura são apresentadas nos diagramas da Figura 3.17.

Os comentários feitos anteriormente para as correlações entre as variáveis no subdomínio planície (Figura 3.13) também aqui se aplicam, em linhas gerais. Embora com tendências individuais diferentes em cada subdomínio, conforme já abordado, as variáveis apresentam semelhantes inter-relações. Para as variáveis de qualidade originais (Figura 3.17a), a

correlação negativa é um pouco maior (coeficiente de  $-0,868$  contra  $-0,686$  da planície); o mesmo para o caso da acumulação de retração linear contra a espessura (Figura 3.17e).

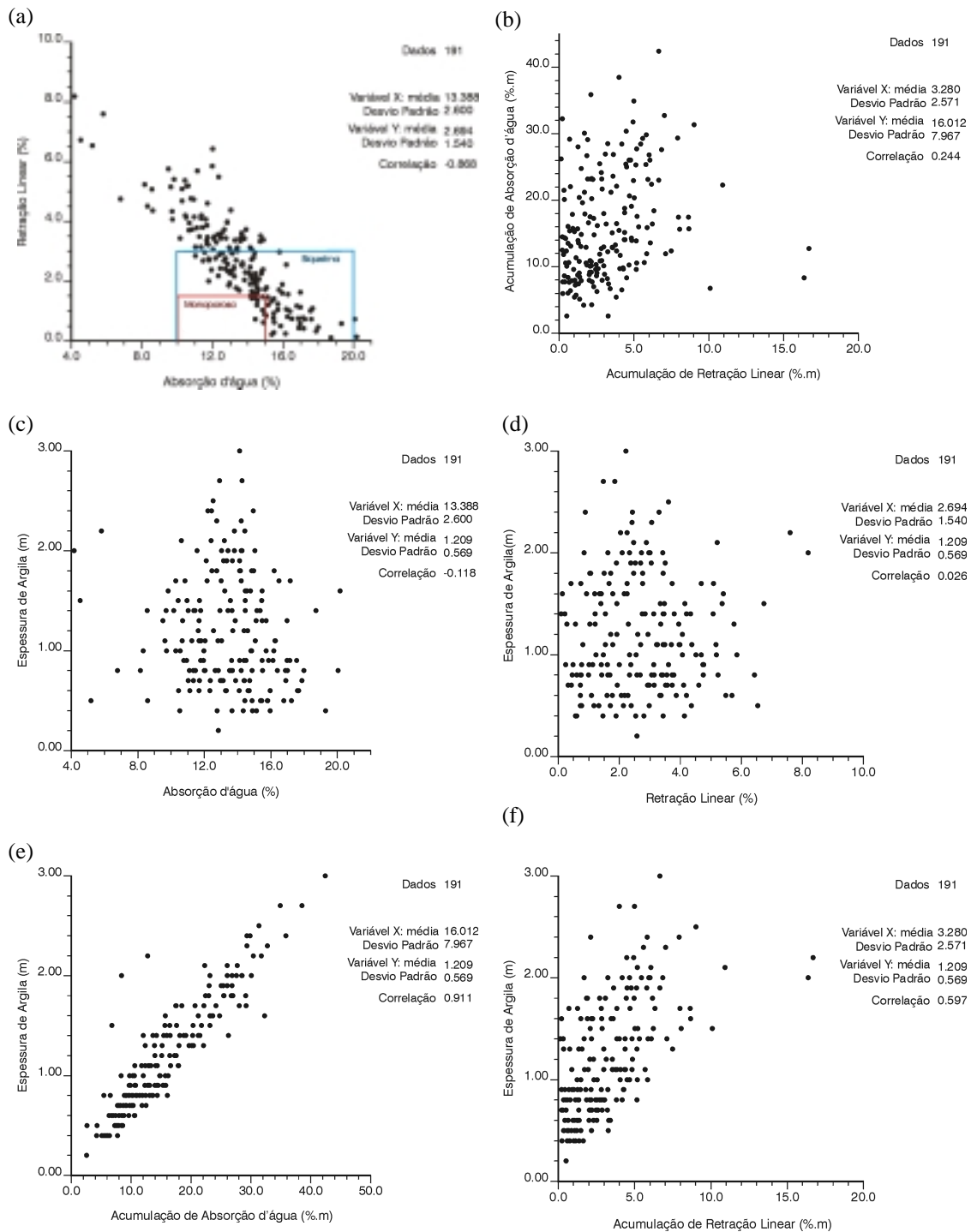


**Figura 3.15 - Histograma original de absorção d’água (a) e retração linear (b), apresentando valores ponderados com espessura dos intervalos correspondentes. Histogramas de frequência acumulada, contendo os intervalos de classificação cerâmica, são mostrados em (c) para absorção d’água, e (d) para retração linear.**



**Figura 3.16 - Distribuição amostral original para acumulação de absorção d’água (a), e acumulação de retração linear (b).**

# TÁLUS



**Figura 3.17 - Diagramas de correlação entre: (a) absorção d'água e retração linear, mostrando os limites de classificação cerâmica; (b) as duas acumulações; (c) absorção d'água e espessura; (d) retração linear e espessura; (e) acumulação de absorção d'água e espessura; (f) acumulação de retração linear e espessura.**

## Quadro Comparativo

A Tabela 3.1 apresenta um quadro-resumo comparativo das estatísticas básicas amostrais para os dois subdomínios. As já comentadas tendências e diferenças entre as variáveis e subdomínios aqui mostram-se claras, especialmente no que diz respeito à maior variabilidade observada no tálus. Os valores das variáveis de qualidade originais referem-se às distribuições ponderadas com espessura; já os valores de espessura e de acumulações para a planície são das respectivas distribuições desagrupadas.

**Tabela 3.1 - Resumo das estatísticas básicas para todas as variáveis nos dois subdomínios.**

	Tálus						Planície					
	Mín	Máx	Méd	DP	CV	Nº	Mín	Máx	Méd	DP	CV	Nº
E	0,20	3,00	1,21	0,57	0,47	191	0,40	2,40	0,95	0,38	0,41	231
A	4,18	20,17	13,24	2,54	0,19	191	9,59	21,5	15,46	1,67	0,11	230
R	0,10	8,19	2,71	1,55	0,57	191	0,00	6,29	1,60	1,01	0,63	230
<u>A</u>	2,57	42,39	16,01	7,97	0,50	191	3,84	35,93	14,85	5,92	0,40	230
<u>R</u>	0,14	16,70	3,28	2,57	0,78	191	0,00	5,95	1,59	1,19	0,75	230

OBS.: E = espessura (m); A = absorção d'água (%); R = retração linear (%); A = acumulação de absorção d'água (%.m); R = acumulação de retração linear (%.m); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; N<sup>o</sup> = número de amostras.

### 3.3 Modelamento de Continuidade Espacial: Variografia

A abordagem do banco de dados em estudo feita até aqui, incluindo o exame atento de todos os aspectos industriais e geológicos relacionados, a descrição estatística dos dados, correlações, e ainda a distribuição geográfica dos valores amostrais, são todos de suma relevância numa metodologia geoestatística. Porém, como a predição de reservas e variabilidade associada constituem o objetivo primordial deste trabalho, são necessárias inferências sobre características populacionais dos atributos de interesse nos limites dos domínios em estudo. Para tal, é imprescindível o modelamento adequado da estatística espacial (i.e., quantificando a continuidade espacial) desta população, a partir dos dados amostrais disponíveis. Tal modelamento

norteia todo o processo de estimativa/simulação subsequente, impactando portanto diretamente nas classificações e informações finais advindas.

A essência de métodos geoestatísticos em geral, conforme discutido no item 3.1, baseia-se na inferência de modelos probabilísticos de continuidade espacial, i.e., modelos de funções aleatórias construídos a partir de uma série de dados espacialmente dependentes, as variáveis aleatórias (Goovaerts, 1997 p.63). O modelamento propriamente dito constitui a inferência de seus parâmetros a partir dos dados disponíveis, fundamentalmente dos dois primeiros momentos, a média e a covariância. Para a média existem métodos de desagrupamento (item 3.2.2.2) que fornecem uma estatística mais adequada do domínio de estudo. Porém, para a apreciação de relações espaciais entre pontos afastados a dadas distâncias e direções, a continuidade espacial é quantificada através da variografia. A variografia compreende a inferência de um modelo para um semivariograma (Olea, 1991 p.81). No jargão geoestatístico, corresponde à fase de “análise estrutural”, assim denominada porque modela as estruturas de continuidade espacial da variável em estudo.

Vários tipos de funções aleatórias enquadram-se no grupo dos “variogramas” *latu sensu*, (Deutsch & Journel, 1998 p.44-47) quantificando relações espaciais de continuidade entre pontos amostrais, entre as quais o semi-variograma. Segundo Journel & Huijbregts (1978), a função semi-variograma caracteriza a variabilidade entre dois valores numéricos  $z(x)$  e  $z(x+h)$  nos pontos  $x$  e  $x+h$  separados pelo vetor  $h$ . Assim, é possível estimar-se o variograma  $2\gamma(h)$  dos dados disponíveis numa determinada direção, a partir da média aritmética (esperança) das diferenças quadráticas entre dois valores experimentais separados a uma distância  $h$ , i.e.,

$$2\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3.3)$$

onde  $N(h)$  é o número de pares experimentais  $[z(x_i), z(x_i+h)]$  de dados separados pelo vetor  $h$ .

O variograma, para a maior parte dos modelos existentes, correspondentes aos modelos de transição, é uma função crescente até um determinado valor de  $h$ , conhecido como amplitude (*range*), onde atinge o patamar (*sill*) correspondente aproximadamente à variância *a priori* dos dados. O variograma reflete a variabilidade espacial média de pares amostrais, dispostos a distâncias múltiplas de  $h$  para uma determinada direção (*lags*). Em essência, substitui a distância euclidiana  $h$  usada em outros métodos pela distância estrutural  $2\gamma(h)$ , que é específica ao atributo e ao campo em estudo.

Maiores discussões em torno da variografia, modelos teóricos de continuidade espacial em geral, critérios de permissividade desses modelos, e ainda fatores que devem ser levados em consideração em análise estruturais variográficas, incluindo parâmetros determinantes nas estratégias de busca controladores dos valores experimentais de variograma, podem ser encontrados em David (1977, Caps.4 e 6), Journel & Huijbregts (1978, Cap.3), Clark (1979, Cap.2), Isaaks & Srivastava (1989, Cap.16), Goovaerts (1997, Cap.4), Armstrong (1998, Caps.3, 4 e 5), Olea (1999, Cap.5) e Chilès & Delfiner (1999, Cap.2).

Respeitando todo o embasamento teórico acima discorrido, partiu-se dos dados de sondagem existentes para o modelamento variográfico das variáveis de interesse nos dois subdomínios. Com o cálculo de variogramas experimentais, modelos autorizados (conforme discussão em Goovaerts, 1997 p.87-88, e Armstrong, 1998 p.35-36) foram ajustados, definindo e quantificando eixos de anisotropias. As interpretações foram sempre balizadas com os aspectos geológicos atuantes na disposição espacial dos valores amostrais. Parâmetros tais como tolerância angular e linear, largura da banda, e dimensão do *lag* foram estudados e comparados cuidadosamente caso a caso, até encontrar-se as condições ideais de estruturação e quantificação de anisotropias para cada variável em cada subdomínio. Para os *lags*, foram adotados espaçamentos múltiplos de 25 m nas direções NS e EW, coincidentes com a malha sistemática amostral, 35 m nas direções N45E e N45W. Nas direções intermediárias foram adotadas distâncias múltiplas de 30 m, sempre com tolerâncias lineares de 0,5 *lag*. As

direções de maior e menor continuidade foram então registradas, obtendo-se assim os modelos probabilísticos de continuidade espacial a serem empregados subseqüentemente nas estimativas e simulações realizadas, conforme será visto neste e no próximo capítulo.

A seguir são apresentados os modelos variográficos ajustados em cada subdomínio para as variáveis regionalizadas em estudo (espessura e acumulações).

### 3.3.1 Planície

Os modelos variográficos obtidos para as variáveis regionalizadas da planície são apresentados na Figura 3.18, sumarizados nas direções de máxima e mínima continuidade espacial. Foram computados os variogramas das acumulações e das espessuras, em circunstâncias similares às reportadas por David (1977, p.89-90) para depósitos estratiformes de diferentes comprimentos amostrais. A exemplo do observado por este autor, no presente estudo de caso, seguindo as convergências estatísticas entre espessura e acumulação de absorção d'água abordadas no item 3.2.2.2, o modelo variográfico para esta acumulação simplesmente reflete a continuidade espacial da espessura. O mesmo não ocorre para a acumulação de retração linear.

Em casos como o acima descrito, de correlação espacial entre duas variáveis, uma alternativa é o seu modelamento conjunto através de variogramas cruzados (*cross-variograms*), quantificando a continuidade dessa correlação espacial (Isaaks & Srivastava, 1989 p.175-177). Estes modelos cruzados de duas variáveis espacialmente correlacionadas podem ser usados posteriormente em estimativas pelo método da cokrigagem (Isaaks & Srivastava, 1989 Cap.17). Porém, para o caso presente (espessura x acumulação de absorção d'água), testes comparativos de krigagem e cokrigagem a partir de modelos respectivamente variográficos e covariográficos (Stangler, 1999) demonstraram que as estimativas resultantes de um e de outro procedimento resultaram praticamente idênticas. Wackernagel (1998, Cap.25) aponta que, em casos como o presente, de



“cokrigagem isotópica”, onde as variáveis em questão são medidas concomitantemente em todas as locações amostrais, a cokrigagem é equivalente à krigagem individual.

Em razão dos fatores discutidos acima, as variáveis regionalizadas em estudo foram modeladas independentemente, tanto na planície quanto no tálus. No intuito de comparar-se diferentes variáveis, medidas usando diferentes unidades e magnitudes, todos os variogramas foram padronizados, i.e., suas variâncias totais (*sills*) foram equiparadas à unidade [1 m<sup>2</sup> para espessura e 1 (%.m)<sup>2</sup> para as acumulações].

Existem diferentes modelos teóricos aos quais são ajustados os variogramas experimentais, devendo estes cumprirem determinados requisitos para serem permissíveis (Goovaerts,1997 p.87-88). Aqui serão apresentados apenas os modelos efetivamente usados no presente estudo de caso, tanto na planície quanto no tálus.

O modelo esférico, aplicado nas variáveis espessura e acumulação de absorção d'água da planície, é o de uso mais comum nas geociências. Apresenta um crescimento rápido na origem, onde tem um comportamento linear. As equações 3.4 e 3.5 descrevem esse modelo:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right], \text{ para } |h| < a \quad (3.4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \text{ para } |h| \geq a \quad (3.5)$$

onde:  $\gamma(h)$  = função semivariograma para vetor  $h$  (distância média entre pares);  $C_0$  = efeito pepita;  $C$  = incremento total de variância média entre pares de dados experimentais na distância  $a$ ;  $a$  = alcance;  $|h|$  = módulo do vetor  $h$ .

O modelo exponencial também apresenta comportamento linear na origem. O alcance ( $a$ ) tem, neste esquema, significado puramente analítico, sendo o patamar só alcançado pela curva de forma assintótica. Na prática,

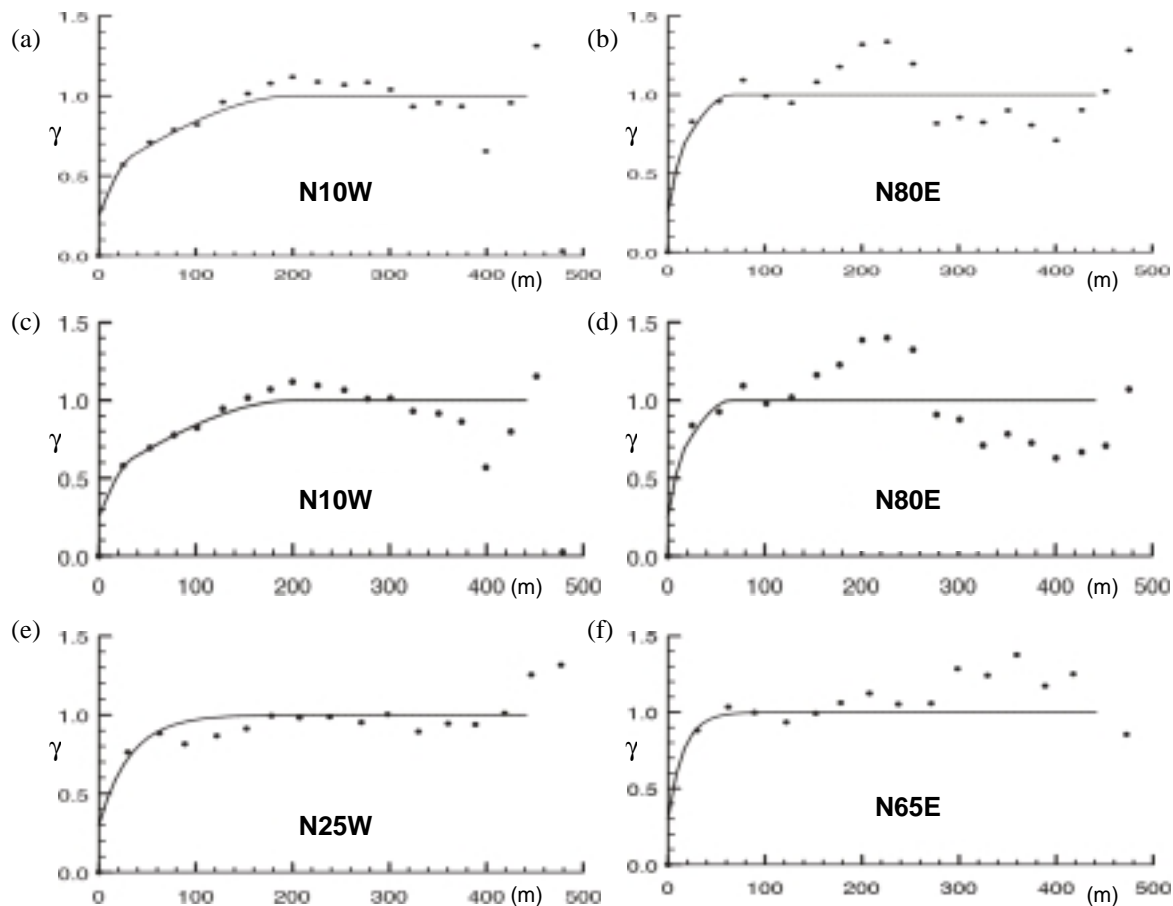
porém, utiliza-se um alcance igual a  $3a$  (alcance virtual, correspondendo a 95% da variância total). A equação 3.6 descreve este modelo.

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - e^{-\frac{|h|}{a}}] \quad (3.6)$$

onde, além dos parâmetros identificados para as equações 3.4 e 3.5,  $e$  = base dos logaritmos neperianos.

Os modelos variográficos finais mostrados na Figura 3.18 exibem anisotropias geométricas para todas as variáveis, marcadamente mais acentuadas para espessura e acumulação de absorção d'água. Estruturas imbricadas aparecem nos modelos destas duas últimas variáveis. As estruturas imbricadas (*nested structures*) indicam a presença de variações do fenômeno estudado em diferentes escalas, e são a justaposição de dois ou mais modelos teóricos na mesma representação gráfica. No caso presente, podem ser devidas a estruturas tectônicas de diferentes escalas, conforme mostrado nas figuras de fotointerpretação (Figuras 2.11 e 2.12), tectonismo que afeta a sedimentação e atual disposição da argila, e conseqüentemente o arranjo espacial das variáveis. O efeito pepita, relativamente alto, pode ser atribuído em parte à rudimentaridade do trado manual, dando margem a possíveis contaminações e distorções da real espessura observada, em parte às próprias irregularidades locais do depósito (vide Figura 2.13), e em parte a eventuais variações de condições de laboratório nas análises realizadas.

## PLANÍCIE



**Figura 3.18 - Modelos variográficos (linhas contínuas) ajustados para o subdomínio planície, com base nos valores de variogramas experimentais (pontos), nas direções de máxima e mínima continuidade respectivamente para espessura (a)(b), acumulação de absorção d'água (c)(d), e acumulação de retração linear (e)(f).**

Os parâmetros identificadores dos modelos são indicados na Tabela 3.2. As direções de maior continuidade NNW-SSE a NW-SE são resultado da sedimentação da drenagem na porção W, concordantemente orientada, enquanto os efeitos pepita incorporados refletem as irregularidades laterais presentes neste ambiente de leque aluvial, comentadas no item 2.2, além de eventuais imperfeições de amostragem e de procedimentos laboratoriais.

Os modelos variográficos e as estratégias da elipse de busca na krigagem foram objeto de validação cruzada (Isaaks & Srivastava, 1989 Cap.15). Verificou-se a sensibilidade para distintos modelos de cada variável, em relação a diferentes proporções do efeito pepita sobre a variância total,

até chegar-se no modelo final que propiciasse a menor tendenciosidade (*bias*), e média absoluta do erro de estimativa mais próxima de 0.

**Tabela 3.2 - Modelos de continuidade espacial (semi-variogramas) para as três variáveis regionalizadas, subdomínio planície.**

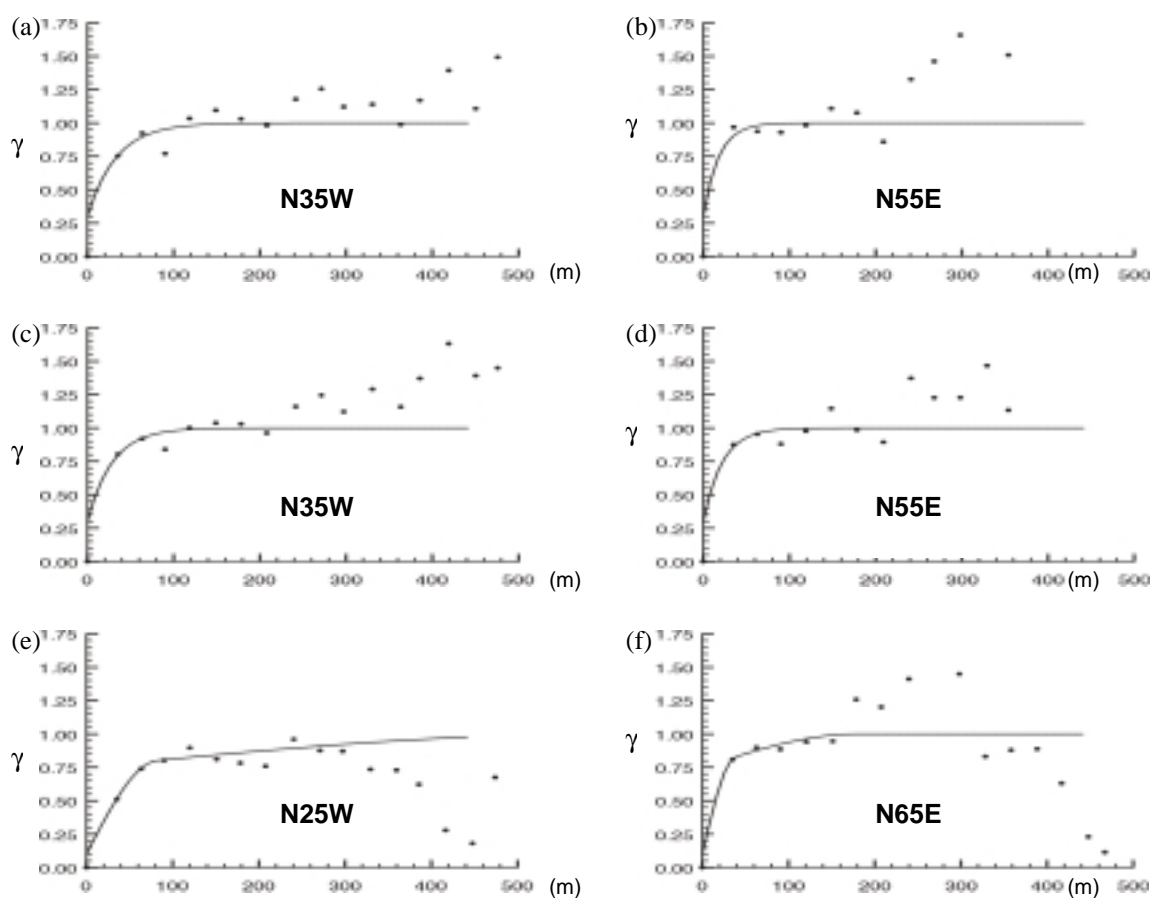
		Espessura de Argila (m)	Acumulação de Absorção d'água (%.m)	Acumulação de Retração Linear (%.m)
<b>Efeito Pepita</b>		0,25 m <sup>2</sup>	0,25 (%.m) <sup>2</sup>	0,30 (%.m) <sup>2</sup>
	<b>Modelo Variográfico</b>	esférico	esférico	exponencial
	<i>Sill</i>	0,25 m <sup>2</sup>	0,25 (%.m) <sup>2</sup>	0,70 (%.m) <sup>2</sup>
<b>1<sup>a</sup></b>	<b>Maior Continuidade</b>	N10W	N10W	N25W
<b>Estrutura</b>	<b>Alcance</b>	32,85 m	32,85 m	96,72 m
	<b>Menor Continuidade</b>	N80E	N80E	N65E
	<b>Alcance</b>	16,42 m	16,423 m	47,45 m
	<b>Modelo Variográfico</b>	esférico	esférico	--
	<i>Sill</i>	0,50 m <sup>2</sup>	0,50 (%.m) <sup>2</sup>	--
<b>2<sup>a</sup></b>	<b>Maior Continuidade</b>	N10W	N10W	--
<b>Estrutura</b>	<b>Alcance</b>	202,55 m	202,55 m	--
	<b>Menor Continuidade</b>	N80E	N80E	--
	<b>Alcance</b>	65,69 m	65,69 m	--

OBS: Todos os variogramas estão padronizados [variância total = 1m<sup>2</sup> ou 1 (%.m)<sup>2</sup>].

### 3.3.2 Tálus

Os modelos variográficos obtidos para as variáveis regionalizadas deste subdomínio são apresentados na Figura 3.19, enquanto seus parâmetros são listados na Tabela 3.3. Persiste a semelhança entre o comportamento espacial da espessura e o da acumulação de absorção d'água, embora de maneira menos pronunciada que na planície. Os alcances para espessura e acumulação de absorção d'água bem menores que na planície, o efeito pepita maior e a tendência a uma anisotropia menos marcada denotam o caráter mais errático/heterogêneo do tálus. Porém, a acumulação de retração linear apresenta uma continuidade total maior, ainda que o efeito pepita e a primeira estrutura, as quais juntas constituem 75% do alcance total, compreendam um alcance comparativamente curto.

## TÁLUS



**Figura 3.19 - Modelos variográficos (linhas contínuas) ajustados para o subdomínio tálus, com base nos valores de variogramas experimentais (pontos), nas direções de máxima e mínima continuidade respectivamente para espessura (a)(b), acumulação de absorção d'água (c)(d), e acumulação de retração linear (e)(f).**

Os modelos variográficos finais mostrados na Figura 3.19 exibem anisotropias geométricas para todas as variáveis, bastante tênue no caso da acumulação de absorção d'água. Estruturas imbricadas aparecem no modelos da acumulação de retração linear. Persistem as direções de maior continuidade NW-SE, como resultado da sedimentação da drenagem na porção W, concordantemente orientada, embora atenuada pela influência dos cursos d'água e retrabalhamento do tálus, mais erráticos, diminuindo a continuidade de uma maneira geral.

Cheques de validação cruzada foram também aqui aplicados, a exemplo da planície. Os modelos e estratégias de busca de resultados mais favoráveis (em termos de erro de estimativa) foram mantidos.

**Tabela 3.3 - Modelos de continuidade espacial (semi-variogramas) para as três variáveis regionalizadas, subdomínio tálus.**

		Espessura de Argila (m)	Acumulação de Absorção d'água (%.m)	Acumulação de Retração Linear (%.m)
<b>Efeito Pepita</b>		0,30 m <sup>2</sup>	0,30 (%.m) <sup>2</sup>	0,10 (%.m) <sup>2</sup>
<b>Modelo Variográfico</b>		exponencial	exponencial	esférico
<i>Sill</i>		0,70 m <sup>2</sup>	0,70 (%.m) <sup>2</sup>	0,65 (%.m) <sup>2</sup>
<b>1<sup>a</sup></b>	<b>Maior Continuidade</b>	N35W	N35W	N25W
<b>Estrutura</b>	<b>Alcance</b>	100 m	86 m	82 m
	<b>Menor Continuidade</b>	N55E	N55E	N65E
	<b>Alcance</b>	53 m	66 m	38 m
<b>Modelo Variográfico</b>		--	--	esférico
<i>Sill</i>		--	--	0,25 (%.m) <sup>2</sup>
<b>2<sup>a</sup></b>	<b>Maior Continuidade</b>	--	--	N25W
<b>Estrutura</b>	<b>Alcance</b>	--	--	595 m
	<b>Menor Continuidade</b>	--	--	N65E
	<b>Alcance</b>	--	--	180 m

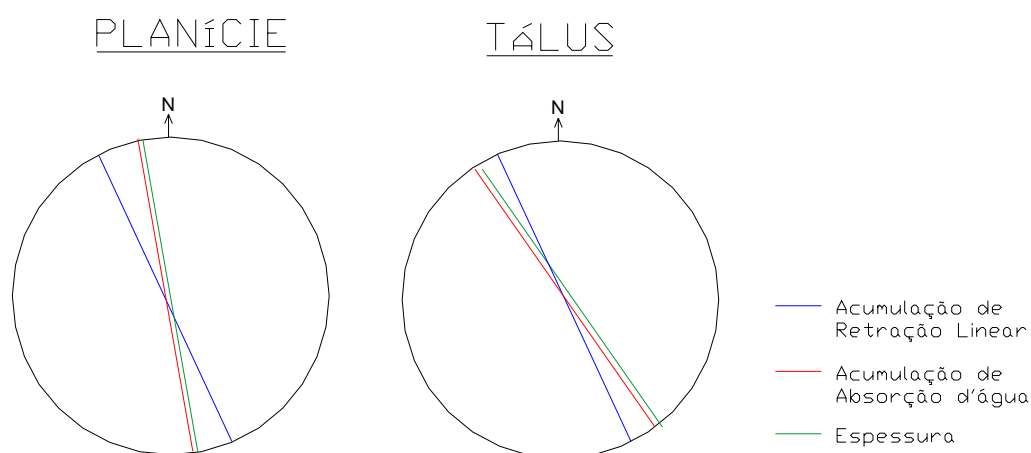
OBS: Todos os variogramas estão padronizados [variância total = 1m<sup>2</sup> ou 1 (%.m)<sup>2</sup>].

### 3.3.3 Tendências Gerais

A análise estrutural efetuada, compreendendo o modelamento variográfico das variáveis nos dois subdomínios distintos, evidenciou a total influência de estruturas NW-SE a NNW-SSE na continuidade maior das variáveis, por sua vez vinculada à sedimentação da drenagem principal a W, concordantemente orientada. O ambiente mais “truncado” e irregular do tálus resulta numa menor continuidade, e anisotropia menos marcada. A Figura 2.12 já chamava a atenção para estruturas mais erráticas e de menor escala, que encaixam os pequenos cursos d'água retrabalhando e redistribuindo a argila ocorrente, conseqüentemente contribuindo para essa menor continuidade. Em ambos os subdomínios, especialmente na planície, o comportamento espacial (variográfico) da acumulação de absorção d'água é sobremaneira influenciado pela espessura, a exemplo do já observado

anteriormente na análise estatística básica. Por outro lado, a acumulação de retração linear mostra-se mais independente de tal influência.

As direções de maior continuidade para as variáveis estão sumarizadas graficamente na Figura 3.20. A acumulação de retração linear, embora mantendo exatamente a mesma direção nos dois subdomínios, apresenta características distintas nos dois modelos variográficos, conforme discutido acima.



**Figura 3.20 - Sumário das direções de maior continuidade espacial para as variáveis regionalizadas em estudo nos dois subdomínios.**

### 3.4 Estimativa e Classificação da Argila

Toda a discussão a respeito do banco de dados em estudo até aqui tem sido de ordem puramente descritiva, começando pelos aspectos geológicos e industriais contextuais (Capítulo 2), continuando ao longo do presente capítulo pela análise exploratória dos dados e finalmente resultando no modelamento de continuidade espacial. A partir dos modelos variográficos ajustados para todas as variáveis de interesse nos dois subdomínios de estudo, discutidos ao longo do item 3.3, as informações amostrais obtidas serão usadas para cálculo dos recursos presentes no depósito: serão estimados, através de método geoestatístico em suporte de blocos de lavra, os parâmetros de qualidade e a espessura do horizonte de interesse. Com isso será classificada bloco-a-bloco a argila existente, de acordo com os

critérios cerâmicos discutidos no item 2.3, bem como serão quantificados os recursos geológicos existentes.

Os resultados obtidos para estimativa e classificação da argila em cada subdomínio considerado (item 3.4.2) possibilitarão a apreciação das feições globais do depósito (Apêndice D), em termos da quantificação dos recursos (*in situ*), além do estudo da relação cobertura estéril / minério. Essa avaliação permitirá a obtenção do cenário mais provável dos recursos geológicos, e como tal uma ferramenta para primeiras decisões concernentes ao mapeamento de regiões mais promissoras em termos de mineração de argila cerâmica, em escala de blocos de lavra.

A avaliação de reservas através da estimativa, com posterior classificação dos blocos estimados, foi realizada aplicando o consagrado método de krigagem ordinária em blocos (Matheron, 1963). Os resultados são apresentados para as variáveis regionalizadas em três subdomínios: os dois domínios geológicos originais, planície e tálus, e a zona de transição entre estes, individualizada simplesmente como “transição”. Os aspectos envolvendo este desmembramento serão desenvolvidos ao longo deste item. Nenhuma restrição de cunho mineiro (e.g., espessura mínima recuperável de argila) será considerada nesta avaliação inicial, apenas o respeito aos requisitos industriais que classificam a argila nos tipos cerâmicos discutidos no capítulo prévio. Igualmente não será ainda quantificada a incerteza envolvida na predição e classificação de reservas geológicas. Tal abordagem probabilística de quantificação de riscos na estimativa de reservas recuperáveis constituirá objeto de estudo do Capítulo 4.

### **3.4.1 Método de Krigagem**

A teoria geral de krigagem, método geoestatístico básico de estimativa, e sua relação com estimativa de recursos *in situ* é abordada em Journel & Huijbregts (1978, Cap.V). Esta mesma obra (p.343-344), a exemplo de Isaaks & Srivastava (1989, Cap.11), compara a krigagem com outros métodos de estimativa tais como polígonos de influência, popularmente utilizado em depósitos de argila na região considerada. O nome empregado a



este método de estimativa foi cunhado por Matheron na década de 60, em honra de D.G. Krige e seus estudos empíricos nas minas de ouro da África do Sul nos anos 50 (Olea, 1991 p.41).

A krigagem constitui o cerne do campo da geoestatística linear, compreendendo um método de estimativa linear que fornece valores estimados não tendenciosos “ótimos”, pontuais ou médias de blocos, a partir de um modelo de covariância/variograma ajustado a uma determinada variável em um determinado domínio. Essa otimização diz respeito à obtenção de médias amostrais ponderadas de pontos vizinhos com mínima variância de erro (mínima variância de estimativa ou variância de krigagem). Em contraste com a clássica regressão linear, a krigagem leva em consideração a dependência estocástica entre os dados (Olea, 1991 p.41). Três variantes principais de krigagem são conhecidas (Goovaerts, 1997 p.126-127):

- (i) Krigagem Simples: considera a média como conhecida e constante em todo o domínio de estimativa. A média tem peso na estimativa também, e não há restrição ao total dos pesos.
- (ii) Krigagem Ordinária: permite variações locais da média limitando o domínio de estacionaridade da média à vizinhança local (estacionaridade local). Ao contrário da krigagem simples, a média aqui é assumidamente desconhecida e subjacentemente estimada. A soma dos pesos amostrais deve totalizar 1.
- (iii) Krigagem com modelo de *trend*: considera que a média local varia suavemente em cada vizinhança local, e por extensão ao longo de todo o domínio considerado.

Em aplicações mineiras, a krigagem ordinária é de longe o método mais popular, tendo sido aplicada no presente estudo de caso no suporte de blocos. A krigagem simples constitui uma etapa da simulação seqüencial Gaussiana, método aplicado na presente dissertação na análise de reservas recuperáveis (Capítulo 4). A krigagem com modelo de *trend*, popular em aplicações de petróleo e hidrologia, não será aqui aplicada.

Maiores detalhes sobre a teoria de krigagem, aprofundando diferenças de krigagem ordinária e krigagem simples, e abordando todo o embasamento teórico e aplicativo desta metodologia consagrada de estimativa, podem

ser vistos em uma série de trabalhos clássicos, entre os quais: David (1977, Caps.9 e 10), Journel & Huijbregts (1978, Cap.V), Clark (1979, Cap.5), Isaaks & Srivastava (1989, Cap.12), Goovaerts (1997, Cap.5), Deutsch & Journel (1998, Cap.IV), Armstrong (1998, Caps.7, 8 e 9), Olea (1999, Caps.2 e 4) e Chilès & Delfiner (1999, Cap.3).

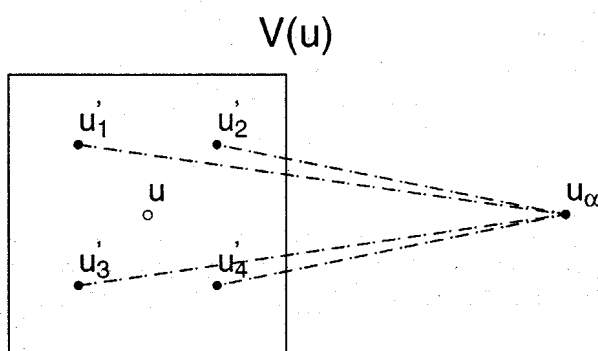
### **3.4.1.1 Krigagem Ordinária em Blocos**

Numa avaliação de recursos geológicos ou reservas minerais como a do presente caso, de conotações mineiras, onde há volumes/tonelagens mínimos a serem minerados como uma unidade de lavra (no caso da indústria cerâmica, lotes industriais), é necessário utilizar-se um método que estime valores médios em blocos. É o caso da krigagem ordinária em blocos. Na definição de Olea (1991, p.7), a krigagem em blocos compreende uma estimativa de krigagem de valores médios considerados num suporte maior que o suporte amostral, os quais no caso de furos de sondagem a trado podem ser considerados aproximadamente como “pontos”, dada a insignificância do volume de testemunhos em relação ao domínio a ser estimado. O sistema de equações da krigagem em blocos é o mesmo que para krigagem pontual (suporte da estimativa = suporte das observações), exceto que o lado direito da função estrutural do suporte amostral é repostado por seu valor médio entre o bloco e suporte da observação.

Segundo Isaaks & Srivastava (1989, p.323), a krigagem em blocos discretiza a área local (bloco) em muitos pontos e então faz a média das estimativas dos pontos tomados simultaneamente para fornecer a média sobre essa determinada área local ou bloco. Computacionalmente, envolve um ônus maior, pois as matrizes de krigagem em blocos envolvem um número muito maior de pontos, demandando tempo e memória computacional. O Capítulo 13 de Isaaks & Srivastava (1989) analisa em detalhe todo o sistema de krigagem em blocos, e compara as estimativas diretas de blocos com médias de estimativas pontuais feitas independentemente umas das outras.

Para poder-se aplicar este método, é necessária que a variável seja aditiva, ou seja, o processo de obter a média de diferentes pontos seja linear. Goovaerts (1997 p.152-158), enfatiza esse aspecto, apresentando ainda todo o desenvolvimento do sistema de krigagem em blocos e suas implicações.

A Figura 3.21 mostra esquematicamente como é feita a aproximação da covariância ponto amostral / bloco a ser estimado,  $Cov\{Z(u_\alpha), Z_V(u_\alpha)\}$ , pela média das covariâncias ponto amostral / pontos discretizadores do bloco,  $Cov\{Z(u_\alpha), Z_V(u'_i)\}$ , entre o dado amostral  $u_\alpha$  e cada um dos quatro pontos discretizadores  $u'_1$  a  $u'_4$ .  $V(u)$  é o bloco a ser estimado, com centróide em “u”.



**Figura 3.21 - Aproximação da relação de continuidade espacial (covariância ou variograma) ponto amostral/bloco pela relação ponto amostral/pontos discretizadores do bloco.**

Fonte: Goovaerts (1997, p.155).

No caso de depósitos minerais de matérias-primas cerâmicas, especialmente argila, para a tomada de decisões em relação ao aproveitamento de uma jazida é fundamental estimar não apenas a média global dos atributos, mas todas as variações mapeáveis locais. Estimativas pontuais ficam sem sentido, uma vez que no cotidiano industrial lotes de dimensões variáveis (comumente 1.000 ou 2.000 t) são homogeneizados e enviados às fábricas para processamento cerâmico. Portanto, estimativas em blocos são mais apropriadas.

Na estimativa dos atributos para o presente estudo de caso, apresentada a seguir, intenciona-se obter estimativas acuradas para blocos de lavra, aplicando o método de krigagem ordinária de blocos. O mesmo suporte de bloco será utilizado no Capítulo 4 para estudo de variabilidade da argila em reservas recuperáveis.

### 3.4.2 Resultados Obtidos

As estimativas foram feitas em blocos bidimensionais 25m x 25m, com centróides coincidentes com a posição dos furos de sondagem. O processo de krigagem ordinária em blocos das variáveis regionalizadas de interesse (espessura da argila e parâmetros de qualidade acumulados com a espessura) seguiu a fundamentação teórica apresentada no item anterior.

A opção por estimar-se em blocos decorre dos procedimentos de mineração segundo blocos de lavra, formando lotes homogêneos a serem enviados para o processamento cerâmico, no caso do enquadramento como minério. As dimensões destes lotes são de 1.000 t ou 2.000 t, o que dado o peso específico de 2 t/m<sup>3</sup> (assumido como constante para essa argila), corresponde respectivamente a volumes de 500 m<sup>3</sup> e 1000 m<sup>3</sup> *in situ*. Este volume está na mesma ordem de grandeza do volume dos blocos krigados: 25m x 25m x espessura estimada (variando entre 0,540 e 1,972 m, como será visto adiante).

A espessura foi aqui krigada diretamente, separadamente de absorção d'água, tanto na planície quanto no tálus, apesar da boa correlação negativa existente (item 3.2.2.2). Conforme discussão sobre variogramas cruzados apresentada no item 3.3.1, testes em Stangler (1999) com o mesmo banco de dados (considerado globalmente sem a separação em subdomínios), para diferentes maneiras de obter-se valores estimados de espessura, via krigagem ou cokrigagem com acumulação de absorção d'água, evidenciaram o não advento de qualidade significativa de estimativa final na cokrigagem: resultados muito semelhantes entre si a partir dos dois tipos de estimativas.

Estimativas (\*) de parâmetros de qualidade em escala de blocos foram realizadas indiretamente, dividindo o valor estimado para as acumulações (expressos em %.m), pelo valor estimado de espessura (expressa em m) para o mesmo bloco, obtendo os valores finais em sua unidade original (%):

$$\mathbf{VQbl^* = AcVQbl^* / Espbl^*} \quad \mathbf{(3.7)}$$

onde: VQbl\* = estimativa da variável de qualidade, em bloco; AcVQbl\* = estimativa da acumulação da variável de qualidade, para o mesmo bloco de

VQbl\*; Espbl\* = estimativa da espessura de argila para o bloco correspondente;

Os critérios de busca dos pontos amostrais vizinhos, tais como: números mínimo e máximo de pontos considerados, máximo de pontos por quadrante e dimensões da elipse de busca foram testados e comparados individualmente por variável em cada subdomínio. Decidiu-se então pelas condições que se mostraram mais adequadas, em termos de resultados propriamente ditos e em termos de âmbito da área total krigada. A discretização dos blocos foi invariavelmente constituída de 10 pontos no eixo X e 10 pontos no eixo Y, correspondendo portanto a uma discretização em 100 pontos, número julgado suficiente após testes comparativos com diferentes graus de discretização, em relação à estabilização do valor médio da função variograma interna dos blocos ( $\bar{\gamma}$ , ou simplesmente *gammabar*) com o progressivo aumento da discretização. A orientação da elipse de busca também sempre coincidiu com os eixos de anisotropia dos modelos de continuidade espacial, para cada variável.

Os resultados foram checados por validação cruzada (Isaaks & Srivastava, 1989 Cap.15), ajudando a consolidar a escolha dos parâmetros, bem como a definir o posicionamento do efeito pepita nos modelos variográficos, i.e., seu percentual sobre a variância total. Em geral as estimativas mostraram-se pouco sensíveis a variações do efeito pepita.

De acordo com o explanado no item 2.2.2, o ambiente geológico de leques aluviais operante na formação do depósito de argila, com subambientes no interior da área sondada de planície aluvial e de tálus, propicia interdigitações faciológicas entre os dois subdomínios. De fato, há efetivamente uma zona de transição entre estes subdomínios, como bem evidencia a Figura 2.7, ao invés de contatos abruptos demarcados por falhas ou discordâncias litológicas. Do ponto de vista geoestatístico essa zona apresenta características amostrais estatísticas e de continuidade espacial comuns aos dois subdomínios, reiterando sua natureza transicional, onde as feições geoestatísticas do depósito mudam gradualmente na passagem de um subdomínio geológico ao outro. Esse tipo de situação é abordado em

Rendu (1984), prevendo a possibilidade de tratamento desta zona de transição separadamente.

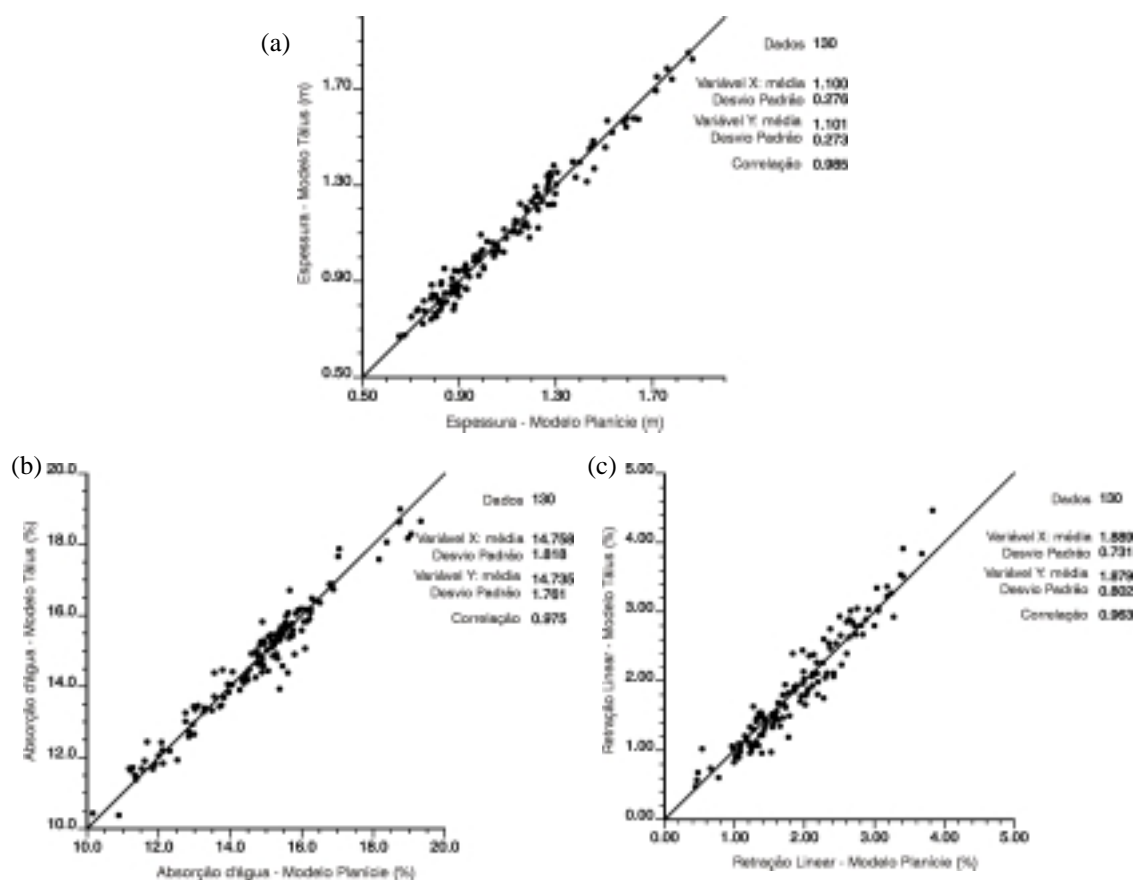
No presente estudo de caso, onde modelos variográficos foram ajustados separadamente para ambos os subdomínios, utilizando-se as respectivas amostras para cada modelamento, deparou-se com algumas dificuldades para a krigagem nesta zona de transição, especialmente em se tratando de estimativas em suporte de blocos. Regiões limítrofes acabavam sofrendo perda de informação ao desconsiderar-se amostras vizinhas, de continuidade deste mesmo subambiente transicional, num truncamento artificial. Alguns testes foram realizados para estimativa de blocos nesta região, considerando-se a cada vez amostras e modelos de um e de outro lado do contato geológico, e comparando-se os resultados. Observou-se que os resultados se mostraram significativamente diferentes entre si, especialmente para retração linear, de comportamento bem distinto para cada subdomínio, com impactos diretos na classificação cerâmica dos blocos estimados. O trabalho de Pawlowsky et al. (1993) aborda a incerteza gerada em regiões de borda, no caso de limites geológicos não estarem claramente definidos.

Optou-se então por krigar o domínio integral (planície+tálus) utilizando todas as amostras indistintamente, filtrando posteriormente somente os blocos desta região de transição. A delimitação desses blocos levou em consideração os aspectos de características cerâmicas amostrais distintos para ambos os domínios, discutidos anteriormente neste capítulo, e a constatação de uma faixa intermediária neste sentido. A este critério somam-se todas as feições de transição geológica abordadas no item 2.2.2.

Para a zona de transição, como cada uma das três variáveis apresenta dois modelos variográficos distintos, um para cada subdomínio, cada variável foi krigada duas vezes, ao longo de toda a área e utilizando todas as amostras, mas a cada vez aplicando o modelo variográfico ajustado para um dos subdomínios. Desta forma a variância de krigagem, tipicamente maior em zonas periféricas, diminui consideravelmente, numa maneira similar aos exemplos citados por David (1988, p.129-134) neste tipo de situação. Conforme apontado por este trabalho, mesmo com tendências distintas para as variáveis em ambos os subdomínios, a influência dos valores amostrais

desta zona de transição no centro de cada subdomínio acaba sendo automaticamente restringida pelo próprio algoritmo de krigagem, cujos pesos de estimativa decrescem com a distância geostatística progressiva de tais amostras. A Figura 3.22 mostra diagramas de correlação entre os resultados obtidos por cada variável, nesta dupla krigagem dos blocos da zona da transição. Para as variáveis de qualidade foram plotados diretamente os resultados finais, obtidos da divisão das respectivas acumulações pela espessura (equação 3.7).

## ZONA DE TRANSIÇÃO

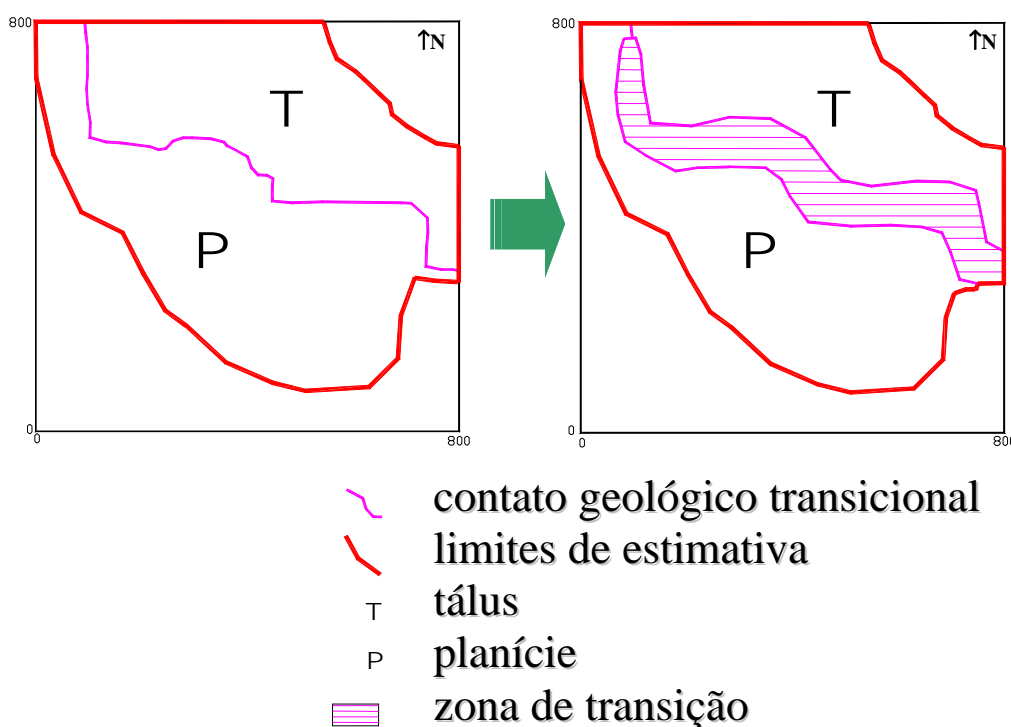


**Figura 3.22 - Comparativo de resultados finais entre estimativas a partir dos modelos variográficos da planície contra estimativas a partir dos modelos variográficos do tálus, para os blocos krigados na zona de transição, variáveis espessura (a), absorção d'água (b) e retração linear (c).**

A alta correlação entre estimativas para mesmas variáveis em mesmos blocos, obtidas a partir de distintos modelos variográficos, demonstra a importância das características locais na continuidade das amostras neste ambiente de transição, as quais mesmo com modelos diferentes, originam

valores estimados muito semelhantes entre si. Diante desta proximidade dos resultados, tomou-se como valor de estimativa definitivo simplesmente a média aritmética entre os dois valores obtidos em cada bloco, para cada variável.

A Figura 3.23 mostra esquematicamente o processo de transformação efetiva de uma linha de contato transicional entre dois subdomínios em um subdomínio à parte, a zona de transição, ou simplesmente “transição”, denominação com que será tratado ora em diante.



**Figura 3.23 - Transformação dos originalmente dois subdomínios geológicos/geoestatísticos em três subdomínios de estimativa, com a adição da "transição" como subdomínio independente.**

Aproximadamente 50% dos blocos deste domínio são provenientes da antiga planície, e o restante do antigo tálus. Além disso, adotou-se o critério de não extrapolar-se nas bordas externas do domínio total estimado. A extensão em área das antigos subdomínios planície e tálus foi assim diminuída significativamente. A Tabela 3.4 apresenta um quadro-resumo do número de blocos e extensão em área para os 3 subdomínios definitivos.



**Tabela 3.4 - Número de blocos estimados em cada subdomínio e respectivas extensões em área.**

Tálus	Planície	Transição	Total
215 = 13,44 ha	245 = 15,31 ha	131 = 8,19 ha	591 = 36,94 ha

A partir dos resultados da krigagem em blocos, após a conversão final bloco-a-bloco da acumulação krigada no valor estimado da variável de qualidade original, pôde-se classificar a argila estimada em estéril ou em um dos dois tipos de minério apresentados anteriormente (Tabela 2.3), no suporte de blocos de lavra. Com a espessura estimada em cada bloco, considerando a área deste ( $625 \text{ m}^2$ ) e peso específico da argila ( $2 \text{ t/m}^3$ ) constantes, foi possível também quantificar por bloco e por subdomínio a tonelagem total estimada de argila, de cada tipo classificado.

Em resumo, as estimativas efetuadas envolveram:

- 3 subdomínios: Planície, Transição e Tálus;
- 3 variáveis: espessura, absorção d'água e retração linear (variáveis de qualidade krigadas indiretamente via acumulações);
- 3 produtos finais: argilas tipo Biqueima e Monoporosa, e estéril.

A seguir são apresentados em cada subdomínio separadamente e para cada variável de interesse, os resultados da krigagem em blocos, com sua classificação cerâmica em função dos parâmetros de qualidade estimados. Uma caracterização global da área pesquisada (vista como um todo) é apresentada no Apêndice D, incluindo um quadro-resumo dos recursos geológicos globais.

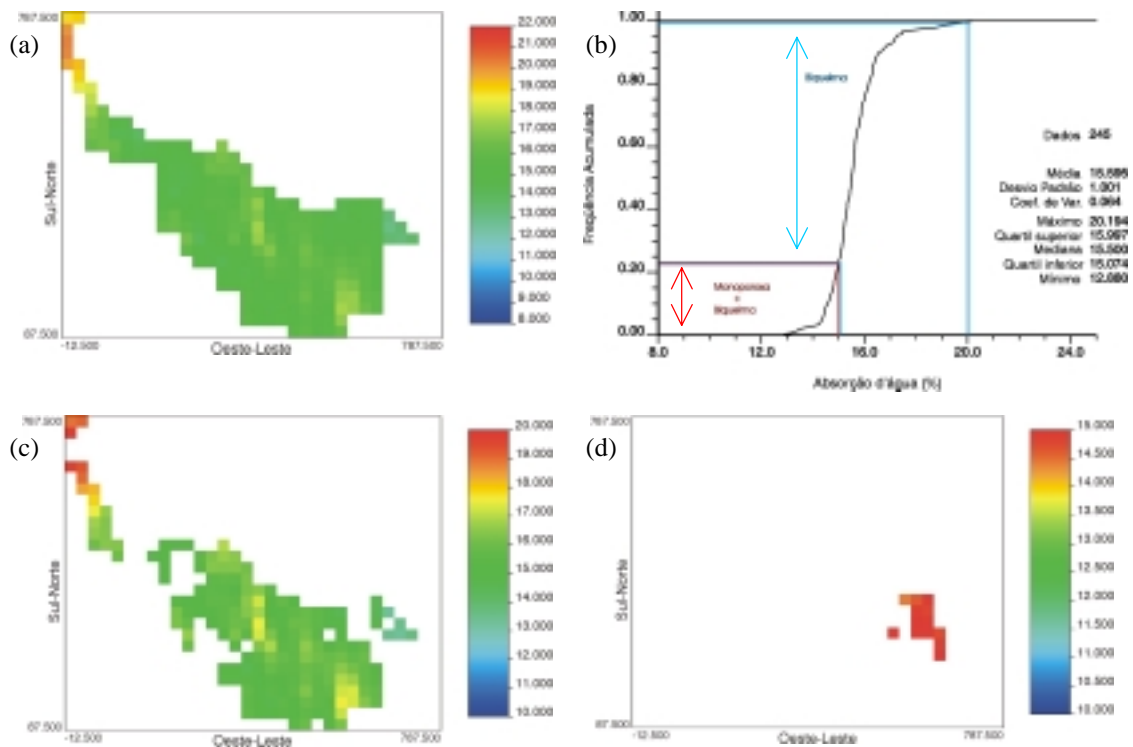
### 3.4.2.1 Planície

Os resultados da krigagem em blocos para o subdomínio planície são apresentados na Figura 3.24. A já comentada maior homogeneidade geológica e cerâmica da argila ocorrente neste domínio é nítida ao observar-

se a Figura 3.24a. A este fator adiciona-se o habitual efeito suavizador da krigagem, acentuado pela diluição de eventuais pontos isolados de valores mais extremos quando embutidos no suporte de blocos. Apenas o canto NW apresenta valores mais altos, decorrentes da maior proximidade da fonte da sedimentação, resultando em sedimentos comparativamente mais arenosos (quartzosos), com isso elevando os valores de absorção d'água.

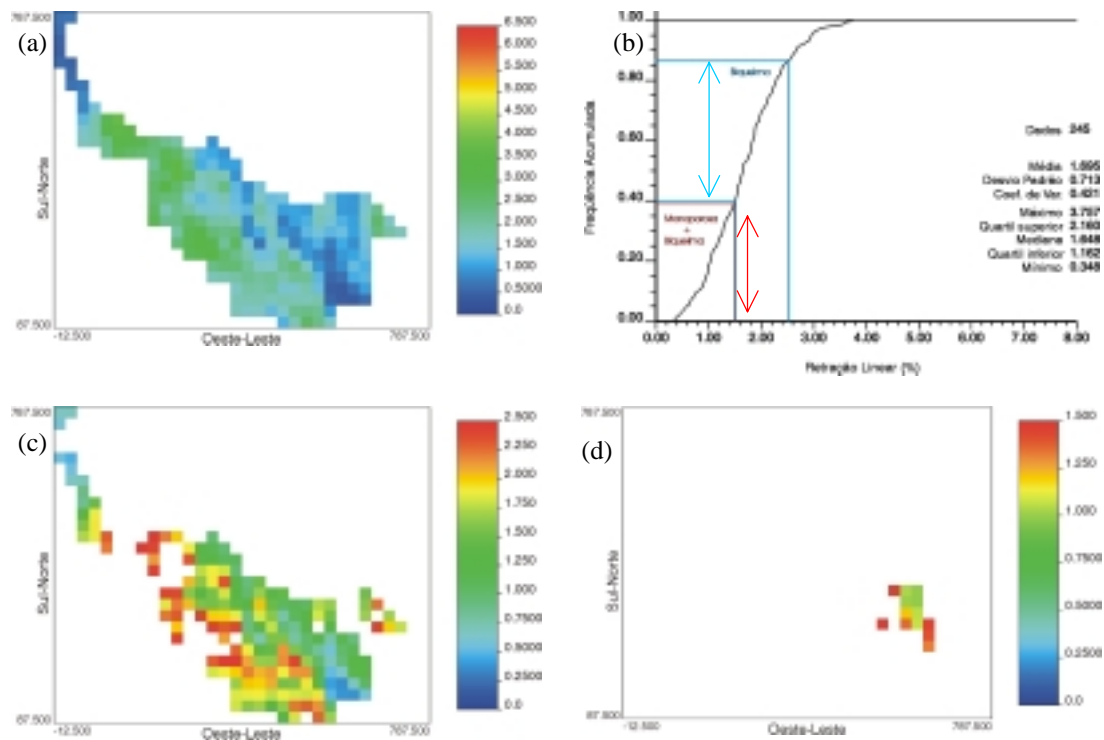
A combinação dos valores estimados para as duas variáveis de qualidade permitiu a classificação da argila ocorrente. A Figura 3.24b mostra a favorabilidade deste subdomínio em termos de proporções de argila estimada enquadrado em um e em outro grupo cerâmico, quando esta variável é considerada isoladamente. A argila é classificada segundo a combinação de dois parâmetros de qualidade, conforme já apontado, diminuindo consideravelmente o número de blocos “mineralizados” (Figura 3.25c e d). Comparando com figura similar dos valores pontuais amostrais (Figura 3.12c), percebe-se uma redução do percentual da argila tipo monoporosa, mais nobre. Isso confirma o impacto e ao mesmo tempo o perigo de estender-se os valores pontuais mais extremos para blocos, ainda que de pequena dimensão, desprezando o “efeito suporte”. Os reflexos de diferentes suportes na variância dos valores e na recuperação de reservas serão abordados em maior detalhe no Capítulo 4.

Os blocos classificados como argila tipo Biqueima (Figura 3.24c) abrangem a maior parte em área da planície (207 blocos de um total de 245), confirmando a favorabilidade da planície para argila deste tipo, especialmente no tocante à boa constância dos valores (a escala de valores abrange os limites dos valores permitidos para esta variável em argila biqueima). Algumas lacunas estão presentes na região SE, correspondendo em maior parte aos poucos (13) blocos classificados como monoporosa, e na região W e NW a material estimado como estéril. Os blocos tipo monoporosa (Figura 3.24d) aparecem concentrados no extremo E do domínio, com valores estimados no limite para argilas tipo biqueima.



**Figura 3.24 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

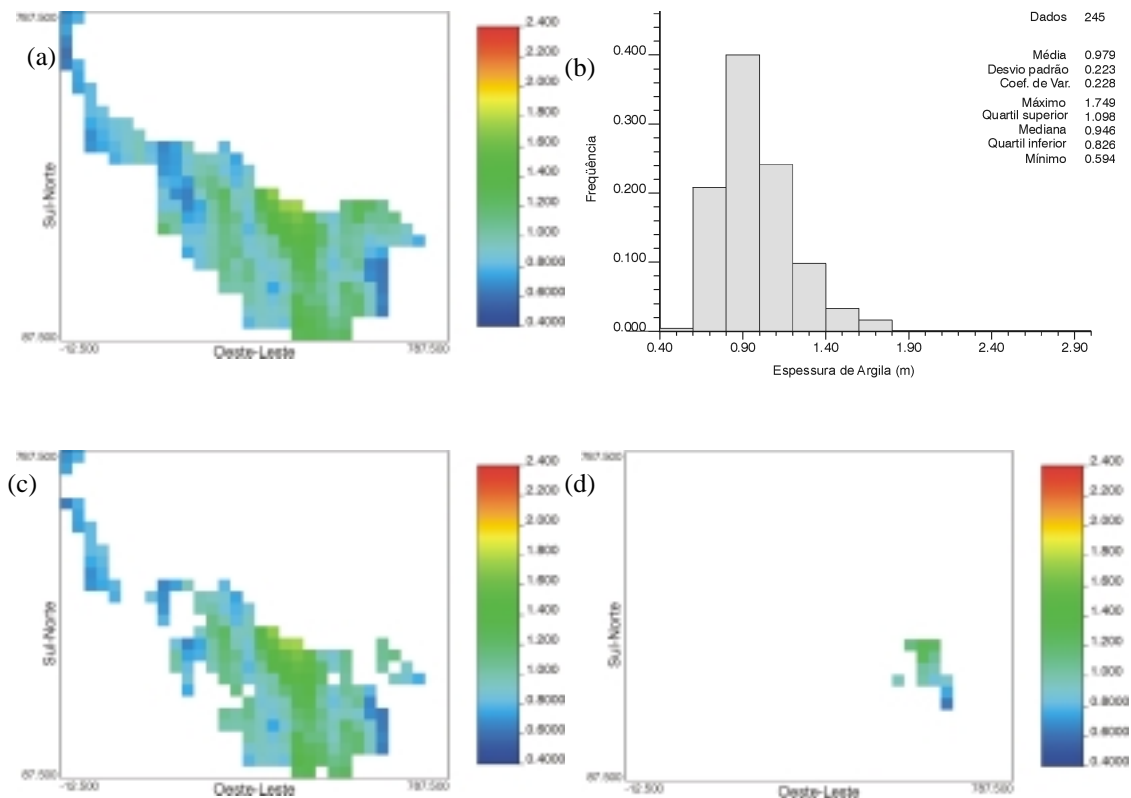
Em relação à estimativa em blocos da variável retração linear, a Figura 3.25a e b mostra uma maior heterogeneidade global de valores e sua distribuição em relação à absorção d'água. A comparação do histograma para os valores cubados de retração linear para blocos (Figura 3.25b) em relação aos valores pontuais originais (Figura 3.25d), mostra significativas diferenças, corroborando o perigo de estimativas do tipo polígono de influência (tradicionalmente usadas em Santa Catarina para este tipo de material) que desconsideram a diluição de valores extremos quando a argila é estimada no suporte de blocos. Reiterando o já observado, os impactos na classificação errônea da argila na lavra e na utilização nos processos cerâmicos podem ser bastante negativos.



**Figura 3.25 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável retração linear (%) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

A Figura 3.25c e d mostra uma dispersão significativa dos valores estimados para retração linear, nos blocos classificados em um dos dois tipos de argila cerâmica, nos respectivos intervalos de classificação. Isso mostra que tal classificação é mais errática para a retração linear comparando com o outro parâmetro industrial.

Os resultados globais da estimativa em blocos realizada para a espessura dos blocos de argila na planície são apresentados na Figura 3.26a. É notória uma concentração dos maiores valores (acima de 1,0 m) junto ao centro-sul da área estimada, orientados NNW-SSE. Também mais uma vez é nítida a habitual suavização dos valores amostrais pontuais quando krigados num suporte de bloco, especialmente espessuras maiores observados nos furos na porção centro-norte (a escala de valores engloba a extensão total de dispersão dos valores amostrais).



**Figura 3.26 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável espessura (m) no subdomínio planície: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

O histograma da Figura 3.26b mostra tal suavização em termos de distribuição de frequência, quando comparado ao histograma das amostras na Figura 3.11b. Aliado à simetrização do histograma, há uma queda brusca em seu CV, como esperado.

A Figura 3.27 apresenta a classificação geral dos blocos krigados em estéreis ou mineralizados, denotando as boas perspectivas de aproveitamento da argila neste subdomínio como um todo, especialmente na sua porção centro-sul. Já a Figura 3.28a mostra percentualmente a alta tonelage da argila classificada como cerâmica neste subdomínio, em relação à argila estimada como fora dos padrões, enquanto que a Figura 3.28b indica percentuais discriminados das tonelagens estimadas para os dois tipos de argila cerâmica, com a ampla predominância da argila tipo Biqueima.

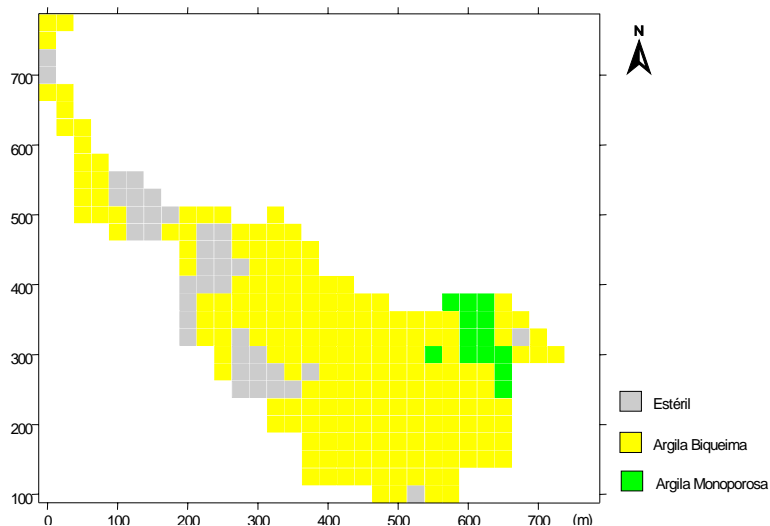


Figura 3.27 - Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados no subdomínio planície.

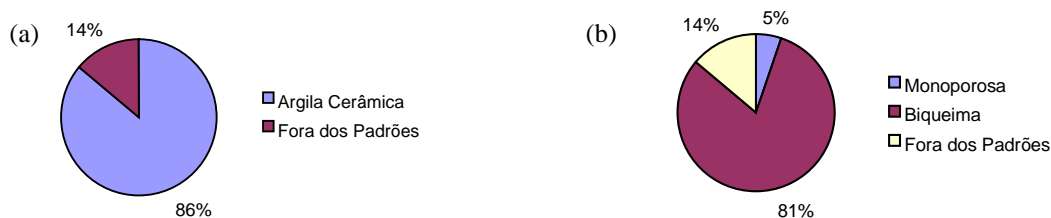


Figura 3.28 - Percentuais estimados de toneladas de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b)

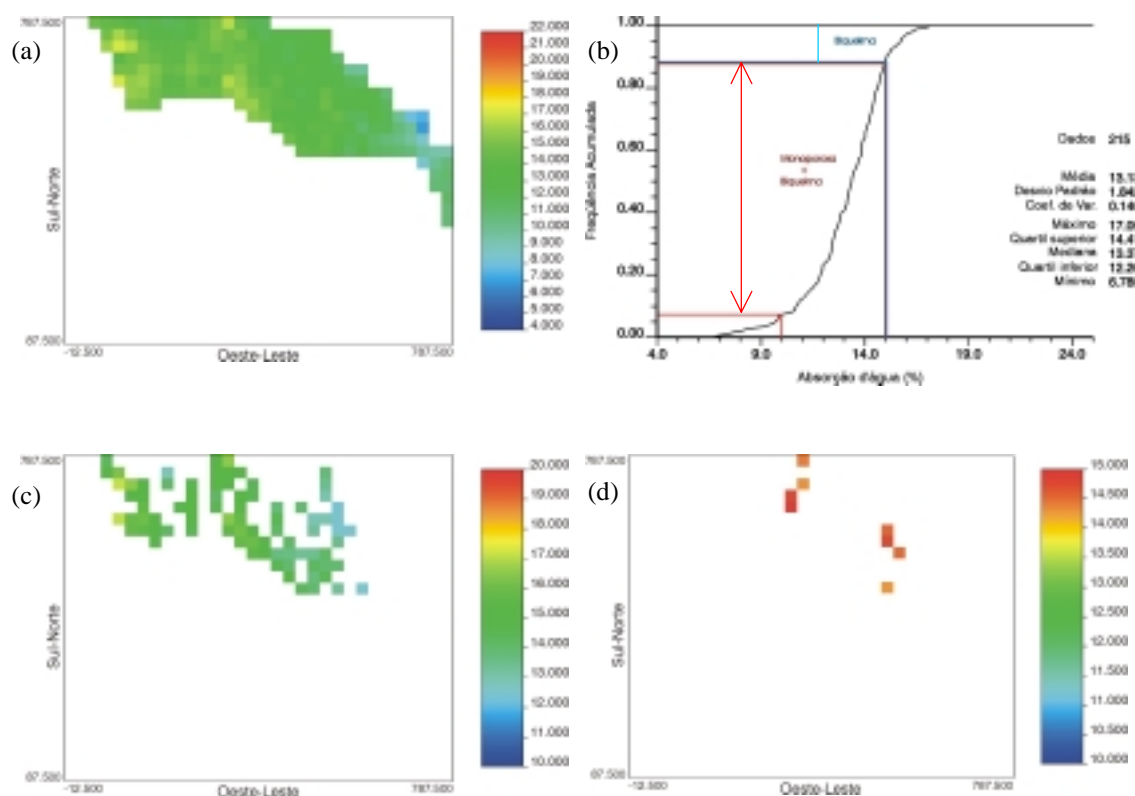
### 3.4.2.2 Tálus

Os resultados da krigagem em blocos para a absorção d'água no subdomínio tálus são apresentados na Figura 3.29a. Embora atenuada pelo efeito suavizador da krigagem, somada à diluição de eventuais pontos isolados de valores mais extremos quando embutidos no suporte de blocos, é visível a maior variabilidade desta variável neste subdomínio em relação à planície. É marcante a ocorrência de blocos com valores muito baixos na porção centro-leste, indicando a transição para uma outra população, conforme colocado no item 3.2.2.2.

A Figura 3.29b mostra a grande favorabilidade deste subdomínio em termos de proporções de argila estimada nos intervalos mais nobres, quando esta variável é considerada isoladamente. Porém, para a outra variável de

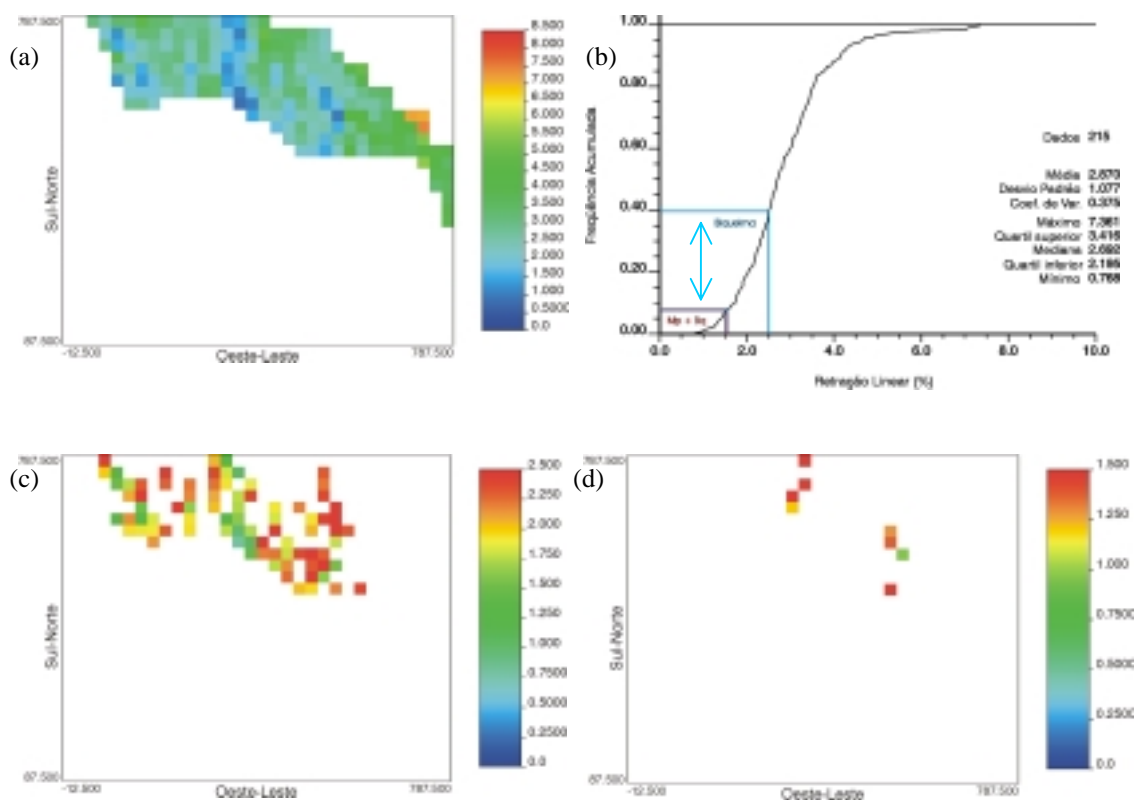
qualidade o panorama é bem diferente, como será visto adiante, fazendo com que este número caia drasticamente (Figura 3.29c e d). Comparando com valores pontuais amostrais (Figura 3.15c), observa-se que neste caso as estatísticas, embora com menor dispersão, apresentam padrões semelhantes no tocante ao enquadramento em intervalos de classificação cerâmica.

Os blocos classificados como argila tipo Biqueima (Figura 3.29c) distribuem-se fragmentariamente no tálus, numa situação bastante desfavorável em termos de possível exploração, agravada por ser uma região parcialmente coberta por residências e cortada por estrada vicinal. Os blocos tipo monoporosa (Figura 3.29d) apresentam-se em pequena quantidade, muito dispersos e a exemplo da planície, com valores estimados para absorção d'água no limite para argilas tipo Biqueima.



**Figura 3.29 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

Em relação à estimativa em blocos da variável retração linear, a Figura 3.30a e b mostra uma heterogeneidade global de valores maior que na planície. O histograma na Figura 3.30b corrobora a situação altamente desfavorável para esta variável e para este subdomínio em geral. A exemplo da planície, a comparação do histograma para os valores cubados de retração linear para blocos (Figura 3.30b) em relação aos valores pontuais originais (Figura 3.15f), mostra significativas diferenças, especialmente no tocante à redução da participação de material tipo monoporosa. Isso denota mais uma vez o perigo de estimativas do tipo polígono de influência, podendo causar impactos negativos na classificação errônea da argila.



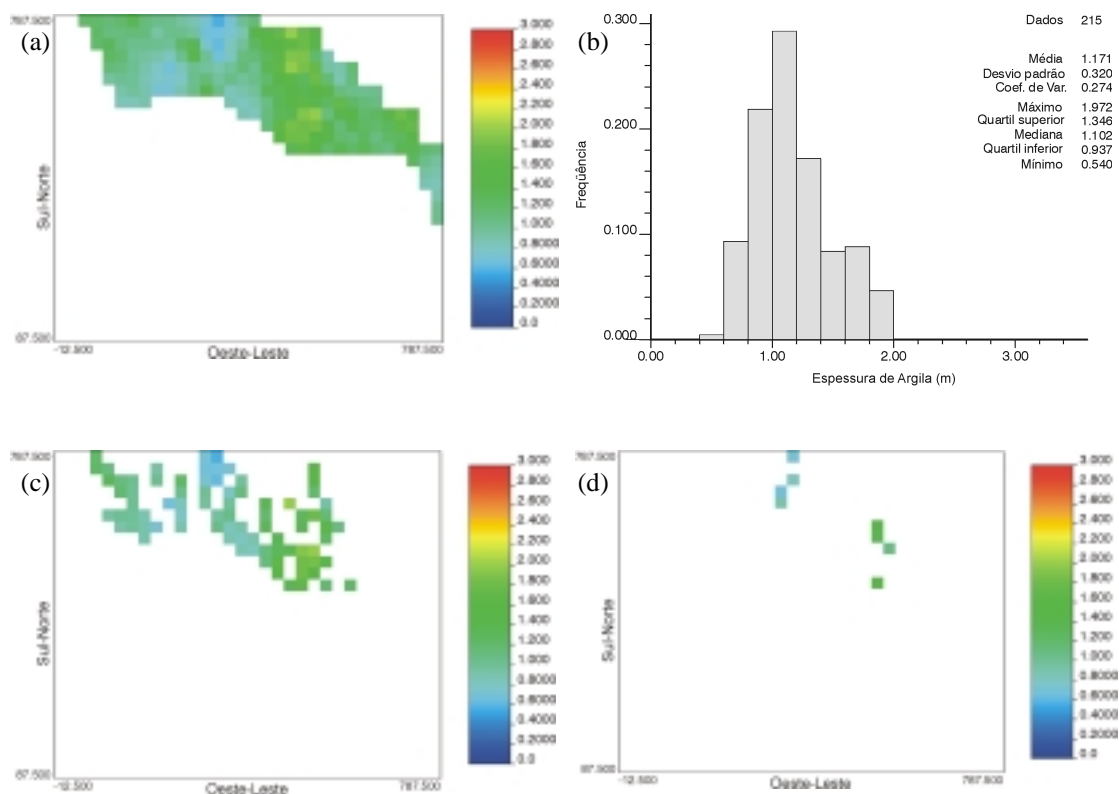
**Figura 3.30 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável retração linear (%) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

A Figura 3.30c e d mostra uma dispersão significativa dos valores dos blocos classificados como argila cerâmica, especialmente para biqueima, com vários blocos nos limites superiores do intervalo de classificação. Os



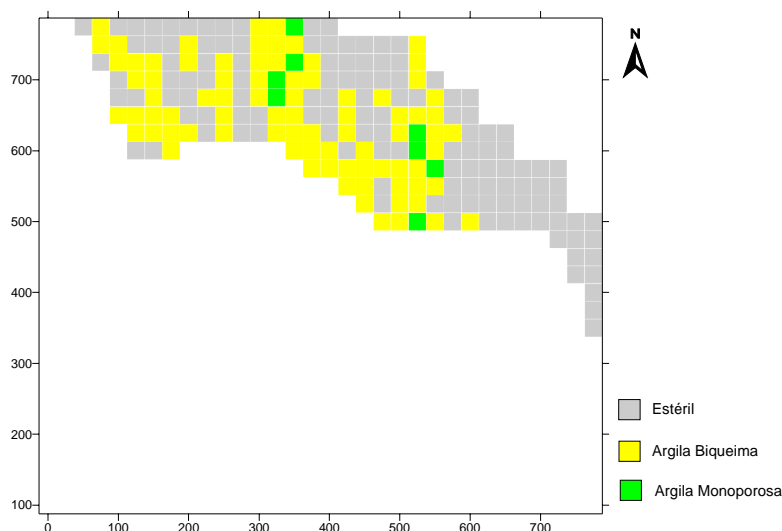
poucos blocos classificados como monoporosa também estão em maioria nos limites para argila biqueima. Isso mostra a margem de incertezas para a retração linear neste subdomínio.

Os resultados globais da estimativa em blocos realizada para a espessura dos blocos de argila no tálus são apresentados na Figura 3.31a. É notória uma concentração dos maiores valores (acima de 1,0 m) junto ao centro-leste da área estimada, orientados NNW-SSE, dando continuidade ao paleocanal observado na planície. A suavização dos valores amostrais pontuais quando krigados num suporte de bloco, é mais uma vez evidente (Figura 3.31b), tendendo a apresentar espessuras estimadas ligeiramente maiores que na planície (porém para um material em média pior, em termos cerâmicos). A fragmentação dos blocos “mineralizados” torna a situação também muito descontínua em termos de espessura estimada dos blocos, acentuando ainda mais as dificuldades já registradas para este subdomínio.

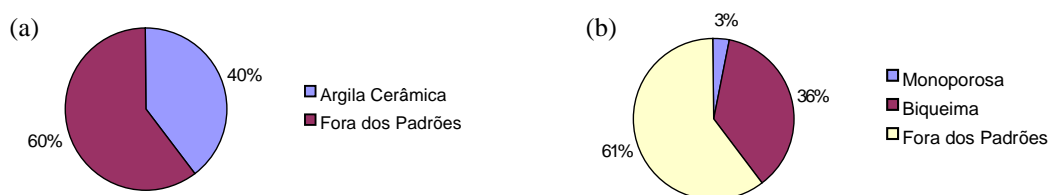


**Figura 3.31 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável espessura (m) no subdomínio tálus: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

A Figura 3.32 apresenta a classificação geral dos blocos krigados em estéreis ou mineralizados, denotando a desfavorabilidade deste subdomínio, ilustrada pelo grande percentual de tonelagem estimada de argila fora dos padrões requeridos (Figura 3.33).



**Figura 3.32 - Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados: subdomínio tálus.**

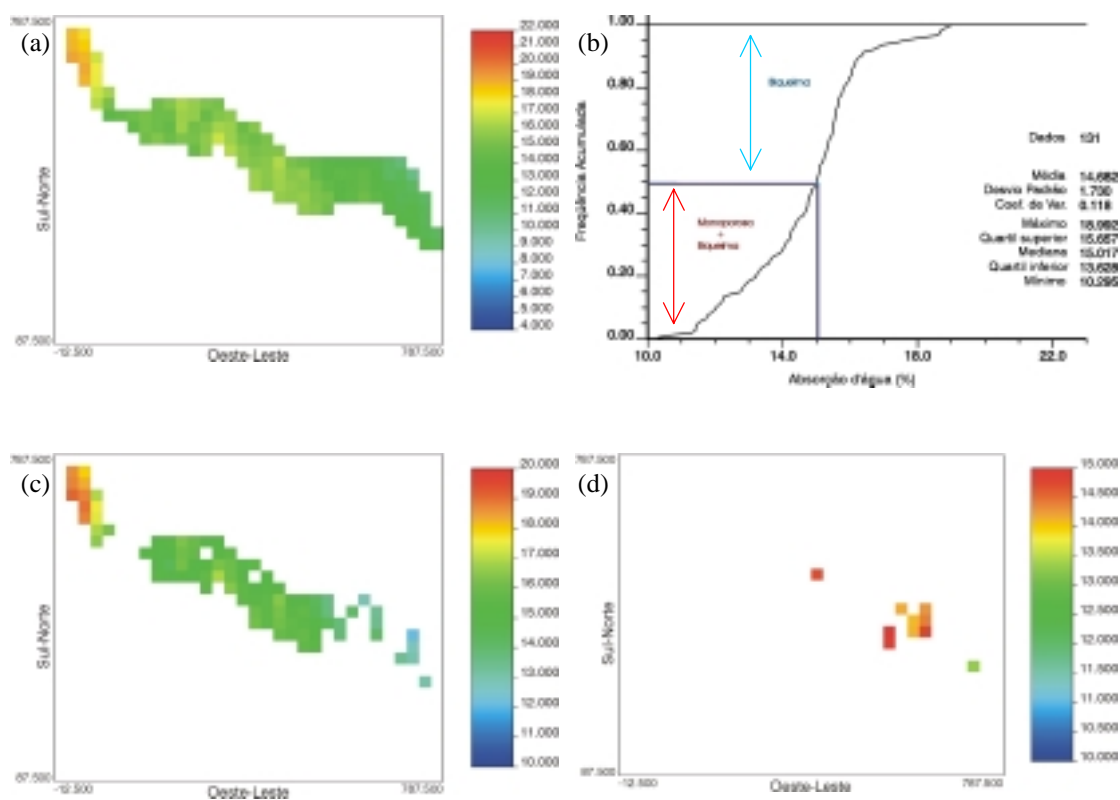


**Figura 3.33 - Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), subdomínio tálus.**

### 3.4.2.3 Transição

Os resultados da krigagem em blocos para o subdomínio transição, variável absorção d'água, são apresentados na Figura 3.34. Como seria de se esperar, os resultados no geral são intermediários aos dois domínios circundantes, embora com maior semelhança com a situação da planície, principalmente em termos de homogeneidade da argila estimada (Figura 3.34a), com exceção do extremo NW, mais arenoso e de maiores valores de absorção d'água, conforme já comentado.

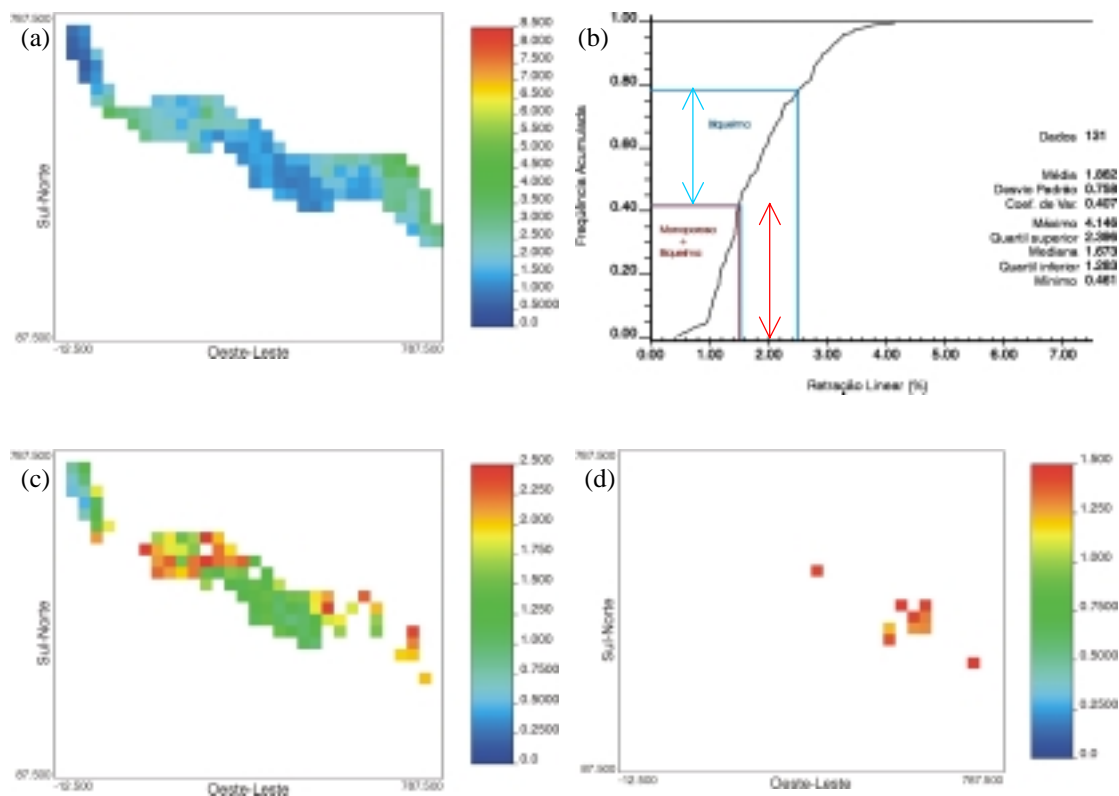
A Figura 3.34b mostra a favorabilidade deste subdomínio em termos de proporções de argila estimada enquadrado em um e em outro grupo cerâmico, quando esta variável é considerada isoladamente. Em termos de blocos mineralizados (Figura 3.34c e d), verifica-se uma situação semelhante à encontrada na planície, em relação à constância dos valores, com os blocos de monoporosa aparecendo com valores pouco mais distantes dos limites monoporosa/biqueima. A região leste, onde aparecem os blocos de argila tipo monoporosa, apresenta delimitação geográfica bastante difusa de ocorrência de blocos classificados como um e outro tipo cerâmico.



**Figura 3.34 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável absorção d'água (%) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

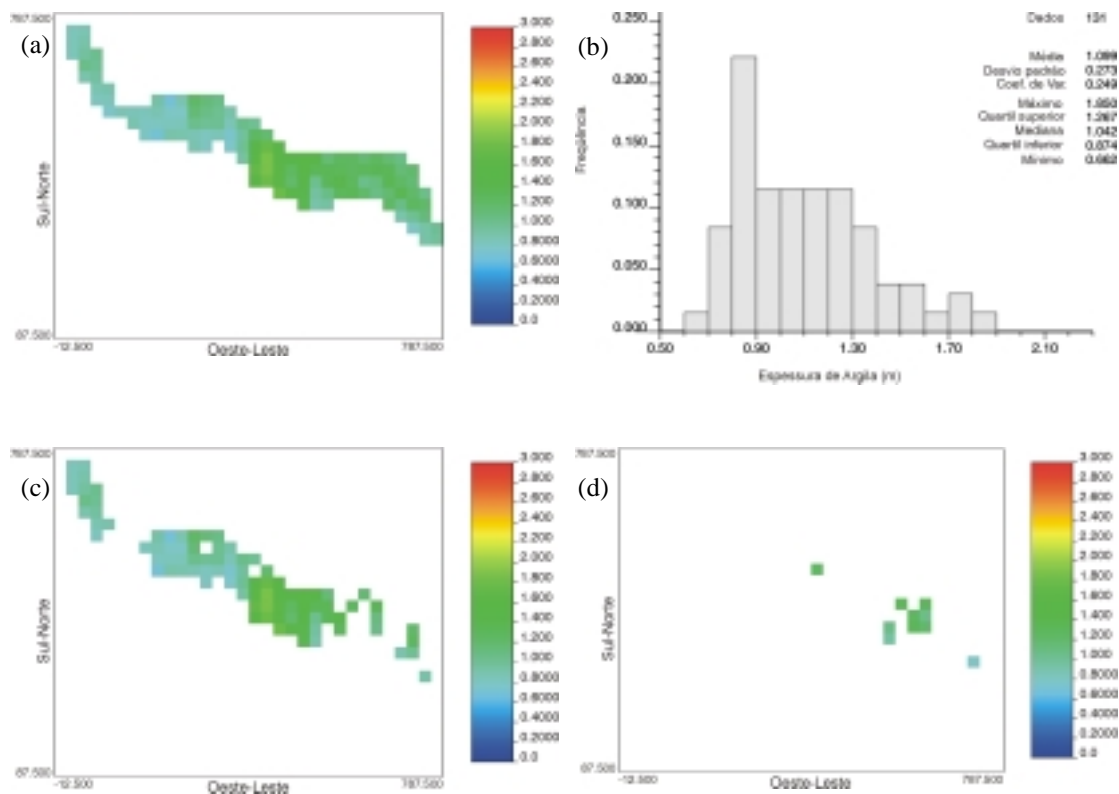
Entretanto, em relação à estimativa em blocos da variável retração linear, a Figura 3.35a e b mostra uma situação consideravelmente mais desfavorável que na planície, acentuando as diferenças entre os dois subdomínios. A Figura 3.35c e d confirma uma maior heterogeneidade dos

valores e a maior tendência aos blocos encontrarem-se nos limites superiores dos intervalos classificatórios, tornando esse subdomínio um pouco mais crítico em relação a esta variável.



**Figura 3.35 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável retração linear (%) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de frequência acumulada ponderada com espessura contendo os limites de classificação cerâmica; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

Os resultados da estimativa em blocos realizada para a espessura dos blocos de argila na planície são apresentados na Figura 3.36a. Mais uma vez é visível uma concentração dos maiores valores (acima de 1,0 m) no centro desta faixa estimada, orientados NNW-SSE. O histograma da Figura 3.36b mostra uma distribuição semelhante a dos valores de espessura da planície, porém estes tendem aqui a serem um pouco maiores, caracterizando já a gradação para o tálus: maior espessura, porém pior em termos cerâmicos. A Figura 3.36c e d confirma as tendências acima observadas, também para os blocos mineralizados.



**Figura 3.36 - Resultados da krigagem em blocos 25m x 25m para a variável espessura (m) no subdomínio transição: (a) totalidade dos blocos estimados; (b) histograma de freqüência dos valores estimados; blocos classificados como biqueima (c) e monoporosa (d).**

A Figura 3.37 apresenta a classificação geral dos blocos krigados em estéreis ou mineralizados, indicando favorabilidade no centro e centro-leste, nesta última porção com ocorrência de alguns blocos classificados como monoporosa. Já a Figura 3.38a e b mostra uma situação semelhante à reportada para a planície em termos percentuais de recursos geológicos.

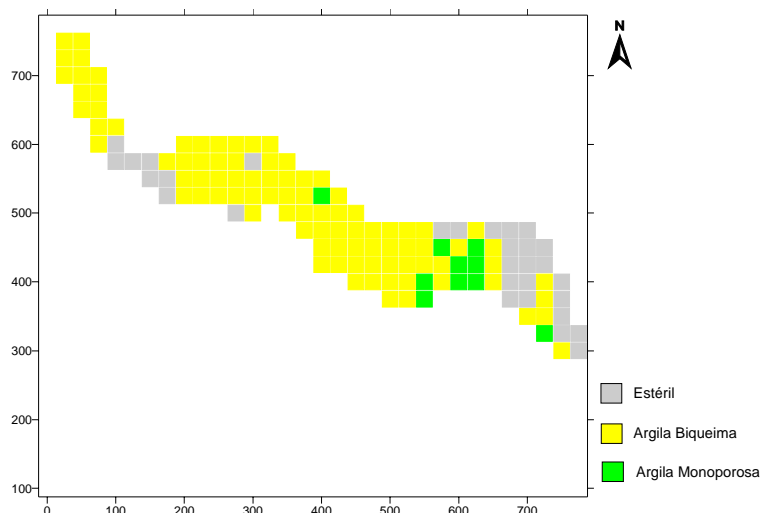


Figura 3.37 - Distribuição espacial de blocos estéreis e mineralizados: subdomínio transição.

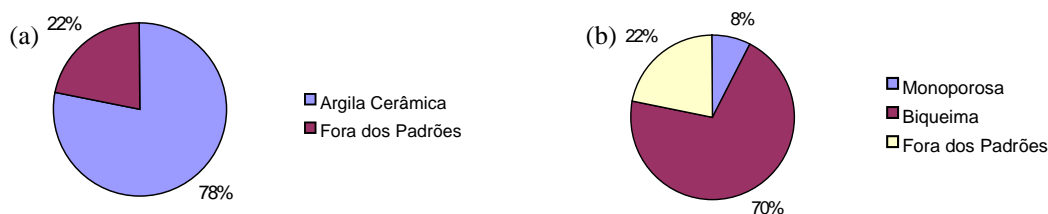


Figura 3.38 - Percentuais estimados de tonelagens de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), subdomínio transição.

### 3.5 Relação Estéril/Minério

Na avaliação de recursos geológicos de um depósito mineral, é importante também considerar a relação cobertura estéril / minério, ou simplesmente a relação estéril/minério. Tal fator dá uma idéia do custo relativo de extração, podendo em jazidas de minerais industriais de baixo custo unitário, como o caso presente, inviabilizar a exequibilidade econômica de um projeto de lavra.

O depósito em estudo apresenta uma situação muito favorável neste sentido, especialmente no subdomínio planície e adjacências da transição, onde a qualidade cerâmica estimada é melhor, conforme item anterior.

Através de levantamentos topográficos de detalhe na área em estudo, Stangler et al. (2001b), Apêndice A, avaliaram o risco na estimativa desta razão estéril-minério, englobando limites pouco maiores que o envelope final da planície. Uma combinação de métodos geoestatísticos de krigagem,

modelando as superfícies do terreno e da capa do horizonte argiloso e com isso obtendo o volume de material estéril de cobertura, e de simulações estocásticas da espessura do horizonte argiloso, obtendo diferentes volumes totais de minério, propiciaram a apreciação de cenários extremos (otimista e pessimista) e mediano, em termos da quantificação da relação estéril/minério.

Foi constatado que para estes cenários extremos tal índice oscilou entre 0,160 e 0,170 m<sup>3</sup>/t, com um cenário mediano de 0,165 m<sup>3</sup>/t, portanto entre aproximadamente 3% acima e 3% abaixo desse valor intermediário, por sua vez já bastante baixo. Estas pequenas oscilações esperadas certamente não irão impactar a exequibilidade econômica de um eventual empreendimento mineiro. Maiores detalhes desta avaliação de riscos na relação estéril-minério da porção S do depósito são apresentados em Stangler et al. (2001b), Apêndice A.

### **3.6 Discussão dos Resultados**

Os resultados obtidos das estimativas em blocos realizadas com classificações cerâmicas a partir dos valores estimados dos parâmetros de qualidade, e quantificação de reservas de cada tipo com base nas espessuras estimadas, permitiram a caracterização de feições mais marcantes da jazida em termos de recursos geológicos.

A porção mais promissora em termos de recursos de argila com aproveitamento cerâmico é indiscutivelmente a planície, tanto em termos de quantidade e qualidade do material estimado, quanto de sua continuidade e aparente menor variabilidade, além de relação estéril/minério bastante favorável. O tálus, além de comportar um domínio geologicamente mais heterogêneo, tende a ser mais pobre em termos de qualidade cerâmica, ainda que com espessuras ligeiramente maiores. O caráter descontínuo dos blocos classificados como argila cerâmica, sua relativa pouca incidência e sua localização em região residencial desestimulam o prosseguimento de trabalhos. A transição, como o próprio nome indica, apresenta características comuns a ambos os subdomínios, denotando com isso uma situação à parte, razão pela qual foi estimada separadamente. Resultados satisfatórios em

termos de uma variável de qualidade, a absorção d'água, não corresponderam da mesma forma para a variável considerada mais crítica, a retração linear.

A estimativa em suporte de blocos mostrou características significativamente distintas das amostras de trado iniciais. Isso confirma o perigo do uso tradicionalmente empregado neste tipo de depósitos na região de métodos tais como o polígono de influência, além da total desconsideração a feições geológicas de continuidade espacial.

Cabe registrar que, embora consagrado como método de estimativa com todas as suas virtudes, a krigagem apresenta algumas limitações. A variância de krigagem, como é independente dos valores amostrais, apenas provê uma comparação de configurações amostrais, não sendo desta forma uma medida apropriada de acuracidade de estimativas locais (Deutsch & Journel, 1998 p.15). Por esta razão, nesta dissertação a variância de krigagem não é tomada como um critério de avaliação de variabilidade dos atributos. Ferramentas como simulações estocásticas serão utilizadas neste sentido no Capítulo 4. Além disto, a krigagem tem sido muito combatida como método de avaliação de reservas recuperáveis, por suavizar a variância e a variabilidade de predições, dando margem a erros em classificações e não permitindo inferir o nível de incerteza sobre uma determinada estimativa. Porém, na opinião do autor continua sendo um método válido para mapeamento, classificação e apreciação de recursos geológicos (reservas *in situ*), fornecendo imagens iniciais prováveis dos recursos de um determinado depósito, indicando regiões de potencialidade e com isso orientando atitudes iniciais para planejar trabalhos e decisões a seguir. Em função disso, esse método foi aplicado no presente capítulo, na modalidade de krigagem em blocos, para a quantificação dos recursos geológicos existentes e classificação cerâmica da argila ocorrente neste suporte.

A partir dos resultados promissores para recursos geológicos no subdomínio planície, optou-se por avaliar incertezas nas classificações cerâmicas deste domínio, bem como nas diferentes espessuras mínimas, antecipando a comparação de métodos de diferente seletividade na extração da argila. Tal avaliação será objeto de estudo do Capítulo 4.



# Capítulo 4

## Análise das Reservas Recuperáveis

A partir da avaliação dos recursos geológicos realizada no capítulo precedente, onde nos modelos de blocos apresentados diferentes tipos cerâmicos de argila foram estimados e classificados em diferentes segmentos do depósito em estudo, pôde-se identificar a planície como o subdomínio mais favorável da área sondada. Por sua vez, o tálus mostrou resultados da krigagem pouco encorajadores, enquanto a transição apresentou resultados intermediários, com sérias restrições apontadas. Porém, os resultados favoráveis obtidos na planície, além de não levarem em conta nenhum critério de seletividade mineira, também não apresentam consigo nenhuma quantificação do risco associado com essas predições.

Uma avaliação das reservas recuperáveis, i.e., daquela fração dos recursos geológicos efetivamente minerável (no caso presente atendendo exigências industriais e de seletividade mineira), é realizada no presente capítulo. Métodos de geoestatística não-linear são aplicados. Essa análise é restrita à planície, único subdomínio com potencial maior para ser portador de reservas significativas de argila cerâmica, conforme apontado anteriormente.

Simulações estocásticas condicionais são aplicadas no estudo de reservas recuperáveis, mais especificamente através do método da simulação seqüencial Gaussiana (ssG). O intuito desse procedimento é quantificar a variabilidade bloco-a-bloco da argila e o risco associado, nas classificações cerâmicas e conjuntamente nos montantes de reservas recuperáveis, segundo critérios de seletividade mineira (espessura mínima

minerável). As três variáveis são envolvidas nas simulações, ainda que indiretamente no caso das variáveis de qualidade (uso de acumulações). Esse enfoque probabilístico permite a apreciação de cenários extremos (otimista e pessimista) e medianos, quantificando incertezas ou riscos nas reservas, tanto em nível local quanto global.

#### 4.1 Campo da Geoestatística Não-Linear

Na quantificação dos recursos geológicos apresentada no Capítulo 3, estimativas das variáveis de interesse foram obtidas através de krigagem ordinária em blocos, consagrado método do campo da geoestatística linear fornecendo valores « ótimos » - mínima variância do erro de krigagem.

Entretanto, há situações em que o interesse central reside antes em saber em que proporção a variável de interesse excede um determinado valor de referência (*threshold* ou *cutoff*), prioritariamente à estimativa propriamente dita da variável de interesse. Os trabalhos pioneiros de Matheron (1973) e Maréchal (1976) já abordavam esse tipo de problema.

A quantificação e parametrização de reservas recuperáveis é um típico exemplo de análise não-linear deste tipo. A questão básica nestes casos é a determinação da função de distribuição cumulativa  $F(z)=Pr\{Z(x)<z\}$ , onde  $Pr$ =probabilidade,  $Z(x)$ =variável aleatória e  $z$ =valor de referência (« *cut-off* »), conforme Chilès & Delfiner (1999, p.375). Essa distribuição pode ser tanto local quanto global. Esses métodos da chamada geoestatística não-linear são geralmente muito afetados pelos efeitos suporte e informação (Cruz Júnior, 1998, e Cruz Júnior & Remacre, 2001), conforme será discutido ao longo deste capítulo. Diversos tipos de curvas de parametrização de reservas podem ser obtidos, estabelecendo relações entre tonelagem e teor, conforme discutido em Rivoirard (1994).

Métodos geoestatísticos lineares clássicos como a krigagem não são adequados para esse tipo de aplicação, pois suavizam por demais os valores estimados da variável de interesse, acarretando em viés positivo ou negativo na predição da recuperabilidade dos recursos. Além disso, esse tipo de estimadores não reproduz a variabilidade espacial dos valores reais, e por

conseqüência inviabiliza a obtenção da proporção de valores reais acima de um determinado « *cut-off* » (Journel & Huijbregts, 1978 p.556).

Vários métodos geoestatísticos não-lineares têm sido tradicionalmente aplicados no estudo de reservas recuperáveis (Chilès & Delfiner, 1999 Cap.6), tais como: esperança condicional, condicionamento uniforme (Remacre, 1984), métodos da indicatriz em geral, krigagem lognormal e a krigagem disjuntiva. O uso de simulações condicionais na análise de reservas, tal como aplicado nessa dissertação, é comparativamente bem mais recente, conforme alguns exemplos citados no item 1.1.

## **4.2 Definição de Reservas Recuperáveis**

Segundo Olea (1991, p.64), reservas recuperáveis compreendem a fração das reservas *in situ* (=recursos geológicos) de uma mina ou jazida que é economicamente viável. Assim, as reservas recuperáveis serão menores, ou no máximo (muito raramente) iguais aos recursos geológicos, os quais são medidos em sua totalidade no seu lugar natural de ocorrência, independentemente de aspectos técnicos ou econômicos relacionados com sua exploração (Olea, 1991 p.67). Esta noção de grau de recuperabilidade envolve considerações financeiras, técnicas, sócio-econômicas e ambientais. A abordagem a seguir restringe-se aos aspectos técnicos (mineiros e industriais) do depósito em estudo, não adentrando em análises de viabilidade econômico-financeira de um eventual projeto mineiro, o que fugiria ao escopo do trabalho.

As diferenças entre reservas recuperáveis e *in situ* e todas as implicações envolvidas são abordadas no item 4.2.1. Um enfoque específico para o caso de reservas de argila cerâmica é apresentado no item 4.2.2.

### **4.2.1 Reservas Recuperáveis X Reservas *in situ***

Este tem sido um dos mais importantes tópicos da geoestatística mineira, pois reservas *in situ* não são usualmente suficientes para

caracterizar um corpo de minério (David, 1988 p.142). Os termos « seleção » e « reservas recuperáveis » só passam a ter algum significado no momento em que eles são usados no contexto de condições tecnológicas precisamente definidas para a recuperação (Journel & Huijbregts, 1978 p.21). Essa definição de condições tecnológicas normalmente está atrelada à aplicação de algum teor de corte (*cut-off*). No estudo de caso presente, são considerados intervalos de parâmetros de qualidades que definem dois tipos de argila cerâmica, e também diferentes espessuras mínimas mineráveis, antevendo diferentes níveis de seletividade mineira. Na seleção dos blocos de lavra recuperáveis, não foi levada em consideração diretamente o posicionamento dos blocos no contexto dos blocos circundantes no depósito (« seleção de restrições »), caracterizando assim a chamada « seleção livre » (Remacre, 1984). Assim, as reservas recuperáveis não se adequarão necessariamente a um plano de lavra definido, numa abordagem similar à realizada em Cruz Júnior (1998, p.3).

David (1977, Cap.11) apresenta uma discussão sobre a inter-relação entre curvas de parametrização (teor-tonelagem), seleção minério-estéril e problemas de decisões de operações mineiras e planejamento de lavra. Segundo este autor, o ponto crucial é saber a recuperação de amanhã com base na informação de hoje (=amostras).

Quando se fala em diferenciações entre reservas recuperáveis e recursos geológicos (=reservas *in situ*), é inevitável uma breve revisão do que se entende como « minério », ou, sendo mais generalista, daquele material natural que se pode considerar como minerável técnica e economicamente, encontrado em « reservas minerais ». A definição de minério contida em (David, 1977 p.301) diz respeito à uma substância mineral de ocorrência natural da qual um ou mais constituintes de valor podem ser extraídos com proveito pela mineração e posterior separação, sob condições prevalecendo na época da avaliação. Entretanto, os minerais industriais (entre os quais a argila cerâmica), mesmo não se encaixando exatamente nesta definição, constituem substâncias minerais naturais mineráveis e aproveitáveis de forma direta, *in natura*. Para serem mineráveis, além de preencher os requisitos industriais de qualidade cerâmica, é necessário que apresentem volume suficiente para justificar um empreendimento mineiro, e também uma

determinada espessura mínima, a fim de se poder aplicar um dado método de lavra com um dado grau de seletividade.

Embora sejam minerados efetivamente valores reais, todas as decisões mineiras são tomadas em valores estimados. A definição canadense de reserva mineral (de acordo com David, 1977 p.302) leva em conta explicitamente este fato: « Tonelagem de minério que pode ser razoavelmente assumida de existir (requer indicação de acuracidade de medida) ». Desta forma, discrepâncias entre resultados previstos e resultados reais são inevitáveis.

Condições definidoras de reservas recuperáveis são de três tipos: (i) econômicas: diferentes teores de corte; (ii) tecnológicas: espessuras mínimas, métodos mineiros empregados e tamanho de bloco; (iii) qualidade e quantidade de informação. Para propósitos práticos, cada vez que uma dessas condições muda, o teor estimado e tonelagem destes depósitos também muda (David, 1977 p.302).

Enquanto os recursos *in situ* são determinados pelo ambiente geológico do depósito, as reservas recuperáveis dependerão não apenas dos recursos *in situ* e de suas características intrínsecas (variabilidade espacial dos atributos, controles geológicos atuantes, etc.) mas também, e essencialmente, do contexto técnico-econômico seletivo do projeto mineiro (Journel & Huijbregts, 1978 p.444-445), i.e., dos seguintes itens:

- (i) maximização de função-benefício ou suprimento de um mercado;
- (ii) teor de corte ou uma espessura minerável limitante;
- (iii) restrições tecnológicas de um projeto mineiro;
- (iv) suporte (tamanho e geometria) da unidade de seleção. No caso presente, o bloco de lavra 25m x 25m é significativamente diferente do suporte da unidade de exploração (testemunhos de sondagem);
- (v) informação disponível no momento da seleção. A seleção de blocos a serem minerados é feita em estimativas, porém a lavra é executada sobre valores reais. No caso das fábricas cerâmicas, a argila é recebida e processada com atributos de qualidade reais, não estimados. As simulações aqui realizadas fornecem uma infinidade de

cenários equiprováveis, quantificando probabilisticamente a incerteza nessas seleções.

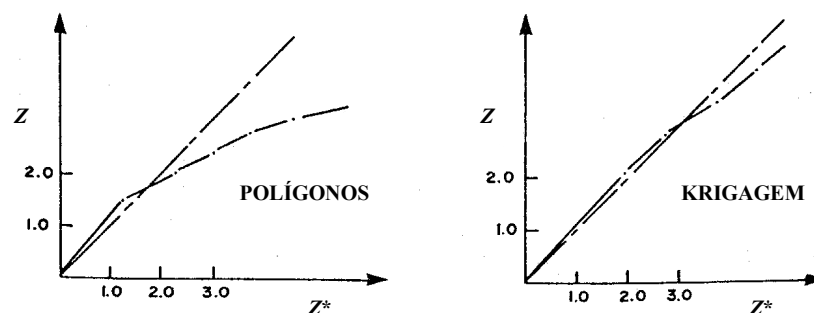
Os fatores suporte e nível de informação são expressos respectivamente pelas variâncias geoestatísticas de dispersão e de estimativa (=variância de krigagem). No primeiro caso, será visto mais adiante (item 4.3.3.1) que o « efeito suporte » será levado em consideração na presente avaliação de reservas recuperáveis, uma vez que o suporte mineiro considerado é o de blocos de lavra coincidentes com os usados na avaliação dos recursos geológicos (krigagem em blocos); portanto em volumes individuais significativamente maiores que os suportes originais amostrais quase-pontuais (testemunhos de sondagem a trado). Enquanto isso, ao invés de ser considerada a variância de krigagem como indicador da qualidade da estimativa e do provável erro envolvido, devido às limitações neste sentido listadas no final do capítulo precedente, será usada a variabilidade dos diferentes cenários equiprováveis gerados pela combinação das simulações.

O impacto de fatores técnico-financeiros na recuperação de recursos de um depósito, embora vitais na viabilidade econômica de um projeto, não será aqui considerado, por envolver aspectos fora do escopo deste trabalho, i.e., fora das influências do comportamento espacial das variáveis regionalizadas.

Na definição de reservas recuperáveis aplicando o método de krigagem em blocos, por um lado é levada em consideração a mudança de suporte na redução de variância e a correspondente diluição dos valores extremos quando se passa de um suporte quase-pontual para blocos de lavra. Soma-se a isto a minimização do erro médio de krigagem e a conseqüente acuracidade nas predições. Ainda, quanto maior o nível de informação amostral, menor é a variância de krigagem, e assim menor é a discrepância entre valores estimados, definidores das reservas recuperáveis, e valores reais, a serem minerados e processados (« efeito informação »).

A krigagem assegura não-tendenciosidade, enquanto a seleção desenvolvida em estimadores tipo polígono de influência é sujeita a séria superestimativa sistemática dos teores realmente recuperados (Journel &

Huijbregts, 1978 p.462). Tais discrepâncias aumentam com a seletividade, o que é particularmente perigoso durante um estudo de viabilidade. David (1977, p.303-304) exemplifica o perigo que se incorre ao estimar reservas recuperáveis a partir de teores pontuais de furos de sondagem, ao invés de considerar-se blocos. A Figura 4.1 (extraída de Marechal, 1976a, em David, 1977 p.309) mostra que o real teor médio da tonelagem acima de um dado teor de corte é bem mais próximo ao teor médio estimado desta mesma tonelagem quando blocos são estimados por krigagem em blocos, do que quando o método de polígonos de influência é usado. Isto é decorrência da desconsideração ao efeito suporte neste último caso. Sendo a variância dos blocos menor que a variância das amostras, há menos blocos ricos do que amostras ricas. Isso pode acarretar em fortes equívocos na análise das reservas recuperáveis, local e globalmente.

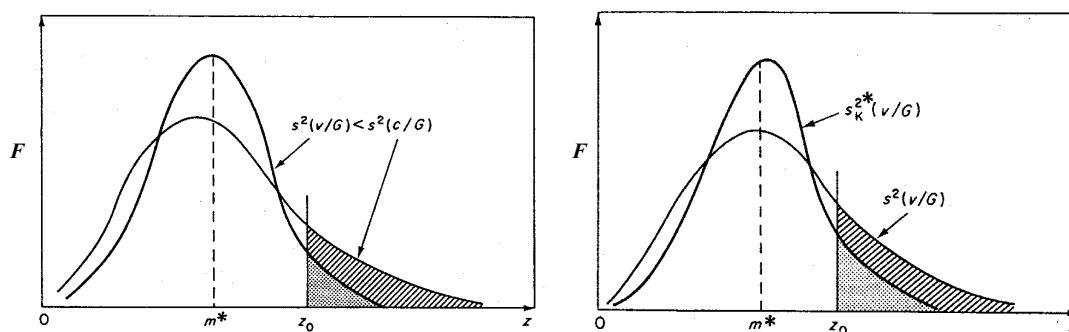


**Figura 4.1 - Comparativo do teor real  $Z$  x teor estimado  $Z^*$  para blocos, estimando pelos métodos de polígonos de influência (à esquerda) e krigagem (à direita). Extraído de Marechal (1976a), em David (1977, p.309).**

Por outro lado, como o algoritmo de krigagem ordinária em blocos prioriza a minimização do erro (variância de estimativa), fornecendo valores estimados ótimos neste sentido, a real variância dos valores e a incerteza (risco) a respeito deles acabam sendo subestimados, propiciando erros na classificação e quantificação local de reservas. No caso presente, erros na classificação cerâmica.

A Figura 4.2 demonstra graficamente o efeito dos dois fatores determinantes na recuperação dos recursos: efeito suporte e efeito informação. A influência do aumento de suporte de ponto para bloco com a redução da variância de dispersão é clara na Figura 4.2a, quando um teor de corte mínimo é aplicado. No caso desta figura, quando o um teor de corte é

maior que a média, a recuperação diminui ao considerar-se blocos ao invés de pontos. Isso mostra mais uma vez o perigo em superestimar reservas ao aplicar-se o método do polígono de influência, quando o valor pontual do furo de sondagem é atribuído ao bloco como um todo. O formalismo das funções de recuperação (curvas tonelagem X teor) e o impacto desses dois efeitos são abordados em Cruz Júnior & Remacre (2001).



**Figura 4.2 - Recuperações estimadas para um dado teor de corte  $z_0$  ( $F$  = freqüência): (a) influência do suporte [ $s^2(v/G)$  e  $s^2(c/G)$ ]: respectivamente variâncias de dispersão bloco/depósito e ponto/depósito]; (b) influência do padrão de informação [ $s_k^{2*}(v/G)$ ]: variância de dispersão dos blocos krigados no depósito  $G$ ]. Extraído de Journel & Huijbregts (1978, p.447 e 450).**

Os histogramas mostrados na Figura 4.2a referem-se aos teores reais da unidade  $c$  (ponto) e  $v$  (bloco). Porém, a seleção é feita nos teores estimados destas unidades, os quais inevitavelmente resultarão em uma recuperação diferente da recuperação baseada nos teores reais. A Figura 4.2b mostra o histograma dos teores reais das unidades  $v$  superimposto no histograma de seus valores estimados. Como a seleção atual é feita baseada nestes valores estimados, a proporção de unidades recuperáveis  $v$  acaba sendo lida no histograma dos teores estimados (área de pontos na Figura 4.2b), e não no histograma dos verdadeiros valores (área hachurada na Figura 4.2b), inexistente à época da avaliação pré-lavra.

No caso da krigagem, sendo por definição um estimador que minimiza a variância de estimativa, suavizando a variância real dos dados, pode acontecer que alguns blocos apresentando valores estimados próximos aos limites de algum dado teor de corte sejam equivocadamente classificados.



Nesse contexto se justifica a aplicação de simulações estocásticas na análise de reservas recuperáveis, fornecendo bloco-a-bloco vários valores possíveis para o atributo em estudo, proporcionado assim uma amplitude da variabilidade e da incerteza que tal predição pode conter. Assim, é obtido um modelo numérico do depósito, na verdade vários possíveis e equiprováveis modelos numéricos do depósito, contendo a mesma distribuição espacial de teores. As relações entre simulações estocásticas condicionais e a avaliação de reservas recuperáveis serão abordadas em maior detalhe no item 4.3.1. Aspectos teóricos da implementação propriamente dita dessas simulações serão apresentados no item 4.3.2 .

A influência das condições tecnológicas na análise de reservas recuperáveis, embora não sendo aqui aprofundada por envolver elementos de planejamento de lavra, portanto fora do escopo desse trabalho, merece ser mencionada. Nas considerações apresentadas nos parágrafos anteriores, assumiu-se que fosse possível recuperar todas as unidades de lavra com valores estimados dentro de um intervalo de interesse, ou acima de um dado teor de corte, independentemente da posição do bloco no domínio. Porém, isso na prática nem sempre é possível, pois a recuperação efetiva de uma unidade também depende de sua acessibilidade e do método mineiro proposto (Journel & Huijbregts, p.450). No caso do depósito em estudo, a região compreendida pelo tálus é um exemplo disto: apesar de em menor representatividade que nos outros subdomínios, os blocos classificados como biqueima aparecem em um número significativo, resultando em toneladas não desprezíveis de recursos de argila cerâmica deste tipo. Porém, sua distribuição fragmentada e descontínua, intercalando blocos mineralizados e estéreis, além de situar-se numa zona com residências, prejudica o acesso e as condições tecnológicas de extração, e portanto a lavra de tais blocos. Isso acontece em menor grau na zona de transição.

Desta forma, considerações como as discutidas acima podem definir uma primeira seleção grosseira de reservas recuperáveis, no caso descartando o subdomínio tálus. A partir disso, uma segunda seleção mais precisa pode ser feita, distinguindo estéril de minério no suporte de bloco de lavra. No estudo de caso presente isso é feito probabilisticamente, com a aplicação de simulações estocásticas no subdomínio planície.

#### **4.2.2 Reservas Recuperáveis na Extração de Argila Cerâmica**

As considerações feitas no item anterior sobre a análise de reservas recuperáveis como um todo, e todas as suas implicações na indústria mineira, adquirem características muito próprias e peculiares quando se trata da avaliação de reservas de minerais industriais usados como matéria-prima cerâmica. Sendo ainda mais específico, para o caso da argila cerâmica no depósito em estudo, alguns aspectos particulares, abordados abaixo, merecem o devido destaque no tocante à recuperação de reservas.

As duas variáveis de qualidade incluídas no presente estudo de caso possuem intervalos que enquadram a argila em um dos tipos cerâmicos existentes (Tabela 2.3) ou como estéril. Esse enquadramento é feito considerando-se as duas variáveis em conjunto, conforme abordado anteriormente. A análise de reservas recuperáveis para a área em estudo, apresentada no item 4.5 com a aplicação de simulações estocásticas, avalia as reservas segundo chances bloco-a-bloco de enquadramento em um ou em outro tipo de argila cerâmica, conferindo um caráter probabilístico à esta quantificação. Desta forma, pode-se também embutir neste estudo a análise de homogeneidade do material a ser minerado, tão importante nos processamentos cerâmicos conforme mencionado anteriormente.

Neste tipo de depósitos, é fundamental na quantificação de reservas recuperáveis a definição da espessura mínima seletivamente minerável, não contaminando com estéril de cobertura (solo orgânico) e com o leito rochoso sotoposto (folhelho da lapa), e nem com níveis intercalados de limonita ou material mais arenoso. Essa espessura dependerá primordialmente do método e equipamento utilizado, mas também está bastante atrelada à experiência/competência do operador designado/disponível para a extração. Como este é um depósito relativamente pequeno e será minerado concomitantemente com outros, possivelmente de forma sazonal, as operações mineiras por ventura realizadas terão que se adequar à disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra no momento da lavra. Por isso é fundamental antever diferentes espessuras mínimas (=diferentes níveis de seletividade), para fazer-se projeções em cima de possíveis situações vindouras.

Fatores sócio-econômicos importantes na avaliação da viabilidade de recuperação de recursos geológicos incluem, entre outros: (i) situação de um dado bloco em relação a residências; (ii) tipo de aproveitamento dos terrenos abrangidos (e.g., atividades agro-pastoris); (iii) custo do terreno, sua disposição e forma; (iv) *royalties* a superficiários, (v) distância do depósito aos centros de consumo e custo de transporte (altamente favorável para a área em estudo). Porém neste trabalho, com exceção da relevância dada a tal tipo de aspectos no descarte da porção do depósito correspondente ao tálus, corroborando a má qualidade cerâmica média estimada para seus blocos, não entrou-se neste tipo de análise de viabilidade econômica.

### 4.3 Simulações Estocásticas

Simulação estocástica é o processo de construir alternativas e equiprováveis realizações das variáveis aleatórias componentes de um modelo de funções aleatórias (Deutsch & Journel, 1998 p.18). As realizações, geralmente dispostas segundo uma malha regular  $\{z^{(l)}(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in A\}$ ,  $l=1, \dots, L$ , representam  $L$  possíveis imagens da distribuição espacial dos valores do atributo  $z(\mathbf{u})$  ao longo do campo  $A$ , onde cada realização é denotada com o índice «  $l$  ». Cada uma das realizações, ou “imagens estocásticas”, devem refletir as propriedades impostas no modelo de função aleatória  $Z(\mathbf{u})$ . Portanto, quanto mais propriedades forem inferidas dos dados amostrais e incorporadas no modelo de função aleatória  $Z(\mathbf{u})$ , tanto melhor será este modelo.

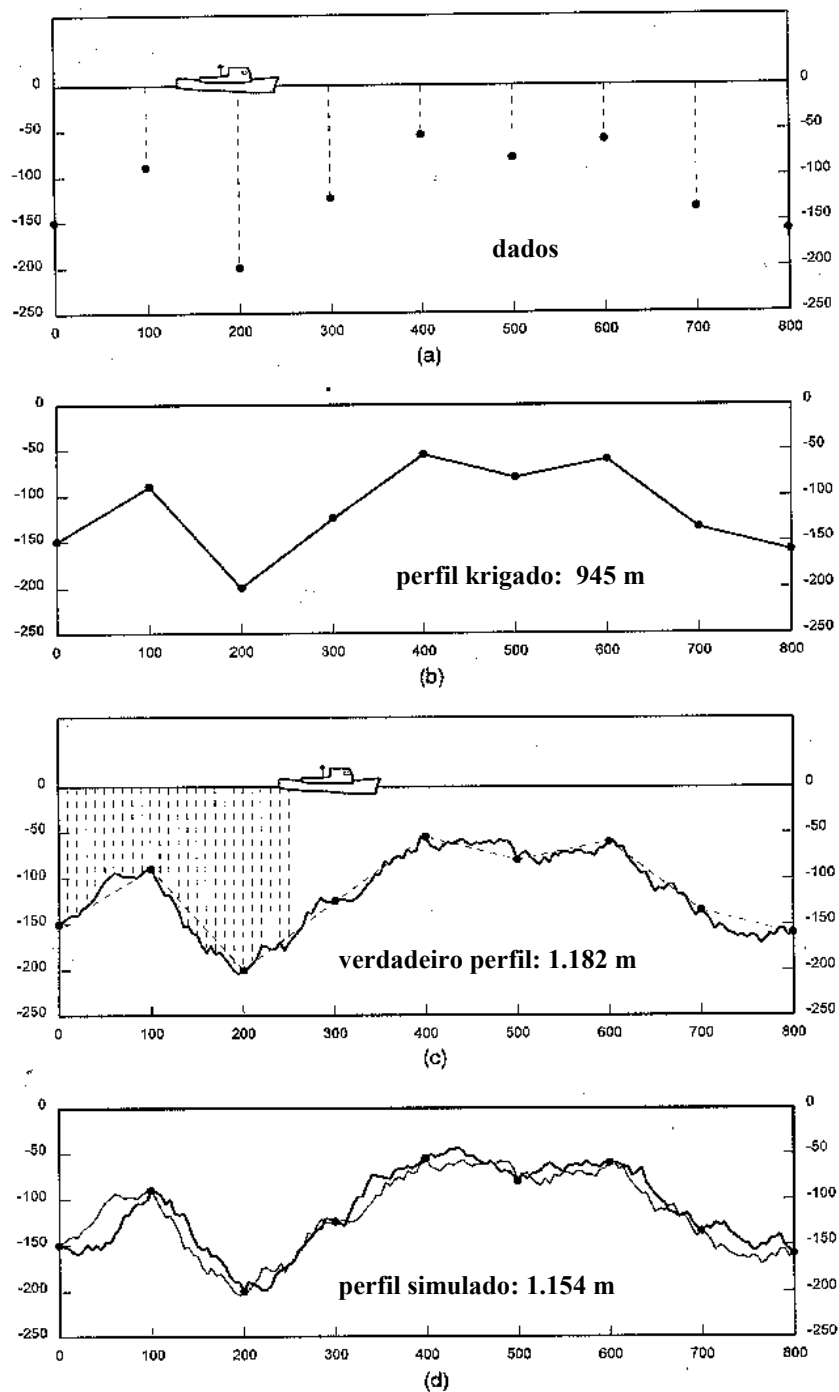
Segundo Chilès & Delfiner (1999, p.452), uma função aleatória tem um número infinito de realizações, entre as quais as simulações condicionais, que assumem nos pontos amostrais os mesmos valores que aqueles observados. Esse condicionamento confere uma certa robustez às simulações (Journel & Huijbregts, 1978 p.493), que podem assim serem consideradas como possíveis representações da variável regionalizada  $z(x)$ . Essas múltiplas superfícies simuladas para os mesmos dados e momentos estatísticos de até 2ª ordem - média e covariância/variograma - contrastam desta forma com a superfície de krigagem, única (Olea, 1991 p.71). Neste

sentido, a simulação é vantajosa em relação à krigagem quando um modelo de variabilidade é mais importante que a acuracidade na escala local.

As  $n$  realizações equiprováveis  $z_s(x)$  diferirão ponto-a-ponto (ou bloco-a-bloco) da realização real  $z(x)$ , mas, estatisticamente no conjunto global, mostrarão a mesma estrutura de variabilidade ou mesma estatística espacial, i.e., mesmos histogramas e variogramas (Journel & Huijbregts, 1978 p.17). Essas diferentes realizações podem ser assim vistas como possíveis cenários do mesmo fenômeno caracterizado pela função aleatória  $Z(x)$ . As realizações simuladas, entretanto, tem a vantagem de serem conhecidos todos os pontos e não apenas os pontos amostrais. Estes depósitos simulados são também chamados “modelos numéricos” do depósito real (Journel & Huijbregts, 1978 p.492). A série de realizações fornece uma medida visual e quantitativa (na verdade um modelo) de incerteza espacial (Goovaerts, 1997 p.372).

A diferença básica intuitiva entre modelos de estimativa por krigagem e modelos gerados por simulação é ilustrada de forma clara através de um exemplo por Chilès & Delfiner (1999, p.449). Um cabo submarino deve ser colocado entre duas cidades situadas em lados opostos de um oceano, e o problema é prever o comprimento do cabo. Medidas da profundidade do fundo oceânico são disponíveis a cada 100 m. Para conseguir a solução exata, seria necessário um levantamento contínuo ou no mínimo muito denso (e.g., a cada 10 m). Para evitar os custos deste levantamento detalhado, a idéia é introduzir um modelo simulado. A Figura 4.3 ilustra o caso.

Uma simulação condicional, no caso da Figura 4.3, compreende uma representação do fenômeno que seja consistente com os dados observados nos intervalos de amostragem espaçados de 100 m, a exemplo da krigagem, e que adicionalmente reproduza as flutuações locais numa escala de 10 m. Uma simulação condicional não é assim a realidade, mas apenas uma possível versão dela, entre uma infinidade de outras.



**Figura 4.3 - Exemplo ilustrativo de cabo submarino: (a) levantamento do fundo oceânico com espaçamento amostral de 100 m; (b) krigagem do fundo oceânico; (c) levantamento contínuo (verdadeiro perfil); (d) simulação condicional baseada em dados amostrais espaçados de 100 m, comparada com verdadeiro perfil. Extraído de Alfaro (1979), em Chilès & Delfiner (1999 p.450).**

No caso do exemplo citado acima, não se pode estimar o comprimento  $L$  diretamente, por que a krigagem - na sua versão linear - apenas permite a estimativa de quantidades que são lineares na variável estudada, como profundidade média ao longo do perfil. O comprimento  $L$  não é uma função linear, dependendo essencialmente das flutuações locais do fundo oceânico. Como neste caso é muito mais importante saber o grau de flutuações do que as profundidades propriamente ditas, a simulação resultou em um comprimento bem mais próximo da realidade, sendo portanto a sua aplicação mais adequada. A krigagem, sendo um interpolador que minimiza a variância de dispersão, neste caso resultou num comprimento suavizado, fugindo portanto do propósito desta estimativa.

Uma analogia deste exemplo pode ser feita com a atividade de pesquisa e lavra mineral associada à indústria cerâmica. Além de valores acuradamente estimados fornecidos por krigagem, devido à exigência de homogeneidade nas fábricas é fundamental ter acesso ao grau de variabilidade que tais predições podem comportar. Em outras palavras, deve ser investigado que chances tem o valor de um bloco de ser acima de um determinado valor ou dentro de um determinado intervalo, para um dado atributo. Isto pode ser efetuado através da aplicação de um número razoavelmente grande de realizações obtidas por simulações estocásticas, como será visto adiante neste capítulo.

A partir do exemplo intuitivo apresentado acima, pode-se discutir mais sistematicamente as diferenças entre simulações e estimativas, que fundamentam-se nos objetivos de cada tipo de predição (Journel & Huijbregts, 1978 p.493). O objeto de uma estimativa é prover, a cada ponto  $x$ , um estimador  $z^*(x)$  que seja o mais próximo possível do verdadeiro teor desconhecido  $z_o(x)$ , de forma não-tendenciosa e com o mínimo erro médio quadrático, ou variância de estimativa  $E[Z(x)-Z^*(x)]^2$ . Assim, por construção, este estimador não reproduz a variabilidade espacial dos verdadeiros teores  $[z_o(x)]$ . No caso da krigagem, a minimização da variância de estimativa envolve uma suavização das dispersões reais. O método de polígono de influência acentua esta subestimativa da variabilidade local dos teores reais, considerando constante o teor em todo o polígono de influência de uma amostra. O depósito estimado  $[z^*(x)]$ , é, portanto, tendencioso no tocante às

dispersões dos teores reais  $[z_o(x)]$ . De forma típica, valores baixos são superestimados, enquanto valores altos são subestimados. Além disso, a suavização da krigagem não é uniforme, sendo mínima próxima aos dados e aumentando ao distanciar-se destes.

Por outro lado a simulação, especialmente a simulação condicional, reproduz as principais características de dispersão destes teores reais  $[z_o(x)]$ , com os mesmos momentos (média e variograma). Essa reprodução de momentos é prioritária sobre a acuracidade local (Deutsch & Journel, 1998 p.120). Diferentemente da krigagem, a cada ponto  $x$  o valor simulado não corresponde à estimativa ótima de  $z_o(x)$ , no sentido de menor erro possível (acuracidade). A reprodução de mecanismos genéticos que geram os fenômenos observados não constitui o objetivo das simulações, e sim, mais modesta e realisticamente, apresentar versões possíveis de suas variações espaciais (Chilès & Delfiner, 1999 p.453).

Mapas produzidos pelo algoritmo de krigagem, os quais na verdade constituem médias ponderadas móveis dos dados amostrais originais (Deutsch & Journel, 1998 p.18), apresentam um típico efeito suavizador, denotando assim uma menor variabilidade espacial que os dados. Por outro lado, os mapas condicionalmente simulados são mais apropriados para estudos sensíveis a padrões de variabilidade local, como a presente análise de reservas recuperáveis. Uma seqüência de mapas de simulação condicional pode prover uma medida (modelo) de incerteza sobre a distribuição espacial do atributo em estudo.

Com exceção da hipótese de um modelo Gaussiano de erros ser assumido, a krigagem fornece apenas uma medida incompleta de acuracidade local, e nenhuma apreciação da acuracidade conjunta quando muitas locações são consideradas juntas (Deutsch & Journel, 1998 p.120). As simulações podem prover tais medidas de acuracidade, tanto a nível local quanto global. Estas medidas são dadas pelas diferenças entre  $L$  valores simulados alternativos a qualquer locação (acuracidade local) ou os  $L$  campos simulados alternativos (acuracidade global ou conjunta).

A suavização da krigagem reflete-se diretamente na apreciação dos variogramas gerados. O variograma experimental de estimativas é diferente do variograma experimental das amostras, com um *sill* menor e um alcance

maior, implicando numa continuidade espacial exagerada para os valores estimados (Olea, 1999 p.141). O reflexo desta suavização aparece também nos histogramas: os valores estimados tem menos valores nas extremidades e uma proporção muito maior mais proximamente à média, em relação aos dados originais.

Os objetivos da simulação e estimativa são bem distintos, normalmente incompatíveis. Pode ser visto na Figura 4.3c que, mesmo a curva estimada sendo em média próxima à curva real, a curva de simulação, apresentada em (d), é a melhor reprodução das flutuações da curva real. No contexto mineiro, incluindo matérias-primas cerâmicas, a curva de estimativa é preferível para local e estimar reservas *in situ*, enquanto que a curva de simulação é preferível para estudar a dispersão das características destas reservas (Journel & Huijbregts, 1978 p.494). Portanto, as simulações são adequadas para medir probabilisticamente o grau de dispersão de reservas recuperáveis e, em relação a valores de referência (« *cut-offs* »), as chances de serem recuperáveis ou não, local e globalmente. Este tipo de aplicações será aqui empregado.

As discrepâncias maiores identificadas nos extremos direito e esquerdo dos perfis da Figura 4.3d demonstram porque uma simulação não pode ser usada para substituir amostragem, a qual é sempre necessária para uma boa estimativa local do depósito. Quanto maior o conhecimento do depósito (maior a densidade de amostragem), mais bem conhecida será sua estrutura de variabilidade, resultando numa simulação mais próxima e mais representativa da realidade (« efeito informação »).

Os requisitos típicos para a aceitação de mapas simulados como representativos do depósito em estudo são (Goovaerts, 1997 p.370):

- valores amostrais devem ser honrados nas suas locações (simulações condicionais);
- histograma dos valores simulados deve reproduzir aproximadamente o histograma amostral desagrupado;
- modelo de covariância  $C(h)$  ou semivariograma  $\gamma(h)$  deve ser reproduzido ergodicamente.



Chilès & Delfiner (1999, p.460-461) apresentam os vários métodos de simulação condicional existentes, os quais são listados abaixo:

- simulação seqüencial Gaussiana;
- matriz de decomposição da covariância (decomposição LU);
- método das bandas rotativas (*turning bands*);
- método autoregressivo;
- janelas móveis;
- método da diluição;
- método espectral contínuo;
- método espectral discreto;
- hiperplanos de Poisson;
- método da integração;
- simulação seqüencial dos indicadores;
- método de truncagem gaussiana;
- método de Voronoi;
- método de poliedros de Poisson;
- método da substituição;
- simulação booleana;
- *simulated annealing*.

O método aqui empregado, conforme será visto ao longo deste capítulo, é o da simulação seqüencial Gaussiana (ssG). Maiores detalhes sobre aspectos teóricos sobre simulações estocásticas condicionais em geral podem ser encontrados em David (1977, p.325-327), Journel & Huijbregts (1978, p.494-498) e Deutsch & Journel (1998, p.119-124).

#### **4.3.1 Uso de Simulações em Reservas Recuperáveis**

Depósitos simulados podem ser usados para vários propósitos na indústria mineira, dependendo de cada projeto mineiro particular. Desta

forma, teores, espessuras e geometria de uma jazida podem ser simulados, medindo o grau de variabilidade/incerteza de cada aspecto em particular.

Simulações foram inicialmente motivadas pelo estudo de depósitos minerais [Journel (1973, 1974a, 1974b), em Chilès & Delfiner, 1999 p.577]. Conforme discutido anteriormente, a krigagem ordinária permite estimar recursos geológicos (*in situ*) mas não avaliar adequadamente reservas recuperáveis, fundamentais em estudos de viabilidade. A dificuldade em avaliar reservas recuperáveis está relacionada ao fato de que este conceito envolve o método de mineração, seu grau de seletividade, sua flexibilidade, nenhum dos quais pode ser reduzido a operações lineares, e também ao fato de que o resultado depende fortemente das flutuações locais da mineralização (Chilès & Delfiner, 1999 p.578).

Segundo Journel & Huijbregts (1978, p.491), estimativas locais e globais de reservas recuperáveis na maior parte dos casos mostram-se insuficientes no estágio de planejamento de uma nova mina ou uma nova frente de lavra. Normalmente é essencial, além de estimar teores e tonelagens recuperáveis, predizer também as variações das características das reservas recuperáveis nos vários estágios de operação.

No caso da mineração de argila para a indústria cerâmica, as etapas de prospecção, pesquisa mineral, avaliação de reservas, lavra e processamento industrial são muito próximas e interdependentes. É então essencial para o técnico que conduz as pesquisas e avalia reservas, ser capaz de antecipar as variações das matérias-primas ao responsável pela formulação das massas a serem utilizadas nas fábricas. Esse técnico deve também estar apto a orientar a lavra da maneira mais racional e segura possível, alertando ao gerente para os riscos envolvidos na tomada de decisões quanto aquele determinado depósito.

Além de testar seqüenciamento de lavra em diferentes orientações, incluindo a definição de tamanho ótimo de bloco, simulações podem ajudar a antever desvios do planejamento (David, 1977 p.324), a nível local e global. Aliado a orientações no planejamento mineiro, as simulações podem ser usadas eficientemente para orientar também a locação de amostras adicionais. Exemplos recentes de aplicações neste sentido são encontrados respectivamente em Bonato (2000) e Pilger (2000).

Aplicações de simulações condicionais em avaliações de reservas tem numerosos exemplos na literatura. Seu uso específico na análise de reservas recuperáveis vem se incrementando nos últimos anos; alguns exemplos são mencionados no item 1.1. Um exemplo recente do uso de simulações e co-simulações nesse tipo de análise pode ser visto em Silva (2001).

O uso de simulações condicionais na análise de incerteza na predição de teores em termos de reservas mineráveis é discutido sob vários aspectos em Rossi & Alvarado (1998). Diferentes e equiprováveis modelos de blocos podem ser gerados, fornecendo uma série de possíveis teores para cada bloco. Neste trabalho citado é enaltecida a importância de se obter as simulações utilizando-se dados de uma mesma população, em um mesmo domínio geológico, gerando cenários de alta resolução (malha muito fina), em limites geológicos coincidentes com aqueles usados no modelo de blocos de recursos geológicos. É também enfatizada a relevância da disponibilidade de modelos de blocos alternativos (=imagens equiprováveis da distribuição de valores do atributo em estudo), gerados por simulações estocásticas, na tomada de decisões mineiras em geral. O reconhecimento e quantificação realistas de riscos envolvidos (modelos de incerteza) podem ser muito úteis na indústria mineira em cálculos de reservas recuperáveis, entre outras utilizações (Rossi, 1999). Tais aspectos foram cuidadosamente observados nas simulações apresentadas na presente dissertação.

Simulações condicionais estocásticas da espessura do horizonte argiloso de interesse e das acumulações das variáveis de qualidade (indiretamente das variáveis de qualidade propriamente ditas) constituem no presente trabalho a chave para a análise de reservas recuperáveis. Cinquenta possíveis e equiprováveis modelos de blocos de alta resolução (mesmo suporte amostral) foram gerados para cada variável, possibilitando a análise probabilística bloco-a-bloco e globalmente de toda a gama de possibilidades em reservas recuperáveis, sob critérios de seletividade mineira (espessura mínima minerável) e de qualidade cerâmica.

Goovaerts (1997, p.442) sintetiza o espírito empenhado nessa dissertação no tocante à aplicação de simulações condicionais na avaliação de reservas recuperáveis. A incerteza reconhecida não é inerente ao fenômeno sob estudo, sendo muito mais um fruto da imperfeição do

conhecimento deste. Ao contrário da variância de krigagem, dependente estritamente da densidade e disposição dos dados, a incerteza quantificada é diretamente dependente dos dados propriamente ditos. Além disso, essa incerteza reflete decisões pessoais de modelização, as quais exprimem o conceito *a priori* sobre o fenômeno. Resta aceitar e assumir essa limitação e a falta de objetividade determinística nos modelos e medidas de incerteza gerados, documentando de forma clara e embasada todos os aspectos relevantes do modelo. Com tal postura realista, a presente análise de reservas recuperáveis é empreendida.

#### **4.3.2 Simulação Seqüencial Gaussiana**

Os itens precedentes desse capítulo introduziram algumas das diversas facetas que envolvem a análise de reservas recuperáveis e seus reflexos nas decisões mineiras. Os princípios das simulações condicionais, diferenças estruturais e nos objetivos em relação a estimativas por krigagem e aplicações na avaliação de reservas recuperáveis foram a seguir apresentados. Foram listados ainda os tipos de métodos de simulação estocástica usados em geoestatística. Uma síntese neste sentido é apresentada em Costa (1997, p.130-132) que revisa, numa perspectiva histórico-evolutiva, o desenvolvimento de diferentes métodos de simulação condicional, a partir do trabalho pioneiro de Journel (1974), enfocando os algoritmos denominados seqüenciais.

De acordo com Deutsch & Journel (1998, p.125), o princípio da simulação seqüencial é uma generalização da idéia de derivar um valor de uma variável aleatória  $Z(u)$  de sua distribuição condicional de frequência acumulada local, a partir da relação de covariância/variograma dos valores amostrais próximos, incluindo os dados originais e aqueles previamente simulados. Um maior detalhamento das características deste método é apresentado no Apêndice E.

Como a normalização dos dados é uma etapa necessária para gerar funções de probabilidade cumulativa condicional local numa ótica multiGaussiana, aplicando posteriormente tais funções no método de

simulação seqüencial Gaussiana aqui utilizado, o conjunto das três variáveis regionalizadas em estudo (espessura e acumulações) foram transformados para o espaço Gaussiano, i.e., normalizados. As transformações para cada valor amostral e testes para checar a Gaussianidade desses dados são apresentados no Apêndice F.

Os dados normalizados foram utilizados nas simulações realizadas, resultando em valores simulados no espaço Gaussiano que foram posteriormente retro-transformados para o espaço original, utilizando as mesmas leis de correlação da normalização inicial, porém no sentido inverso.

Além dessa normalidade da distribuição univariada, é necessário checar a normalidade de distribuições bivariadas, tri-variadas,..., n-variadas dos dados normalizados, para assegurar que uma função aleatória é multiGaussiana. De fato, só se tem como verificar até o nível bivariado (distribuição biGaussiana). Na prática portanto, se testes neste sentido (Costa, 1997 p.319-327, Goovaerts, 1997 p.271-275 e Deutsch & Journel, 1998 p.142-144) não invalidarem a hipótese biGaussiana, o formalismo multiGaussiano é adotado. Os testes para as variáveis em estudo normalizadas são apresentados no Apêndice G.

A seqüência a seguir é o procedimento básico para gerar cada uma das realizações globais de um atributo por ssG (adaptado de Olea, 1999 p.146, e Deutsch & Journel, 1998 p.144-145). Existem muitas variações em torno das linhas centrais apontadas pelo autores referidos; a seqüência de etapas apresentada a seguir foi aquela efetivamente adotada nas simulações realizadas no presente estudo de caso:

- (i) determinação da função de distribuição cumulativa univariada dos dados originais, i.e., seu histograma. Técnicas de desagrupamento são necessárias quando a amostragem é mais densa em alguns locais que em outros, como no presente estudo de caso (item 3.2.2.2);
- (ii) transformação dos dados para obter escores normais (normalização), resultando em uma função Gaussiana de distribuição cumulativa univariada  $N(0,1)$ ;
- (iii) testes de biGaussianidade para os dados normalizados;
- (iv) modelamento variográfico para os dados normalizados;

- (v) criação de uma malha de alta resolução (1m x 1m), coincidindo os nós da malha regular original de amostragem com alguns nós da malha de simulação;
- (vi) escolha aleatória da locação  $x_i$  do nó para a geração de um valor simulado;
- (vii) krigagem simples para obter a estimativa  $z^*(x_i)$  e a variância de krigagem  $\sigma^2(x_i)$ , condicionada à uma amostragem expandida que englobe, além de dados vizinhos amostrais, dados já simulados;
- (viii) definição de uma distribuição normal local com média  $z^*(x_0)$  e variância  $\sigma_{KS}^2(x_0)$ :  $N[z^*(x_0), \sigma_{KS}^2(x_0)]$ , onde  $\sigma_{KS}^2$  = variância de krigagem simples. O valor simulado  $z_s(x_0)$  é então gerado randomicamente (via método de Monte-Carlo) a partir desta distribuição normal local;
- (ix) adição de  $z_s(x_0)$  para a amostragem expandida (dados originais + dados previamente simulados);
- (x) retomada dos passos anteriores [(vi) em diante], até preencher todos os nós da malha de simulação com valores simulados;
- (xi) retro-transformação dos valores simulados do espaço Gaussiano para o espaço original. Extrapolações das classes extremas e interpolações das classes intermediárias são usualmente utilizadas (Deutsch & Journel, 1998 pp.134-138). No caso presente, truncou-se o intervalo de valores simulados de acordo com os extremos amostrais, não havendo portanto extrapolações.

A implementação adequada garante aplicações bem sucedidas, com algumas técnicas discutidas em Goovaerts, (1997, p.378-379) e aqui aplicadas. Estratégias de busca foram cuidadosamente investigadas para cada uma das três variáveis, definindo o tamanho ótimo da elipse de acordo com os alcances de cada variável, em cada direção considerada. O balanço adequado entre o número de dados simulados e os originais foi também considerado, dando uma significativa maior importância aos últimos, no intuito de favorecer a proximidade dos histogramas e variogramas das realizações com os amostrais. O uso de malhas múltiplas de busca contribuiu

na reprodução de todas as regiões da curva do modelo variográfico [conceito de malha múltipla (*multiple grid*), Gómez-Hernández, 1991 e Gómez-Hernández & Journel, 1993, ambos em Deutsch & Journel, 1998 p.127].

Um maior aprofundamento teórico-aplicacional da ssG e métodos de simulação seqüencial em geral pode ser encontrado em Goovaerts (1997, p.380-385), Deutsch & Journel (1998, p.125-146) e Chilès & Delfiner (1999, p.462-464).

### 4.3.3 Simulações no Subdomínio Planície

No item precedente, foi apresentado o algoritmo de simulação seqüencial Gaussiana (ssG), utilizado nessa dissertação para o estudo de variabilidade da argila cerâmica no depósito em estudo, com aplicação dos resultados advindos no dimensionamento de reservas recuperáveis e riscos envolvidos. O banco de dados em estudo, apresentado ao longo do item 3.2.2, com as três variáveis regionalizadas de interesse - espessura e acumulações - constituiu objeto de simulações aplicando este algoritmo, nos limites do subdomínio planície, conforme discutido no final do Capítulo 3. A seqüência de operações executadas é a seguir descrita. É importante lembrar que, a exemplo da avaliação de recursos geológicos por krigagem em blocos, as variáveis de qualidade foram aqui simuladas de forma indireta: (i) simulação de acumulações e espessura em separado, em suporte quase-pontual (blocos 1m x 1m); (ii) mudança de suporte para blocos (item 4.3.3.1); (iii) divisão dos resultados simulados de cada acumulação pela espessura simulada correspondente, obtendo os valores simulados para cada respectiva variável original de interesse, no suporte de bloco.

Seguindo a seqüência do algoritmo aplicado, conforme abordado anteriormente, foram computados e modelados os variogramas dos dados normalizados para as três variáveis. Suas formas, direções de máxima e mínima continuidade, e alcances resultaram semelhantes aos modelos variográficos das variáveis originais respectivas. Em função disto tais modelos não são aqui apresentados.

Uma malha de resolução fina foi gerada, cobrindo a área integralmente em blocos 1m x 1m, distribuída numa área de 800m x 700m e contendo assim um total de 560.000 nós. O tamanho dos pequenos blocos foi definido com essas dimensões assumindo que sejam representativos das amostras originais quase-pontuais, i.e., que a redução de variância de dispersão nesta aproximação sejam ínfima. Isso garante com que as simulações sejam geradas diretamente com o mesmo suporte amostral, prevenindo contra distorções decorrentes de alteração de variância e variogramas em função de correção de suporte, abordadas anteriormente. O processo de mudança para o suporte de interesse (blocos 25m x 25m), suas implicações e resultados decorrentes, serão abordados no item a seguir.

#### **4.3.3.1 Mudança de Suporte *a posteriori***

Todas as diferenças e implicações observadas no Capítulo 3 entre o suporte de pontos e o suporte de blocos, no que tange à variância de dispersão, podem ser estendidas para as simulações estocásticas. O presente interesse é verificar a variabilidade da argila em escala de blocos de lavra, e seu impacto na quantificação e classificação cerâmica de suas reservas recuperáveis, na mesma malha usada na caracterização de recursos geológicos via krigagem ordinária em blocos. Para tal, é necessário um adequado processo de mudança de suporte, pois a informação amostral, conforme colocado anteriormente, é quase-pontual.

A especificação completa do volume de um dado suporte compreende seu tamanho, forma geométrica e orientação. Qualquer mudança em algum desses itens implica numa nova variável regionalizada. Desta forma, o suporte considerado pode corresponder desde um ponto até o depósito inteiro. Os conceitos de suporte e de efeito suporte são assim fundamentais no tratamento geoestatístico de qualquer variável regionalizada. Embora não faça parte da simulação em si, a mudança de suporte é um passo estritamente necessário para a abordagem da variância no estudo de variabilidade em geral.



O efeito suporte está relacionado à influência do tamanho do suporte nos valores médios da variável regionalizada. Um aumento de suporte resulta em algumas conseqüências imediatas: (i) média global permanece constante; (ii) variância de dispersão diminui; (iii) variância *a priori* (*sill* nos variogramas) diminui: quanto maior o suporte, menor o valor de variograma para um mesmo *lag*; (iv) distribuição (histograma) fica mais simétrica, como conseqüência do teorema do limite central (Isaaks & Srivastava, 1989, Cap.19). Um impacto direto dessa influência do aumento do suporte, em termos de mineração, é que numa lavra seletiva um bloco de maior tamanho resultará em menores flutuações nos teores médios. Além disso, as curvas de parametrização tendem a se degradar ao aumento do suporte (Matheron, 1984). Algumas importantes implicações do efeito de diferentes suportes na recuperação de recursos geológicos foram já abordadas no item 4.2.1.

O conceito de variância de dispersão, e todas as diferenças e relações mútuas entre as variâncias ponto-depósito, ponto-bloco, e bloco-bloco (a soma das duas últimas sendo igual à primeira, correspondendo à chamada « relação de Krige ») são largamente abordadas em Isaaks & Srivastava (1989, Cap.19). Existem alguns métodos tradicionalmente usados para correção de suporte, os quais se baseiam numa estimativa do fator *f* de redução da variância. Rivoirard (1994, Caps. 10-12) discute modelos de mudança de suporte e seus impactos em estimativas globais e locais de reservas recuperáveis.

No presente estudo de caso, optou-se pela mudança de suporte *a posteriori*: executar todo o processo de simulação e validações no « mesmo » suporte amostral (conforme discutido anteriormente) e proceder a mudança para o suporte de bloco depois. Esse processo indireto de simulação em blocos está fundamentado em Journel & Huijbregts (1978, p.511-513) e sumarizado abaixo.

A alternativa aqui aplicada para obter valores simulados de blocos consiste na simulação de valores quase-pontuais  $z_{sc}(x)$  em uma malha muito densa (1m x 1m) e então aplicar o método da média móvel de todos os pontos simulados que estejam incluídos em um bloco 25m x 25m. Isso resulta numa aproximação da simulação condicional direta de teores de

blocos  $z_{v,sc}(x)$ . Como a simulação de pontos  $z_{sc}(x)$  é condicional aos dados  $z_o$ , a simulação em blocos será por extensão condicionada aos mesmos dados.

O bloco é aproximado por  $n$  pontos interiores ( $x_i, i = 1$  a  $n$ ), e o verdadeiro valor do atributo de interesse do bloco  $v$ , obtido pela Equação 4.1,

$$Z_v(x) = \frac{1}{v} \int_{v(x)} Z(y) dy \quad (4.1)$$

é aproximado pela média aritmética com os  $n$  valores dos pontos interiores de discretização do bloco, conforme Equação 4.2:

$$Z_v^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i) \quad (4.2)$$

Desta forma, é a média aritmética que é simulada. Assume-se aqui que a densidade de discretização do bloco  $v$ , 625 blocos 1m x 1m interiores em um bloco 25m x 25m, seja grande o suficiente para aceitar-se a aproximação da Equação 4.1 pela Equação 4.2, considerando desta forma a função estrutural (covariância  $C_v(h)$  ou semivariograma  $\gamma_v(h)$ ) que caracterize a variabilidade espacial do suporte  $v$ .

Este método de simular blocos por janelas móveis de « pontos » (=pequenos blocos) pré-simulados apresenta fortes vantagens:

- (i) permite uma simulação simultânea de valores do atributo em blocos e em amostras interiores;
- (ii) não há nenhuma necessidade de assumir premissas sobre a variabilidade estrutural da distribuição univariada da FR regularizada  $Z_v(x)$ . A simulação como um todo é baseada apenas na informação disponível, i.e., a informação obtida das amostras;
- (iii) a partir da simulação no suporte quase-pontual, a geração de uma simulação para um novo tamanho de blocos, ou mesmo para blocos de dimensão variável, é obtida diretamente (Chilès & Delfiner, 1999 p.572). No caso da indústria cerâmica, tal fator mostra-se importante na medida em que esporadicamente há uma variação na dimensão

dos lotes de argila a serem processados nas fábricas, aliado a seu consumo irregular/sazonal e à necessidade de formação de estoque, em condições freqüentemente variáveis ao longo do tempo.

A desvantagem do método é o tempo computacional envolvido e o tamanho dos arquivos gerados. Tal fator, entretanto, torna-se de importância secundária com o uso crescente de equipamentos mais poderosos em termos de desempenho computacional, incluindo a utilização de *workstations*.

Os resultados das simulações executadas são apresentados a seguir separadamente para cada variável regionalizada considerada, no suporte quase-pontual 1m x 1m e no suporte final de blocos (25m x 25m). Para a geração de modelos estocásticos a partir das simulações originais propriamente ditas no suporte quase-pontual, todos os passos iniciais mencionados neste e nos itens precedentes [normalização dos dados:  $N(0,1)$ ; verificação da biGaussianidade assumindo multiGaussianidade; modelamento variográfico dos dados normalizados; definição da estratégia de busca e dos parâmetros ótimos de simulação] foram realizados para as três variáveis regionalizadas em estudo. Desta forma, a implementação de todas as simulações realizadas seguiu rigorosamente toda a fundamentação teórica desenvolvida até aqui neste capítulo.

#### **4.3.3.2 Número de Realizações Obtidas**

Quando simulações estocásticas são geradas para avaliação de variabilidade de um dado atributo, uma questão que imediatamente emerge é: quantas realizações são necessárias? Segundo Chilès & Delfiner (1999, p.453), a resposta depende dos objetivos que se tem em mente e da estrutura do fenômeno. Segundo Rossi (1999), o número de simulações necessárias está atrelado: (i) à variabilidade do atributo analisado; (ii) à quantidade de dados disponíveis condicionantes.

Uma propriedade de crucial importância tanto na definição do número de realizações, quanto nas validações das simulações (como será visto adiante) é a ergodicidade dos modelos das funções aleatórias das variáveis

regionalizadas de interesse. Na definição de Chilès & Delfiner (1999, p.19-21), uma função aleatória estacionária  $EZ(x, \omega)$  é ergódica para a média ( $\omega$  sendo o evento aleatório indexando a realização), i.e., ergodicidade de primeira ordem, se a média espacial de  $EZ(x, \omega)$  sobre um domínio  $V \subset \mathfrak{R}^n$  convergir para o valor esperado  $m = EZ(x, \omega)$  quando  $V$  tende ao infinito, conforme Equação 4.3:

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{|V|} \int_V Z(x, \omega) dx = m(\omega) \quad (4.3)$$

onde  $|V|$  é o volume do domínio  $V$ , e o valor de convergência da média  $m(\omega)$  representa uma variável aleatória, não uma constante.

Segundo Deutsch & Journel (1998, p. 128), a noção de ergodicidade pode ser estendida a qualquer outro parâmetro do modelo, como por exemplo o valor da função de densidade de probabilidade cumulativa para um dado valor de referência (« *cut-off* ») ou o modelo de covariância  $C(h)$ . A ergodicidade na covariância, ou ergodicidade de segunda ordem (Chilès & Delfiner, 1999 p.21), segue a mesma linha de raciocínio anterior, e pode ser representada pela Equação 4.4:

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{|V|} \int_V [C(h)] dh = 0 \quad (4.4)$$

Discussões mais aprofundadas sobre questões de ergodicidade podem ser encontradas em Deutsch & Journel (1998, p.128-134) e Chilès & Delfiner (1999, p.19-22).

No caso presente, como se tinha interesse em visualizar situações extremas, um número razoavelmente grande de realizações seria necessário. Cinquenta simulações foram então processadas para cada uma das três variáveis regionalizadas, começando com poucas realizações e adicionando-as progressivamente até que as variâncias condicionais e médias bloco-a-bloco (*E-type*) estabilizassem. O Apêndice H ilustra com gráficos de dispersão e mapas porque limitou-se o número de realizações em 50: as já

poucas diferenças do universo de variabilidade quando comparados os resultados médios de 10 para 20 realizações praticamente desaparecem quando se passa de 20 para 50 realizações, considerando-se a escala de blocos 25m x 25m. Essa grande convergência é ainda mais evidente quando se considera apenas os blocos limitados ao envelope definido pela planície. O Apêndice I apresenta flutuações ergódicas de pequena escala, observadas nas validações das simulações realizadas, corroborando a convergência discutida acima.

#### **4.3.3.3 Espessura de Argila**

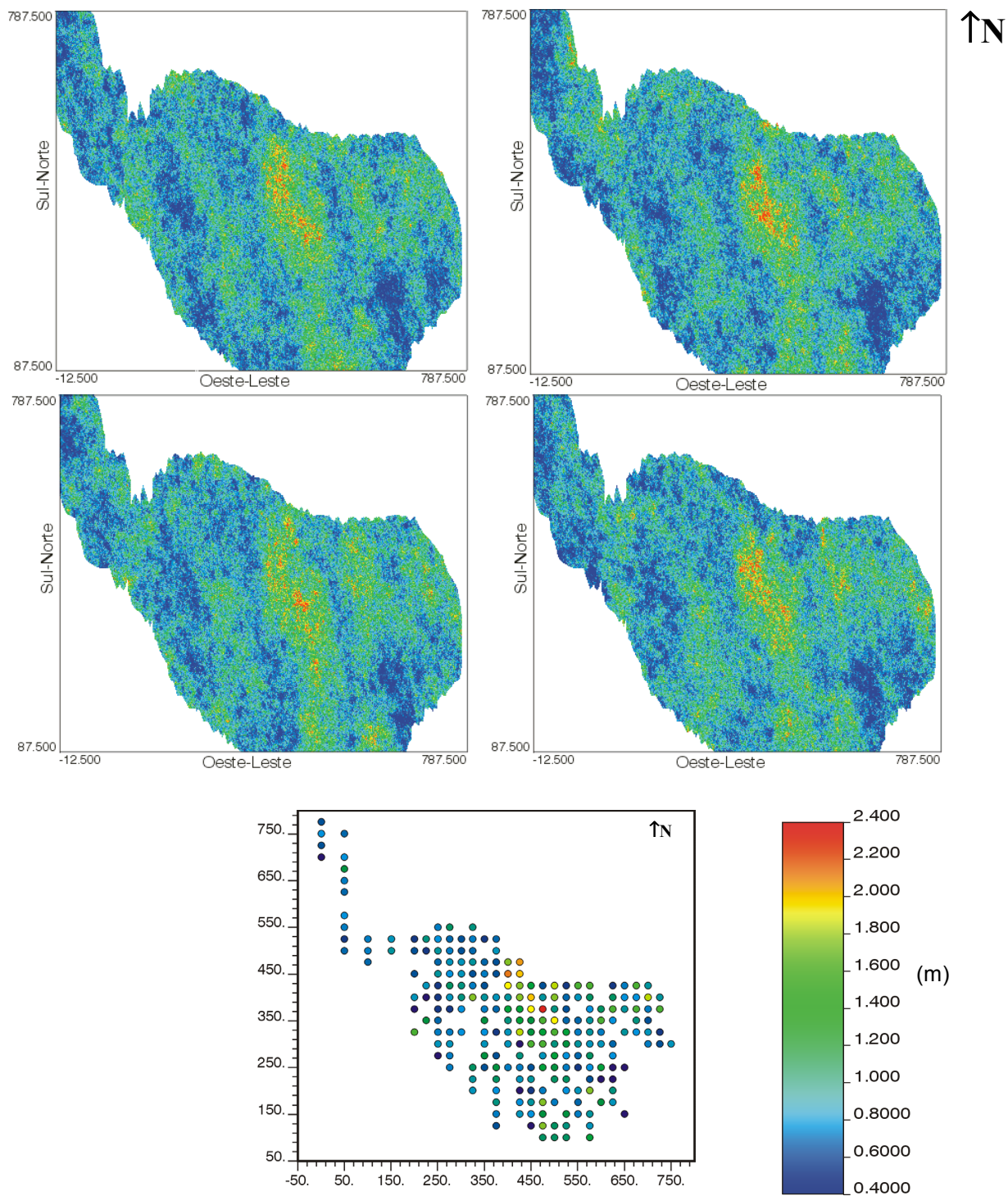
Simulações seqüenciais Gaussianas para a variável espessura, no depósito de argila aqui enfocado, já foram objeto de estudo em Stangler et al. (2001a) e Stangler et al. (2001b), Apêndice A. Nestes trabalhos, as simulações englobaram uma área total ligeiramente maior que a do subdomínio planície aqui considerada, incluindo adicionalmente em torno da metade S do posteriormente desmembrado subdomínio transição. São reproduzidos nessa dissertação os resultados obtidos para o suporte original das simulações, filtrando a seguir apenas os blocos 25m x 25m abrangidos pelo envelope correspondente ao mesmo subdomínio planície já considerado para a avaliação dos recursos geológicos (Capítulo 3).

Validações dos modelos simulados no espaço Gaussiano foram realizadas, checando cuidadosamente se as estatísticas básicas das realizações individuais respeitaram globalmente a convergência para uma distribuição Gaussiana. Após isso, retro-transformações das realizações para o espaço original foram executadas, aplicando-se as mesmas relações de correspondência entre valores originais e valores normalizados (processo de normalização, abordado no item 4.3.2) necessárias para a execução da simulação propriamente dita, só que desta vez na ordem inversa.

No espaço original, os histogramas e variogramas de realizações individuais foram computados e comparados respectivamente com a distribuição original desagrupada e o modelo variográfico de referência, a fim de verificar se tais realizações reproduziram os dois primeiros momentos da

distribuição original, conforme discutido no item 4.3.2. Flutuações ergódicas de pequena escala foram observadas. Detalhes de tais validações são apresentados no Apêndice I.

A Figura 4.4 mostra quatro realizações no suporte original 1m x 1m tomadas aleatoriamente entre as 50 obtidas, justapostas ao mapa amostral quase-pontual original. Feições globais de distribuição dos valores amostrais de espessura foram preservadas nas diferentes realizações, reproduzindo a anisotropia variográfica modelada, de direção de máxima continuidade NNW-SSE. Flutuações locais são observadas quando compara-se as realizações de simulações entre si e com o mapa amostral de referência. Uma certa ciclicidade observada no modelo variográfico para espessura na direção de menor continuidade (N80E), apresentado na Figura 3.18, mostra-se bem representada nestas figuras, denotando a ritmicidade de canais paralelos à drenagem principal, no contexto geológico de leques aluviais, conforme discorrido no item 2.2. Isso demonstra que as simulações também podem ser úteis na elucidação de características geológicas do depósito mineral em estudo, ao possibilitar a visualização da textura da variável de interesse, no caso a espessura da argila.



**Figura 4.4 - Quatro realizações da variável espessura na malha de alta resolução 1m x 1m tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações; abaixo, mapa amostral de referência.**

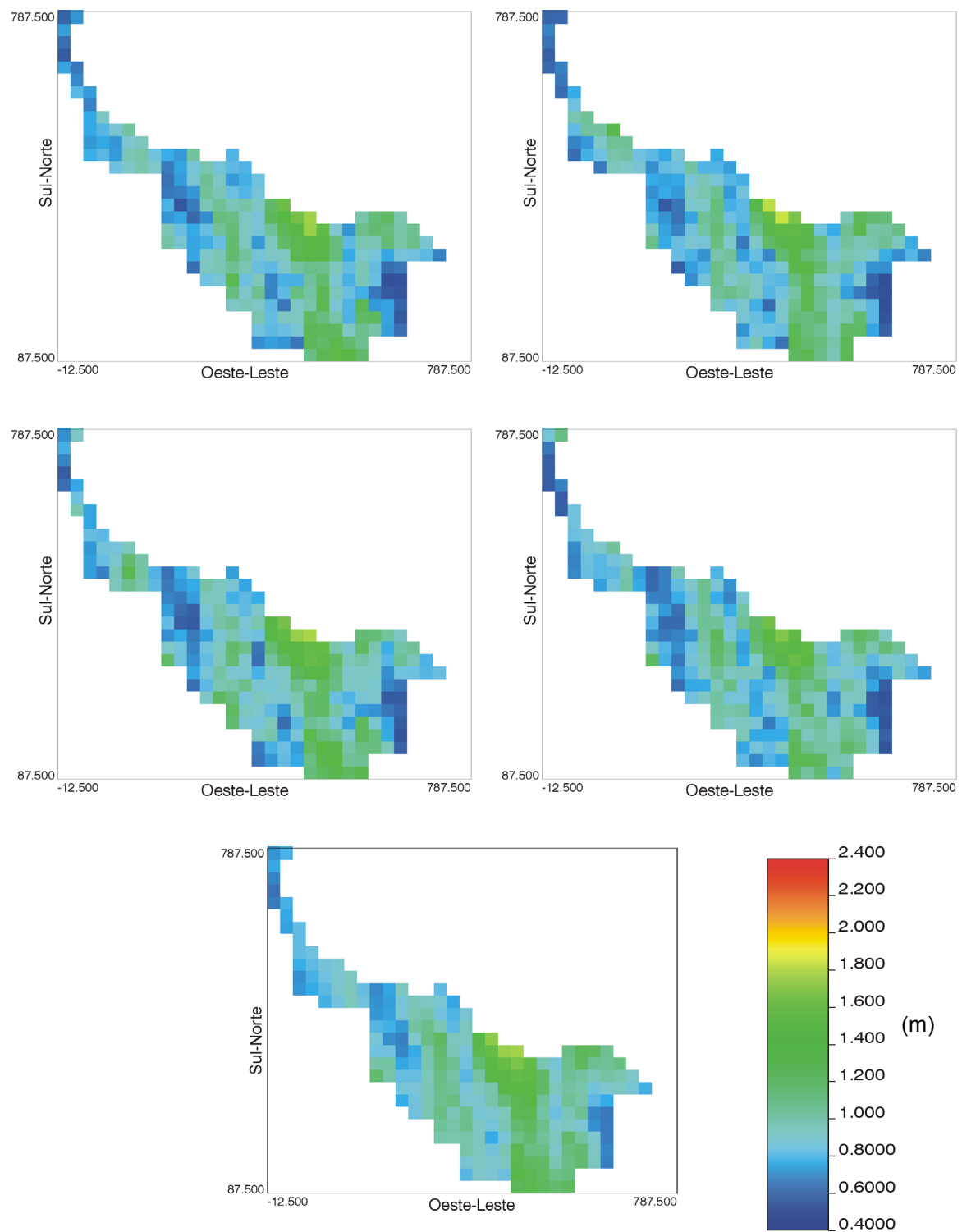
Com uma boa proximidade entre feições de referência e as obtidas, todas as realizações puderam ser aceitas e tomadas equiprobabilisticamente como possíveis cenários da população dos dados, em termos estatísticos, geoestatísticos e geológicos. Foi então procedida a mudança de suporte destes possíveis modelos para blocos 25m x 25m, conforme abordado no item 4.3.3.1.

Resultados simulados obtidos para espessura no suporte de blocos, podem ser vistos na Figura 4.5, comparadas ao modelo « ótimo » de recursos geológicos fornecido pela krigagem em blocos. O efeito suporte claramente suaviza as oscilações de pequena escala de espessura, quando vistas no suporte de blocos, atenuando diferenças entre distintas simulações. Mesmo assim, variações locais são observáveis quando diferentes realizações são comparadas com o modelo de blocos único estimado por krigagem ordinária, tipicamente suavizado.

Essa análise visual, indicando poucas variações nas feições globais e mesmo locais na espessura média dos blocos, permite segurança na tomada de decisões concernentes exclusivamente a este atributo e neste suporte, se todos os blocos forem considerados mineráveis, independentemente de seletividade mineira. Até aqui não foi ainda considerado esse fator, relacionado a espessuras mínimas mineráveis, o qual será discutido no item 4.5.

As cinquenta realizações no suporte de blocos proveram uma ferramenta útil para a avaliação da variabilidade da argila e de suas reservas recuperáveis, quantificando o risco em classificações, conforme será visto adiante nesse capítulo.





**Figura 4.5 -** Quatro realizações da variável espessura em blocos 25m x 25m, extraídas do grupo de cinquenta simulações; abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária.

A Tabela 4.1 apresenta um comparativo entre as variâncias de espessura entre valores amostrais (« pontuais »), krigados em blocos, e simulados no suporte quase-pontual e em blocos. A variância dos dados krigados compreendendo aproximadamente 34% da variância amostral demonstra a ação conjugada do efeito de aumento de suporte e o efeito suavizador inerente à krigagem na redução da variância, em consonância com discussão do item 4.2.1. Já a proximidade entre a variância amostral e a das simulações no suporte quase-pontual denota a reprodução ergódica desse momento, como é requerido para a validação das realizações. A redução de variância, considerando a variância média oriunda das simulações no suporte de bloco de lavra, a qual representa aproximadamente 41% da variância média obtida nas simulações no suporte quase-pontual, decorre diretamente do efeito suporte. Por sua vez, o acréscimo em 18% ao se passar da variância krigada para a variância média simulada, ambas no suporte 25m x 25m, reflete uma vez mais o efeito suavizador da krigagem. Todas essas modificações na variância global dos valores, em função do suporte considerado e da origem dos dados (amostral, krigada ou simulada), têm um impacto direto na recuperação de reservas, conforme discutido no item 4.2.1 (especialmente Figura 4.2).

A diluição de valores extremos ao aumento de suporte, conjugada à manutenção da variância original no suporte quase-pontual diretamente simulado, denotam a maior apropriação da aplicação de simulações na análise de reservas recuperáveis, ao invés de krigagem ou método de polígono de influência [ver exemplos similares e discussão a respeito em Cruz Júnior (1998) e Cruz Júnior & Remacre (2001)]. Será visto adiante neste capítulo como as simulações processadas foram utilizadas na quantificação de reservas recuperáveis, tanto em escala global quanto local.

**Tabela 4.1 – Comparativo entre variâncias de espessura ( $m^2$ ). A variância amostral (pontual) é calculada sobre os dados desagrupados, enquanto os valores de variância obtidos das simulações nos dois suportes representam as médias de variâncias para as 50 realizações.**

Amostral	Simulação 1m x 1m	Krigagem 25m x 25m	Simulação 25m x 25m
0,147	0,143	0,050	0,059

#### 4.3.3.4 Variáveis de Qualidade

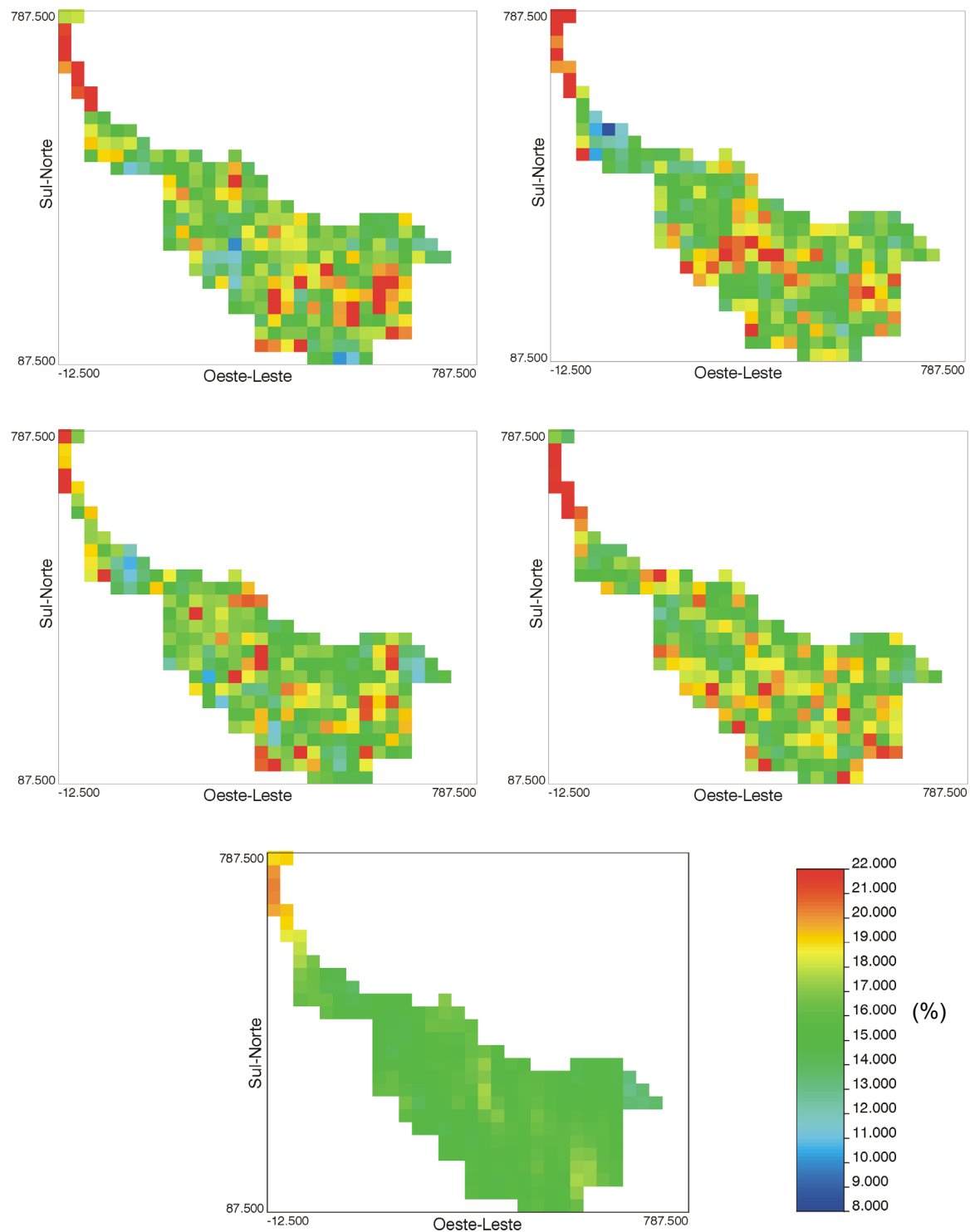
A mesma seqüência completa de operações de simulações, executada para a variável espessura, foi repetida para as duas acumulações, tanto no tocante ao processamento no suporte quase-pontual quanto à transformação para o suporte de blocos. Validações no suporte original quase-pontual foram realizadas, confirmando a reprodução ergódica dos dois primeiros momentos (histograma e variograma) já verificada para a espessura. O demonstrativo dessas validações encontra-se no Apêndice I.

O processo de simulação dessas variáveis de trabalho, a exemplo das estimativas de recursos apresentadas no Capítulo 3, compreende uma etapa intermediária necessária à obtenção de valores simulados para as variáveis de qualidade originais. Como o interesse efetivo reside nas variáveis de qualidade propriamente dita, e não nas suas acumulações, os mapas de simulação gerados para estas últimas não serão apresentados.

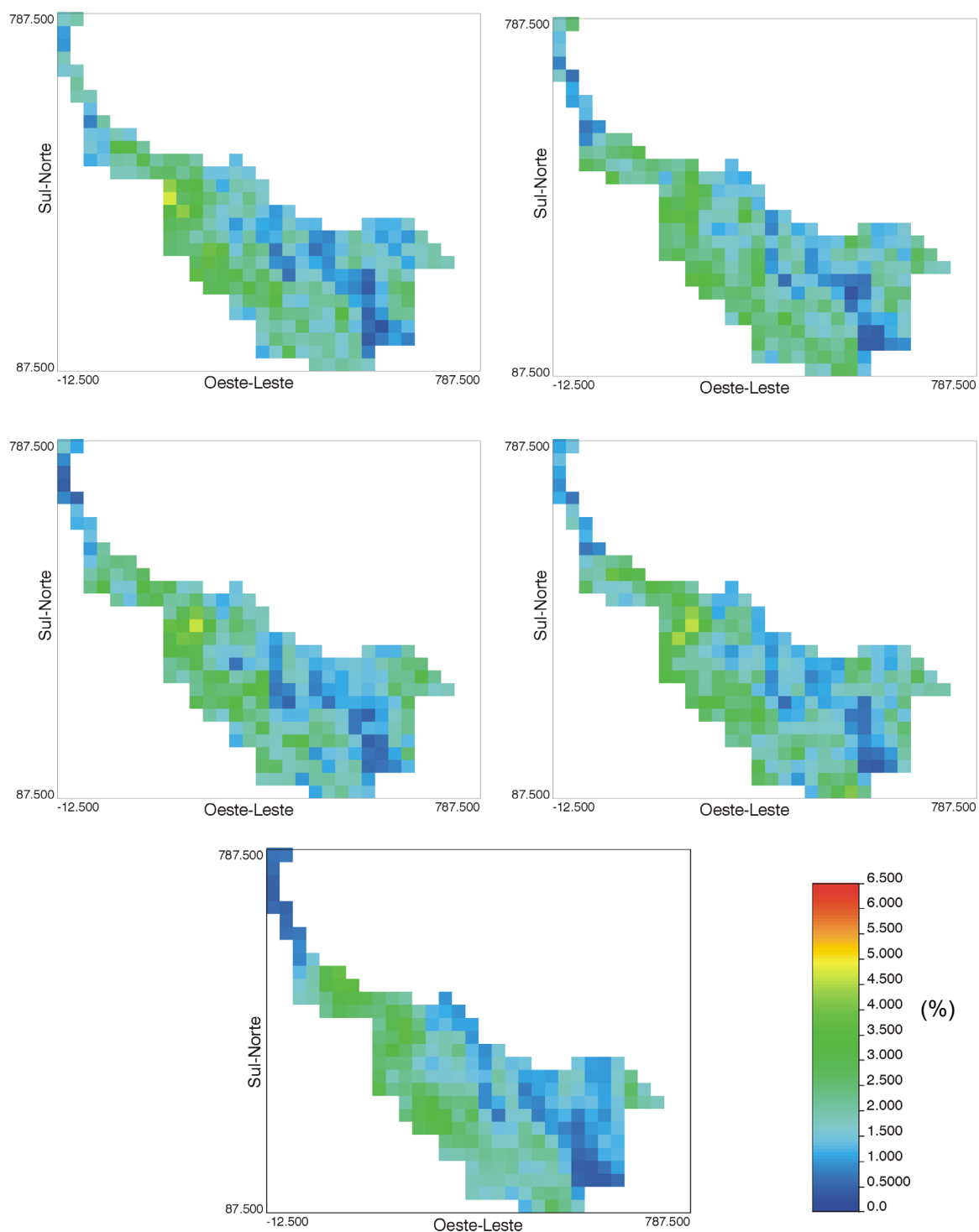
Os valores simulados para as variáveis de efetivo interesse cerâmico foram portanto obtidos indiretamente, dividindo resultados já no suporte de blocos de simulações das acumulações pelos mesmos blocos simulados para espessura. Como são 50 realizações equiprováveis de cada uma das variáveis destes dois quocientes originadores das realizações das variáveis de qualidade propriamente ditas, no suporte de bloco, um total de 2.500 combinações possíveis para cada variável pode ser obtido. Porém, também para as variáveis originais um conjunto de 50 realizações foi considerado suficiente em termos de abrangência do universo de variabilidade, conforme demonstrativo no Apêndice H, seguindo discussão do item 4.3.3.2.

Os resultados simulados obtidos indiretamente para absorção d'água e retração linear no suporte de blocos, para quatro realizações tomadas aleatoriamente do grupo total de cinqüenta, podem ser visualizadas respectivamente nas Figuras 4.7 e 4.8, comparadas aos modelos « ótimos » de recursos geológicos fornecidos por krigagem ordinária em blocos. Regiões de valores altos e de valores baixos são em média reproduzidas nas simulações. Variações locais são claramente observáveis quando diferentes realizações são comparadas entre si e com o modelo de blocos único estimado por krigagem ordinária, especialmente suavizado no caso da

absorção d'água. Tais oscilações são significativamente mais proeminentes que para espessura.



**Figura 4.6 - Quatro realizações da variável absorção d'água em blocos 25m x 25m, tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações; abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária.**



**Figura 4.7 - Quatro realizações da variável retração linear em blocos 25m x 25m, tomadas aleatoriamente do grupo de cinquenta simulações; abaixo, modelo de blocos estimado por krigagem ordinária.**

O universo de cinquenta realizações no suporte de blocos para cada variável de qualidade, tomada tanto individual quanto conjuntamente com a

outra variável, permitiu a avaliação da variabilidade da qualidade cerâmica da argila e de suas reservas recuperáveis. A análise de quantificação do risco em classificações, advinda da variação global e local (bloco-a-bloco) dos atributos de qualidade, constituirá objeto de análise dos itens 4.4 e 4.5.

#### **4.4 Variabilidade da Argila no Subdomínio Planície**

A importância da investigação de variabilidade da argila enquanto matéria-prima na indústria cerâmica como um todo foi já abordada ao longo dos Capítulos 1 e 2 desta dissertação. A garantia de sua homogeneidade nos processos cerâmicos e produtos resultantes específicos, respeitando as especificações industriais, tornam imperativa uma quantificação de sua variabilidade em termos de qualidade, i.e., no tocante aos seus parâmetros de qualidade considerados, absorção d'água e retração linear.

Da mesma forma, é importante quantificar-se a variabilidade da espessura de horizonte de interesse, a fim de que se possa avaliar a potencialidade de um determinado bloco ou conjunto de blocos ser minerado sob dadas restrições de seletividade mineira (=espessura mínima minerável). Tal quantificação é fundamental na análise posterior de reservas recuperáveis (item 4.5).

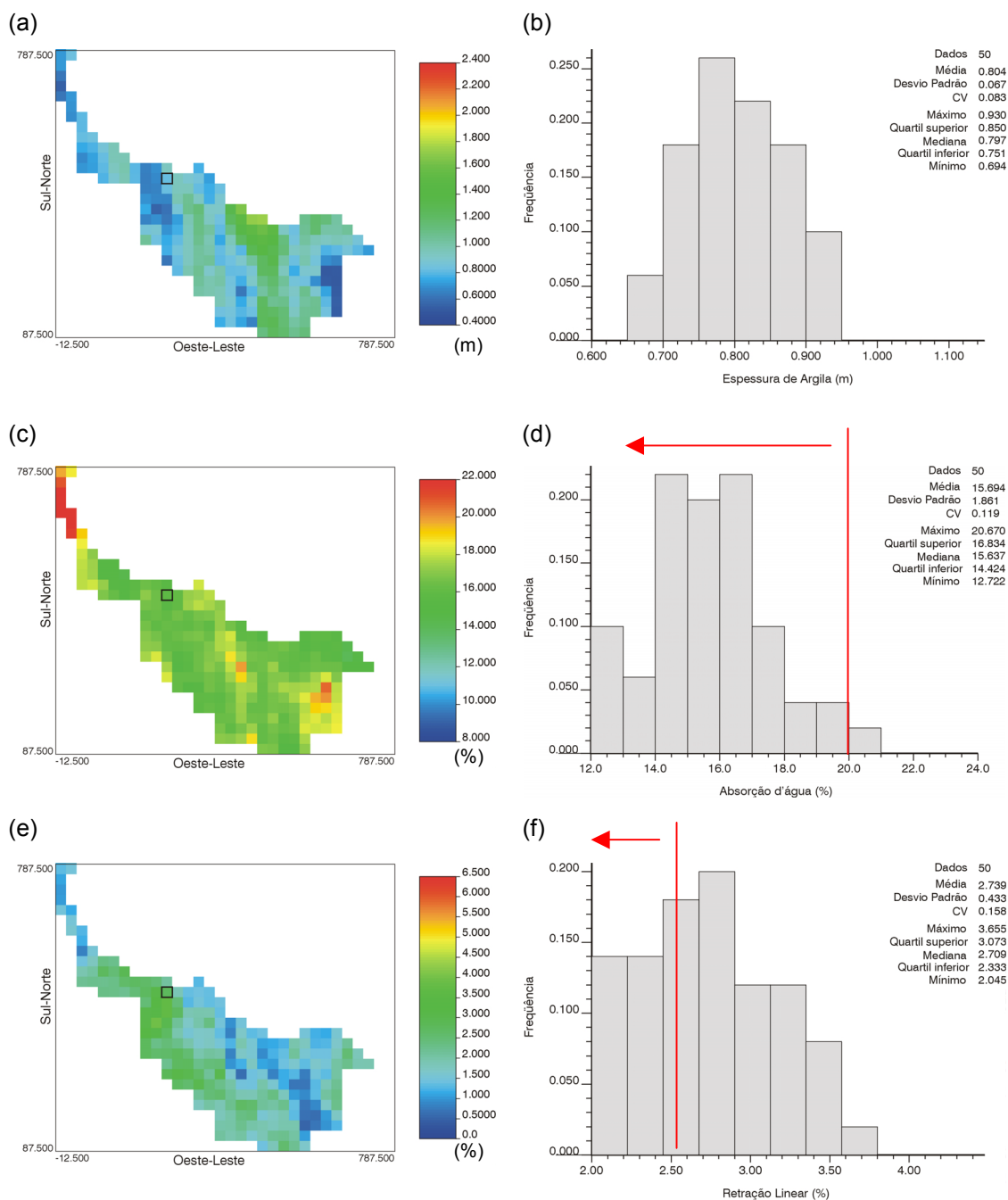
A maior parte dos métodos de simulação estocástica possibilita o modelamento da distribuição cumulativa de probabilidade local numericamente, modelando assim a incerteza associada às predições. Essa incerteza será incorporada na análise de reservas recuperáveis (item 4.5).

Mapas de simulações estocásticas, como os apresentados no item 4.3.3, representam realizações equiprováveis da função aleatória. Cada uma destas realizações contribui com um valor para a distribuição cumulativa de cada variável aleatória (cada bloco). No estudo de caso presente, 50 realizações consideradas geram um conjunto de 50 valores para cada bloco, as quais correspondem à uma distribuição de probabilidade local deste determinado bloco.

A Figura 4.8 mostra à esquerda, para as três variáveis de interesse, mapas contendo as médias dos cinquenta valores simulados para cada bloco (*E-type*). Tais médias correspondem em última análise aos valores esperados para cada bloco, os quais tendem a ser muito próximos dos valores obtidos por krigagem ordinária em blocos (vide três figuras anteriores), com alguns desvios no caso de absorção d'água. Nesta figura, um bloco foi selecionado aleatoriamente e destacado nos mapas; os histogramas apresentados à direita constituem suas distribuições de probabilidade local para cada variável.

Assim, o histograma da Figura 4.8b mostra a distribuição dos cinquenta equiprováveis valores simulados para espessura no bloco destacado (Figura 4.8a). Adicionalmente ao valor médio (0,809), que se aproxima ao valor esperado para este bloco conforme discussão anterior, é possível desta forma visualizar o índice de incerteza (variabilidade) em torno dessa predição em particular. Se espessuras mínimas forem especificadas para distintos níveis de seletividade mineira, conforme será abordado nos itens subseqüentes do presente capítulo, para casos extremos se obteria uma probabilidade local (=proporção de valores observados) de 100% para esse bloco apresentar espessura maior que 0,50 m. Em contrapartida, sua probabilidade de apresentar uma espessura média superior a 1,0 m seria nula, pois o máximo valor observado é de 0,93 m.

Para o caso das variáveis de qualidade, as Figuras 4.9d e f compreendem os histogramas de dispersão dos valores simulados respectivamente para absorção d'água e retração linear. Os intervalos de valores que classificam a argila como do tipo cerâmico inferior (Biqueima) são indicados nesses histogramas, demonstrando que o bloco apresenta uma chance muito grande de apresentar características cerâmicas favoráveis, em relação à absorção d'água. Em contrapartida, para retração linear, as chances são bem maiores de se constituir num bloco com argila em média fora dos padrões requeridos. Como a classificação em tipos cerâmicos é feita em conjunto (Tabela 2.3), este bloco apresenta uma chance pequena de ser recuperável do ponto de vista cerâmico.



**Figura 4.8 - Médias bloco-a-bloco (*E-type*) das cinquenta realizações para espessura (a), absorção d'água (c) e retração linear (e), mostrando para bloco destacado no centro-oeste da área histogramas de variabilidade para valores simulados em cada variável, respectivamente (b), (d) e (f). Para as variáveis de qualidade são demarcadas nos histogramas os intervalos aceitáveis para argila cerâmica, quando as variáveis são consideradas individualmente.**

Da mesma forma descrita nos dois parágrafos anteriores, outros blocos de interesse podem ser analisados probabilisticamente a partir de resultados de simulações, em relação a potenciais de apresentar espessuras e/ou características cerâmicas desejadas. Análises de recuperabilidade local (bloco-a-bloco) serão apresentadas em detalhe no item 4.5.1.



Vários métodos para avaliar e visualizar incerteza local em depósitos minerais são descritos em Srivastava (1994) e Goovaerts (1997, p.333-340), utilizando resultados de simulações condicionais. Duas medidas de incerteza local, baseadas nos resultados das simulações processadas anteriormente, foram escolhidas para o presente estudo de caso, analisando a dispersão dos diferentes atributos de interesse bloco-a-bloco (i.e., 50 valores para cada variável de interesse em cada bloco): (i) coeficiente de variação (CV), resultando em mapas de variabilidade; e (ii) probabilidade de exceder um dado valor mínimo bloco-a-bloco, resultando em mapas de probabilidade. Mapas destas diferentes quantidades constituem ferramentas na orientação aos processos de tomada de decisões mineiras. Os mapas de probabilidade serão aplicados na análise local de reservas recuperáveis (item 4.5.1).

Os mapas de variabilidades da Figura 4.9 apresentam valores de CV obtidos conforme Equação 4.5, para as três variáveis de interesse. Esses valores representam dispersões dos valores simulados para cada bloco em torno da média destes (=valor esperado do bloco), assim:

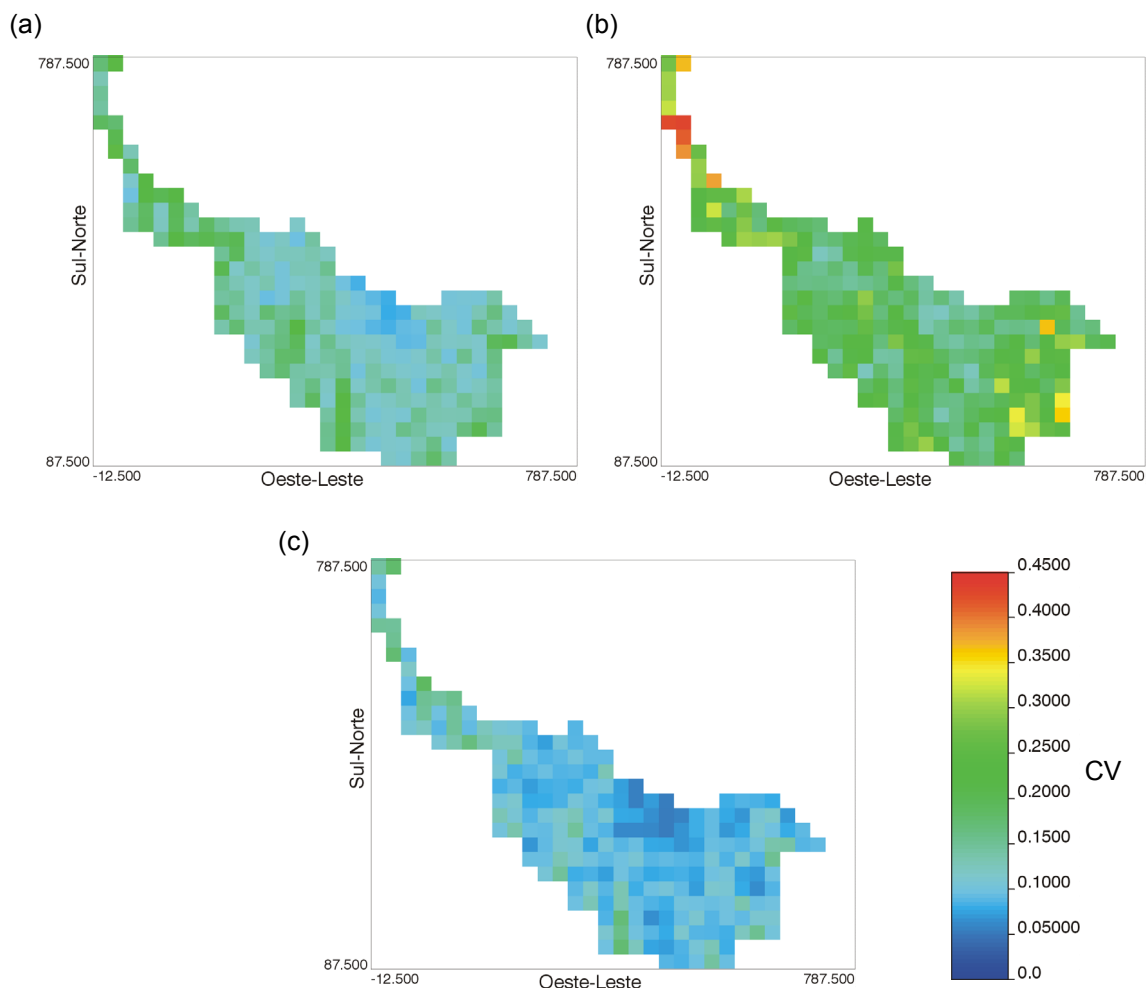
$$CV_{bl} = \frac{\sigma_s}{\bar{X}_s} \quad (4.5)$$

onde:  $CV_{bl}$  é o coeficiente de variação bloco-a-bloco;  $\sigma_s$  é o desvio padrão dos cinquenta valores simulados para cada bloco; e  $\bar{X}_s$  é a média desses cinquenta valores (*E-type*).

Para a variável absorção d'água (Figura 4.9a), os valores mais elevados (em torno de 0,25) tendem a se distribuir nas bordas do subdomínio avaliado, em especial no extremo NW. Essas oscilações locais relativamente pequenas tendem a ficar ainda menores na porção centro-norte da área, junto ao limite com o subdomínio transição, confirmando o caráter transicional da passagem a N para a região do tálus.

A outra variável de qualidade retração linear, embora pela comparação mútua das diferentes realizações apresentadas na Figura 4.7 possa à primeira vista parecer menos errática (devido à escala de valores utilizada), na verdade mostra na Figura 4.9b que das três variáveis de interesse é a que

apresenta maior variabilidade local. Isso ocorre tanto em termos de valores absolutos de CV quanto da irregularidade da disposição de valores altos e baixos. Novamente a região NW da área, onde há uma menor densidade de valores amostrais, apresenta uma variabilidade mais alta, com valores próximos a 45%.



**Figura 4.9 - Mapas de variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) para as três variáveis: (a) absorção d'água; (b) retração linear; e (c) espessura.**

A espessura (Figura 4.9c) confirma a baixa variabilidade já observada nos mapas de simulação de ambos os suportes considerados (Figuras 4.5 e 4.6): valores de CV predominantemente menores que 0,15. Seguindo tendência observada para absorção d'água, a redução da dispersão dos valores simulados para um mesmo bloco na porção centro-norte da área é notória.

A variabilidade da argila computada em termos globais, para a planície como um todo, tem fortes impactos na análise de risco/incerteza na quantificação de reservas recuperáveis globais. Tal abordagem será objeto de análise do item 4.5.2, englobando as três variáveis de interesse.

#### **4.5 Reservas Recuperáveis de Argila no Subdomínio Planície**

As simulações processadas e abordadas anteriormente (item 4.3.3) para as variáveis de interesse permitiram a análise de variabilidade e incerteza associada à predições em geral (item 4.4). Tal análise de variabilidade é a seguir aplicada na quantificação de reservas recuperáveis sob uma ótica probabilística, na mesma linha de enfoque abordada no item 4.3.1, tendo em vista todo o contexto que envolve reservas recuperáveis em geral e especificamente em matérias-primas cerâmicas (item 4.2). As reservas recuperáveis de argila no depósito em estudo são avaliadas probabilisticamente, em termos locais (item 4.5.1) e globais (item 4.5.2), segundo critérios de seletividade mineira (chance de possuir uma determinada espessura mínima minerável) e critérios cerâmicos (chance de enquadrar-se em um dos dois tipos cerâmicos).

O tipo de análise de reservas recuperáveis aqui efetuado revela seu caráter inédito na medida em que conjuga, tanto bloco-a-bloco como globalmente, critérios mineiros e critérios de qualidade (cerâmicos) na quantificação de reservas segundo diferentes níveis de certeza. Isso permite, a quem toma decisões em relação ao depósito mineral em análise, um amplo e flexível quadro de possibilidades de situações, para diferentes níveis de probabilidade de ocorrência, e portanto para diferentes graus de risco.

A importância da apreciação da incerteza em tomadas de decisões de investimentos é claramente abordada em Chilès & Delfiner (1999, p.22-24). Com a observação da repetição de certos fenômenos (por simulação) em relação a um dado critério, pode-se antecipar probabilisticamente chances que um determinado evento venha a ocorrer futuramente.

Toda essa análise de incertezas é calcada em conceitos estatísticos oriundos das simulações realizadas e distribuições de probabilidades geradas

a partir destas, bem como em conceitos de dependência/independência estatística entre diferentes eventos, conforme será visto adiante (item 4.5.1.3), ao integrar critérios mineiros e cerâmicos.

## **4.5.1 Avaliação Local**

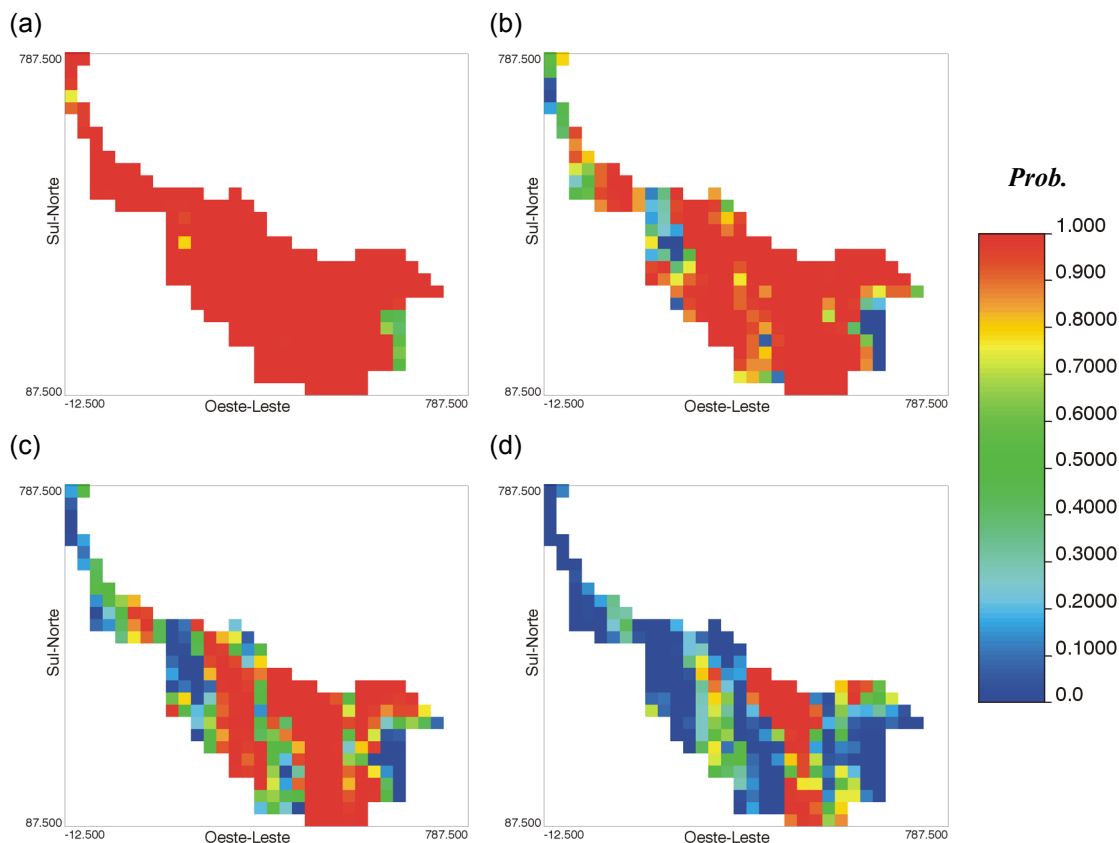
### **4.5.1.1 Critérios Mineiros**

Mapas mostrando a probabilidade da espessura de um bloco exceder um dado valor mínimo minerável, ainda que independentemente de sua classificação cerâmica, são úteis como guias no planejamento e seqüenciamento mineiro em pequenos depósitos como o presentemente em estudo. Esses mapas são igualmente relevantes para selecionar equipamentos apropriados dada uma seletividade requerida durante a lavra. Regiões de menores espessuras de argila requerem mais cautela ao serem mineradas, para evitar diluição/contaminação.

Para cada bloco simulado, a probabilidade de exceder uma determinada espessura é verificada observando-se a proporção dos cinquenta valores possíveis maiores que aquele valor de referência. Assim, uma probabilidade de 90% de um bloco exceder uma espessura de 0,50m, por exemplo, significa na prática dizer que 45 das 50 realizações para aquele bloco apresentaram valores maiores que 0,50m. O mapa de probabilidade para espessuras  $\geq 0,40$  m apresentaria desta forma todos os blocos com probabilidade igual a 1,0 (100%), uma vez que o valor mínimo de espessura simulada em todas as realizações é de 0,436 m, para o suporte de blocos (0,40 m para o suporte quase-pontual).

São nítidas as reduções nas chances de blocos serem mineráveis ao aumento progressivo da espessura mínima de 0,50 a 1,00 m (Figura 4.10). Se uma espessura mínima minerável de 0,50 m for definida, praticamente a totalidade dos blocos tem alta probabilidade (e.g.,  $> 90\%$ ) de ser minerada sem maiores problemas operacionais. Por outro lado, se considerarmos um método mineiro menos seletivo, usando equipamento de maior porte e/ou um operador de máquina com menor experiência, a mínima espessura minerável

poderia ser, por exemplo, 1,00m. Nesta situação, blocos com nível de certeza alto (e.g., > 90%) de serem iguais ou acima desta espessura mínima compreenderiam menos que a metade do depósito.



**Figura 4.10 - Mapas de probabilidade em exceder bloco-a-bloco espessuras mínimas de: (a) 0,50m; (b) 0,70m; (c) 0,80m; (d) 1,00m.**

Assim, para situações de lavras menos seletivas, a porção centro-leste da área desponta como a mais favorável em termos de risco de contaminação com material estéril.

#### 4.5.1.2 Critérios Cerâmicos

A classificação cerâmica de blocos para recursos geológicos estimados no Capítulo 3 levou em consideração os tipos cerâmicos definidos segundo as duas variáveis de qualidade, tomadas simultaneamente (conforme critérios classificatórios da Tabela 2.3). Assim, uma análise de

reservas recuperáveis quantificando o risco em classificações cerâmicas bloco-a-bloco só tem sentido no momento em que se considera dispersões destes atributos de forma conjunta. Uma maneira direta de atingir este objetivo foi aplicada no presente estudo de caso, verificando para cada bloco a chance da argila ocorrente de ser enquadrável como tipo monoporosa ou biqueima, independentemente de sua espessura. Tal verificação foi levada a cabo de maneira similar ao caso da espessura mínima (item 4.5.1.1): para cada bloco simulado, a probabilidade de classificação efetiva em um ou outro tipo cerâmico corresponde à proporção dos 50 valores possíveis enquadráveis nas respectivas categorias, verificando-se conjuntamente para cada realização o valor simulado para as duas variáveis de qualidade. Portanto, uma probabilidade de 90% de um bloco ser do tipo Biqueima, por exemplo, significa na prática dizer que 45 das 50 realizações para aquele bloco foram classificáveis como tal.

Assim, a exemplo da variável espessura, mapas de probabilidade da argila ocorrente num bloco cumprir requisitos para ser aproveitável nos processos cerâmicos, como um ou outro tipo, são úteis como guias no planejamento e seqüenciamento mineiro em pequenos depósitos como o presentemente em estudo. Esses mapas são igualmente relevantes para mapear zonas mais propícias para futuros empreendimentos mineiros, em termos de riscos em relação ao preenchimento de requisitos cerâmicos. Dada uma determinada variabilidade de um bloco ou conjunto de blocos de um determinado setor do depósito, pode-se antecipar margem de flutuabilidade que poderá apresentar a argila, e conforme a tolerância dos processos cerâmicos envolvidos, verificar se a argila poderá ser usada ou não, a um dado nível de confiança.

A Figura 4.11 apresenta bloco-a-bloco as probabilidades da argila vir a ser na realidade, para este suporte, classificável como um dos dois tipos cerâmicos (Figuras 4.12a e b), ou indistintamente como argila cerâmica (Figuras 4.12c). Neste último caso, leva-se em consideração o cálculo de soma de probabilidades (Koch & Link, 1970 p.38-39), conforme fórmula de adição representada pela Equação 4.6:

$$P\{X+Y\} = P\{X\} + P\{Y\} - P\{XY\} \quad (4.6)$$

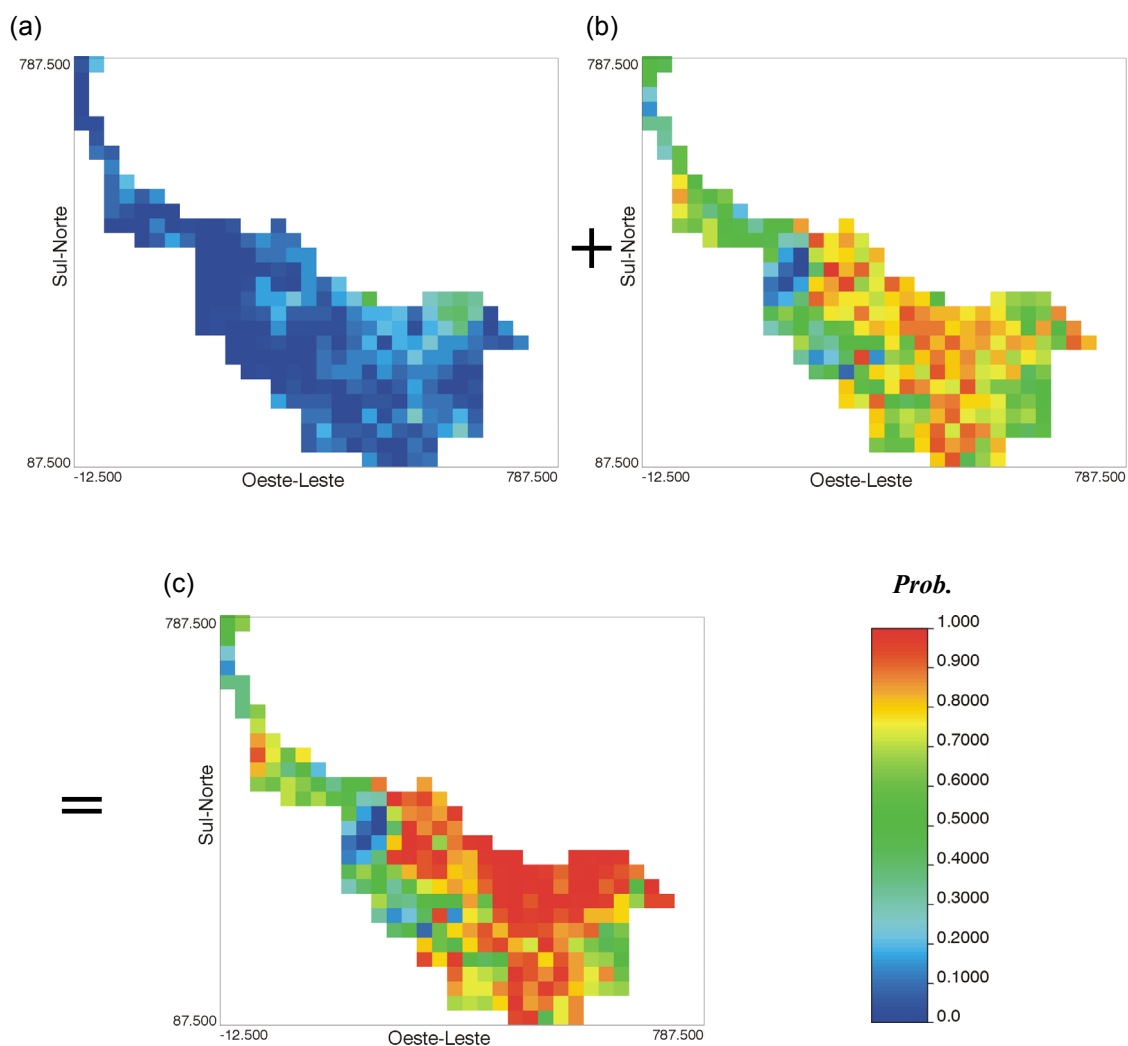
onde:  $P\{X+Y\}$  = soma lógica das probabilidades de eventos  $X$  e  $Y$ ;  $P\{X\}$  = probabilidade do evento  $X$ ;  $P\{Y\}$  = probabilidade do evento  $Y$ ;  $P\{XY\}$  = probabilidade de ambos os eventos ocorrerem simultaneamente.

No caso dos eventos  $X$  e  $Y$  serem mutuamente excludentes,  $P\{XY\} = 0$ , e a fórmula da adição fica simplesmente:

$$P\{X+Y\} = P\{X\} + P\{Y\} \quad (4.7)$$

Para o caso presente, retratado na Figura 4.11, como os fatos da argila ser biqueima ou monoporosa correspondem de fato a eventos mutuamente excludentes, a Equação 4.7 se aplica.  $P\{X+Y\}$  pode assim ser interpretado diretamente como a probabilidade da argila ser aproveitável segundo os parâmetros cerâmicos requeridos para um dos dois tipos cerâmicos (monoporosa ou biqueima), i.e., ser classificada na realidade indistintamente como « argila cerâmica ».

As chances dos blocos apresentarem de fato argila tipo Monoporosa são remotas, conforme se verifica na Figura 4.11a, com exceção da porção NE da área, onde alguns blocos apresentam probabilidades medianas para tal. Isso demonstra a suscetibilidade de erro nas classificações por krigagem para este tipo de argila mais nobre (Capítulo 3). Para as análises globais de reservas recuperáveis (item 4.5.1.2) não será feita a avaliação de reservas de argila do tipo Monoporosa independentemente, pois com probabilidades locais tão pequenas não se justificaria em hipótese alguma algum empreendimento levando em consideração uma perspectiva de minerar argila monoporosa em quantidade apreciável, principalmente quando considera-se níveis mínimos de seletividade mineira. Por outro lado, esse tipo de análise global para argilas do tipo Biqueima, isoladamente, ficaria incompleto e ao mesmo tempo conservador, ao desconsiderar-se as chances da argila ser monoporosa, em especial nos blocos mencionados na porção NE da área, onde probabilidades atingem patamares em torno de 50%. Simplística e realisticamente, parece mais lógico somar probabilidades dos dois tipos (Figura 4.11c), conforme Equação 4.7, e considerar-se apenas probabilidades totais de reservas recuperáveis de « argila cerâmica ».



**Figura 4.11 - Probabilidades bloco-a-bloco de ocorrência de argila tipo Monoporosa no suporte 25m x 25m (a) somadas às probabilidades de ocorrência de argila tipo Biqueima (b) resultam nas probabilidades totais de ocorrência de argila cerâmica (c).**

Ainda sobre a Figura 4.11, cabe ressaltar as elevadas probabilidades verificadas para a porção centro-leste da área, especialmente para a argila cerâmica total (Figura 4.11c). Isso coincide com a maior favorabilidade observada também para esse setor no que diz respeito a espessuras de argila. No item a seguir, será apresentada um avaliação da situação quando considera-se os dois tipos de informação conjuntamente.



#### 4.5.1.3 Combinação de Critérios Mineiros e Cerâmicos

A avaliação de reservas recuperáveis de argila e incertezas/riscos envolvidos, a fim de ser realisticamente efetiva, deve necessariamente levar em consideração simultaneamente critérios mineiros de seletividade (=espessura mínima) e critérios de qualidade, no tocante à classificação cerâmica bloco-a-bloco. No cotidiano mineiro, não se pode prescindir das duas informações associadamente, a fim de verificar o quadro geral e a partir daí começar a pensar em decisões e possíveis operações mineiras. Em outras palavras, projeções futuras em cima de possíveis perspectivas de negociações e abertura de mina só poderão começar a ser delineadas com maior segurança no momento em que forem quantificadas simultaneamente: (i) magnitudes de dispersões locais (incertezas locais) para a lavrabilidade da argila num dado grau de seletividade mineira; e (ii) incertezas no tocante à adequabilidade de sua utilização como um dado componente em formulações cerâmicas.

Essa análise conjunta probabilística, envolvendo ocorrências simultâneas de determinados fatos/eventos (probabilidades condicionais), exige que se dimensione o grau de interdependência estatística entre esses eventos de diferente natureza.

A definição de dependência e independência entre variáveis aleatórias ou eventos, relacionada à teoria clássica de probabilidade, é desenvolvida em David (1977, p.26-29). Intuitivamente, duas variáveis/eventos são consideradas independentes se o conhecimento de uma não aporta nenhuma informação a respeito de outra. No caso de uma abordagem geoestatística, há interdependência espacial entre valores de um dado atributo se eles estiverem dispostos, numa determinada direção um do outro, a uma distância menor que o alcance variográfico para aquela dada direção. Se a distância entre eles exceder o valor do alcance, não há mais dependência mútua, e o conhecimento de um valor não ajuda em nada para a predição do outro valor.

Em termos matemáticos, as idéias acima são traduzidas na forma de probabilidade condicional. A probabilidade condicional de  $A_1$  em  $A_2$ ,  $P\{A_1|A_2\}$ , significa literalmente “a probabilidade de  $A_1$  considerando que  $A_2$  tenha acontecido”. No caso de independência mútua absoluta (i.e., o conhecimento

prévio de  $A_2$  não ajuda em nada a saber sobre  $A_1$ ), a relação entre duas variáveis aleatórias  $A_1$  e  $A_2$  é:

$$P\{A_1|A_2\} = P\{A_1\} \quad (4.8)$$

Por definição, a probabilidade condicional de  $A_1$  em  $A_2$  é:

$$P\{A_1|A_2\} = P\{A_1, A_2\} / P\{A_2\} \quad (4.9)$$

Assim, para duas variáveis independentes,

$$P\{A_1, A_2\} = P\{A_1\}P\{A_2\} \quad (4.10)$$

onde  $P\{A_1, A_2\}$  é chamada a probabilidade conjunta de  $A_1$  e  $A_2$ , i.e., probabilidade que os dois eventos ocorram simultaneamente, medida no intervalo  $[0, 1]$ .

Aspectos concernentes à questão de independência estatística são aprofundados em maior detalhe por Spiegel (1978, p.12-13) e Pereira (1979, p.288-296). Discussões sobre o assunto contendo aplicações geológicas podem ser vistas em Koch & Link (1970, p.36-42) e Agterberg (1974, Cap.8).

Testes de independência não são diretamente obtidos. Talvez a maneira mais imediata seja plotar, para uma série de pontos  $x_i, y_i$ , a nuvem de pontos representativos num diagrama  $X, Y$  (diagrama de correlação ou de espalhamento: *scatter plot*). A Figura 3.13c e d mostra exemplos deste tipo de plotagem, onde verifica-se claramente que, para a planície, não há nenhuma correlação nítida entre valores amostrais de espessura de argila e de variáveis de qualidade, observados nos mesmos pontos. Pode-se assim afirmar que há independência estatística entre estas variáveis (espessura x absorção d'água e espessura x retração linear).

Portanto, a independência estocástica ou estatística implica na falta de relações entre eventos ou variáveis aleatórias (Olea, 1991 p.74). Por extensão, eventos são considerados independentes se a ocorrência ou não de um evento não muda a probabilidade de ocorrência de qualquer dos outros eventos. Os eventos  $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$  são estocasticamente

independentes se e somente se a probabilidade de ocorrerem concomitantemente seja dada por:

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (4.11)$$

onde:

$P$  = probabilidade compreendida em  $[0, 1]$ ;

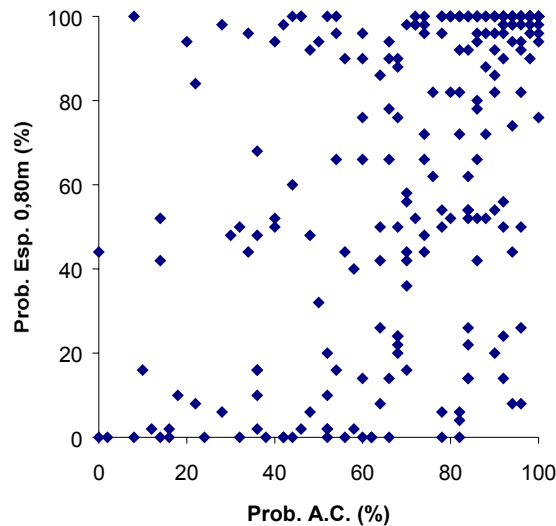
$\prod_{i=1}^n P(A_i)$  = produto total das multiplicações de probabilidades individuais dos eventos  $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ .

A Figura 4.12 ilustra a falta de uma correlação mais definida entre a probabilidade da argila ocorrente em cada bloco venha a ser realmente aproveitável como argila cerâmica (biqueima ou monoporosa) e a probabilidade da espessura no mesmo bloco ser maior que 0,80 m. Isto sugere uma independência estocástica entre esses dois eventos: o fato de um bloco ter espessura média menor ou maior que esse valor não o predispõe em menor ou maior grau a apresentar uma argila cerâmica. Tal assertiva é corroborada pela falta de correlação entre espessura e os parâmetros de qualidade tomados individualmente, conforme já mencionado neste item. O Apêndice J apresenta essa mesma independência de probabilidades para espessuras mínimas consideradas no intervalo  $[0,40\text{m}; 0,50; \dots; 1,00\text{m}]$ .

Portanto, ao assumir-se a independência estocástica entre diferentes eventos correspondentes aos critérios mineiros e aos critérios cerâmicos, já abordados separadamente na avaliação local de reservas recuperáveis (itens 4.5.1.1 e 4.5.1.2), a análise de probabilidades locais  $P_{bl}$  (bloco-a-bloco) conjuntas de cumprir requisitos mineiros e cerâmicos, assumidamente independentes, é regida pela relação enunciada da Equação 4.12, fruto das Equações 4.10 e 4.11:

$$P_{bl}\{A_1, A_2\} = P\{A_1\}P\{A_2\} \quad (4.12)$$

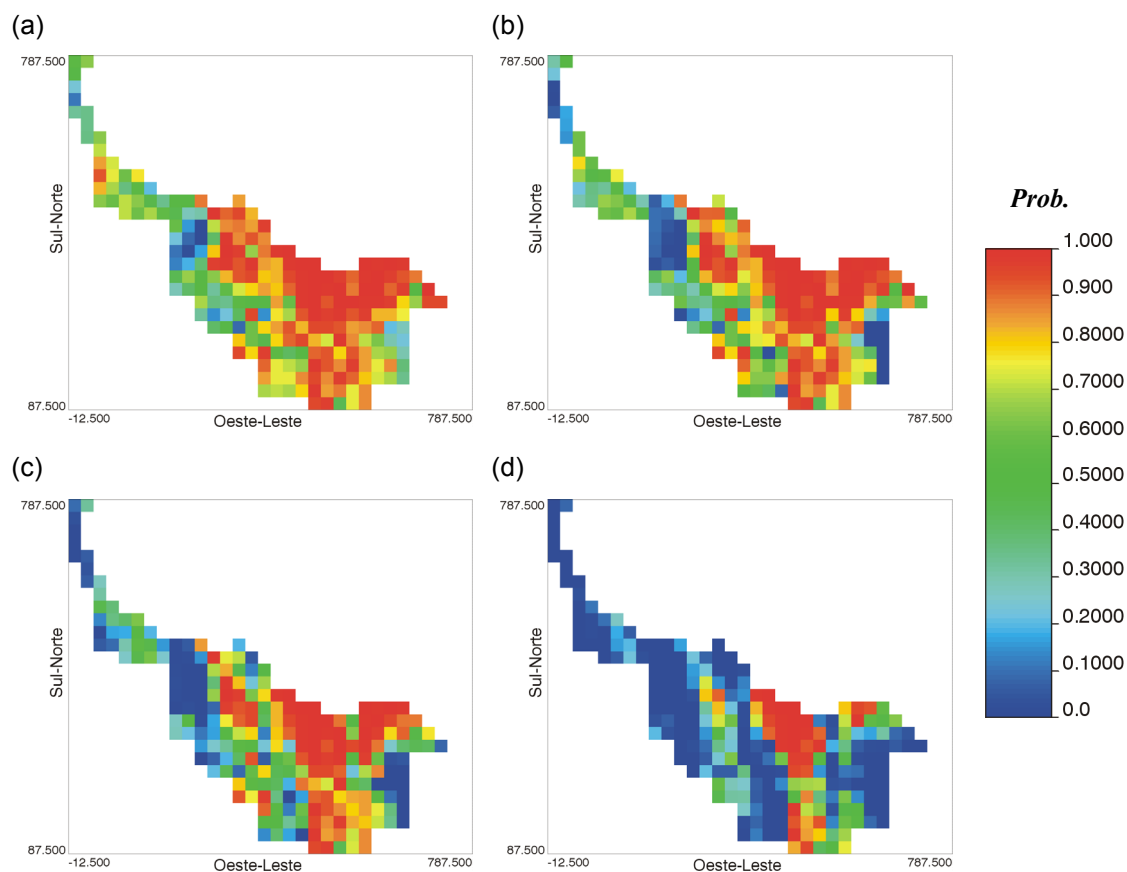
onde: evento  $A_1$  = argila ser cerâmica;  $A_2$  = espessura média do bloco ser acima de um limite de seletividade (0,50m , 0,60m , ..., 1,00m).



**Figura 4.12 - Diagrama de correlação entre probabilidades de ocorrência de argila cerâmica (Prob. A.C.) e probabilidades de espessura  $\geq 0,80$  m (=Prob. Esp. 0,80m), bloco-a-bloco.**

A Figura 4.13 ilustra para toda a planície (tomada bloco-a-bloco) a probabilidade conjunta da argila ocorrente ser cerâmica e da espessura média do bloco ser acima de determinados valores. Como a espessura mínima simulada em blocos é de 0,436 m, o mapa de probabilidade conjunta da argila ter espessura maior que 0,40 m ( $P = 1,0$  para todos os blocos simulados) e ao mesmo tempo ser cerâmica corresponderá ao mapa de probabilidade do bloco ser cerâmico, já apresentado na Figura 4.11c.

Ao comparar-se a Figura 4.13 com a Figura 4.10, onde critérios de qualidade não foram levados em consideração, verifica-se uma redução geral significativa nas chances dos blocos atenderem os dois tipos de exigências, para mesmas espessuras mínimas, exceto para o caso de 1,00 m (Figura 4.13d). Tal exceção deve-se à grande incidência de condições extremas ( $P \approx 1,0$  ou  $P \approx 0$ ) para um e/ou outro critério, causando essa proximidade. Além disso, observa-se a confirmação da porção centro-leste da área como a mais favorável para a recuperabilidade dos blocos, também quando considera-se critérios mineiros e cerâmicos simultaneamente.



**Figura 4.13 - Mapas de probabilidades conjuntas bloco-a-bloco de ocorrência de argila cerâmica acima de determinadas espessuras: (a) 0,50m; (b) 0,70m; (c) 0,80m; (d) 1,00m.**

## 4.5.2 Avaliação Global

Na quantificação de reservas recuperáveis e margens de risco associadas apresentadas até aqui, foram avaliados aspectos locais (bloco-a-bloco) de probabilidades de recuperação de reservas, possibilitando a análise setorial do depósito no subdomínio planície. Porém, conforme apontado no item 4.2, a tomada de decisões em relação ao depósito como um todo (ou pelo menos um setor mais amplo deste, já individualizado), deve levar em consideração a avaliação global de reservas recuperáveis, i.e., tomando o depósito (ou segmento individualizado deste) globalmente. Tal tipo de análise é fundamental no estudo de viabilidade do incremento de investimentos, tendo em vista aspectos concernentes à recuperabilidade e ao efetivo aproveitamento de reservas a longo prazo.

Nos itens a seguir, será procedida esta análise global, através de tabelas e curvas de parametrização de reservas, mantendo a mesma estruturação que a avaliação local anterior, i.e., sob critérios mineiros, cerâmicos, e a associação destes. O enfoque probabilístico empregado anteriormente é igualmente aplicado, verificando cenários extremos (pessimista e otimista) e medianos para cada espessura mínima considerada e/ou para cada índice de confiabilidade adotado para o enquadramento da argila ocorrente como cerâmica. A mesma independência de eventos entre espessura e a classificação cerâmica é também aqui assumida na análise conjunta do impacto dos dois tipos de informação associados. Com isso, é medida a dispersão em torno de previsões possíveis, possibilitando o dimensionamento de riscos envolvidos em tomadas de decisões globais para este segmento do depósito - a planície.

#### **4.5.2.1 Critérios Mineiros**

A quantificação das reservas recuperáveis globais e riscos associados, segundo critérios exclusivos de seletividade - espessura mínima minerável - é obtida através do cálculo de tonelagens independente de sua classificação cerâmica. Esse cálculo consistiu, para cada espessura mínima considerada e respectivos blocos acima deste valor de referência, na multiplicação da área constante de cada bloco ( $625 \text{ m}^2$ ) por sua espessura simulada média, assumindo um valor constante para o peso específico ( $2 \text{ t/m}^3$ ). Para cada espessura mínima de referência, foram selecionados os cenários otimista (melhor), mediano e pessimista (pior), de acordo com a espessura média global para cada realização.

Tal tipo de análise já havia sido feita em Stangler et al. (2001a), Apêndice A, separadamente para blocos pré-classificados (por estimativa de krigagem ordinária) de cada tipo cerâmico. Na presente dissertação, optou-se por primeiro avaliar as reservas recuperáveis globais totais (independente de classificação cerâmica), para depois conjugar os dois critérios (item 4.5.2.3).

A variabilidade das reservas recuperáveis pode ser visualizada na Figura 4.14. É notória a sensibilidade da redução do montante de reservas

recuperáveis com o aumento do grau de seletividade: de um patamar de aproximadamente 300.000 t para menores espessuras mínimas mineráveis passa-se a pouco mais de 100.000 t quando a espessura mínima de 1,0 m é requerida para a lavra. Isso representa três vezes menos reservas, podendo inviabilizar a abertura de uma mina se o consumo médio mensal da matéria-prima for significativo, e a resultante curta vida útil da mina não justificar o investimento em um empreendimento mineiro. Conforme se observa nesta figura citada e na Tabela 4.2, a redução de tonelagens é mais forte para espessuras superiores a 0,70 m.

A Tabela 4.2 quantifica a instabilidade (ou risco) em predições de reservas recuperáveis segundo critérios exclusivamente de seletividade mineira. A incerteza tende a ser maior com o aumento da espessura mínima minerável, não sendo simétrica a oscilação em torno de valores medianos, conforme as curvas da Figura 4.14 e os percentuais da Tabela 4.2 revelam. Métodos de lavra requerendo maior espessura mínima minerável, além de resultarem em drástica redução nas tonelagens recuperáveis de argila, acarretariam em uma maior margem de erro nas predições globais de reservas.

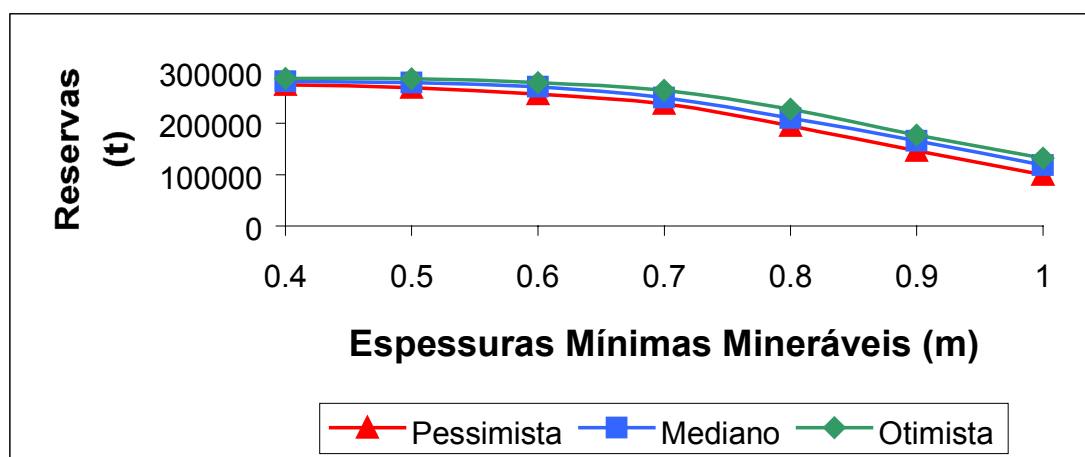


Figura 4.14 - Curvas mostrando cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis segundo diferentes níveis de seletividade mineira.

**Tabela 4.2 - Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano segundo diferentes níveis de seletividade mineira, mostrando entre parênteses oscilações percentuais em relação a valores medianos.**

<b>Espessura Mínima Minerável (m)</b>	<b>Cenário Pessimista (t)</b>	<b>Cenário Mediano (t)</b>	<b>Cenário Otimista (t)</b>
0,40	274.801 (-2,48%)	281.792	287.924 (+2,18%)
0,50	270.021 (-3,29%)	279.218	287.320 (+2,90%)
0,60	257.143 (-5,37%)	271.724	279.677 (+2,93%)
0,70	238.523 (-4,56%)	249.931	264.578 (+5,86%)
0,80	195.112 (-7,40%)	210.706	227.391 (+7,92%)
0,90	147.268 (-11,28%)	165.989	177.132 (+6,71%)
1,00	99.533 (-16,07%)	118.589	132.461 (+11,70%)

É também relevante para este tipo de aplicação avaliar a área envolvida na lavra. Quando vários depósitos estão sendo comparados para selecionar um deles para lavra de um determinado tipo de argila, a área superficial atingida impacta economicamente o projeto como um todo, pois custos estão envolvidos na aquisição de terrenos e na recuperação ambiental. Oscilações no fator de recuperação em  $t/m^2$  são importantes nos processos de tomada de decisões mineiras mencionados anteriormente. Embora com a significativa redução no total de reservas recuperáveis associada ao progressivo aumento da seletividade mineira, conforme discutido anteriormente, a Figura 4.15 mostra que métodos mais seletivos acarretam num rendimento médio em  $t/m^2$  aproximadamente 30% maior quando se passa de espessuras mínimas de 0,40 para 1,00 m. De forma análoga à análise de incerteza nas tonelagens recuperáveis, essa figura identifica cenários extremos e medianos para cada nível de seletividade mineira considerado.



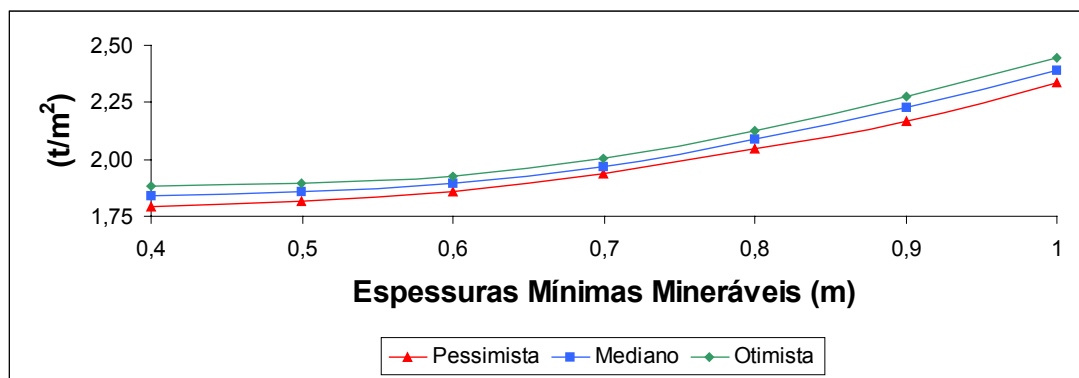


Figura 4.15 - Curvas mostrando cenários extremos e mediano de recuperação em  $t/m^2$  segundo diferentes níveis de seletividade mineira.

#### 4.5.2.2 Critérios Cerâmicos

Seguindo a sistemática adotada no item 4.5.1.2, a análise global de reservas recuperáveis a seguir discutida foi realizada independentemente de espessuras simuladas nos blocos, considerando a variabilidade dos atributos de qualidade de forma conjunta, e verificando totais de reservas simuladas segundo diferentes níveis de confiabilidade. A exemplo do item anterior, aqui foram selecionados os cenários globais extremos e medianos para cada índice de confiabilidade considerado (de 50 a 100%), formando as curvas de parametrização apresentadas na Figura 4.16.

A análise conjunta da Figura 4.16 e da Tabela 4.3 permite a visualização do impacto do total de tonelagens para diferentes índices de certeza de ocorrência de argila cerâmica. Especialmente para índices de confiabilidade maiores que 90%, caracterizando margens de risco mínimas, a taxa de decréscimo (inclinação nas curvas) para reservas recuperáveis com segurança aumenta consideravelmente. O clássico índice mínimo de 95% de certeza de lavra de argila preenchendo os necessários requisitos cerâmicos significa tonelagens recuperáveis de aproximadamente 70.000 t, valor baixo que pode inviabilizar a abertura de mina dependendo da demanda. Por outro lado, uma postura mais otimista e/ou mais flexível em termos de exigência de homogeneidade do material nos processamentos cerâmicos pode triplicar esse montante.

A exemplo das curvas de parametrização apresentadas nas figuras anteriores, a Figura 4.16 indica, para cada índice de confiabilidade de ocorrência de argila cerâmica, os cenários otimista, pessimista e mediano. A Tabela 4.3 mostra que essas oscilações são percentualmente pequenas (máximo de 4,20%) e aproximadamente simétricas em torno de valores medianos. Isso significa que, ao adotar-se um índice mínimo de confiabilidade (e.g., 80%) para ocorrência de argila cerâmica no suporte de blocos 25m x 25m, a margem de erro em torno da recuperação total de reservas será relativamente pequena.

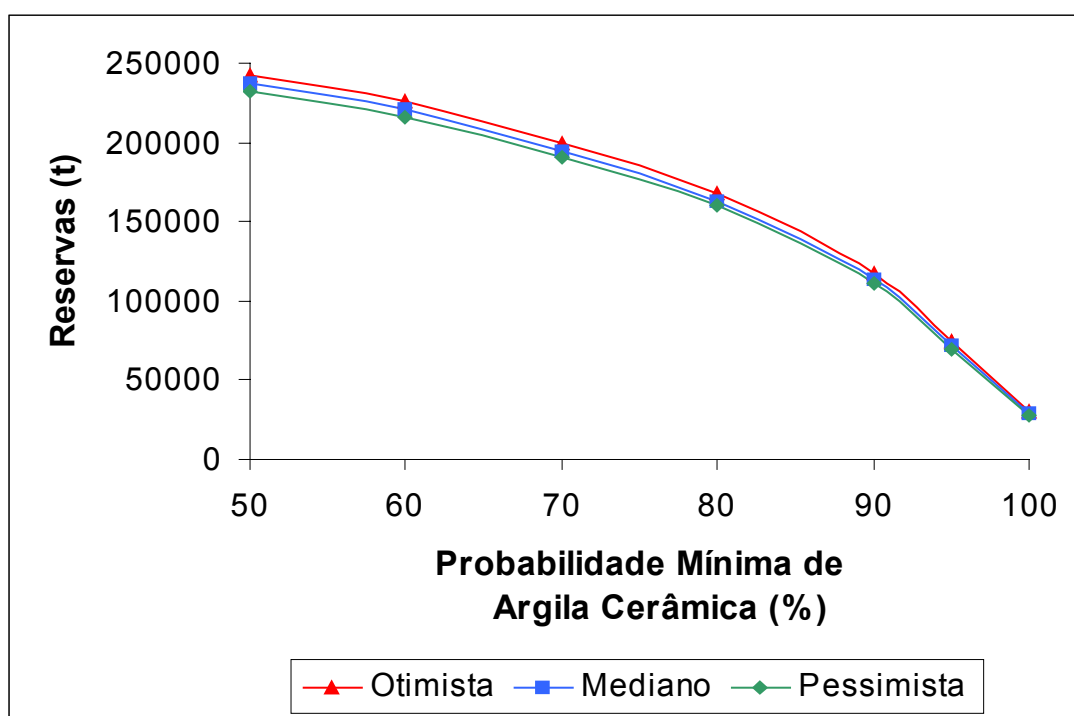


Figura 4.16 - Curvas mostrando cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis segundo diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica medidos bloco-a-bloco.

**Tabela 4.3 - Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano segundo diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica, mostrando entre parênteses oscilações percentuais em relação a valores medianos.**

<b>Probabilidade Mínima de Argila Cerâmica (%)</b>	<b>Cenário Pessimista (t)</b>	<b>Cenário Mediano (t)</b>	<b>Cenário Otimista (t)</b>
50	232.767 (-2,12%)	237.805	243.031 (+2,20%)
60	216.071 (-2,29%)	221.130	226.566 (+2,46%)
70	190.507 (-2,14%)	194.676	199.523 (+2,49%)
80	160.480 (-1,57%)	163.036	167.810 (+2,93%)
90	111.023 (-2,19%)	113.505	116.943 (+3,03%)
95	69.013 (-4,02%)	71.904	73.921 (+2,80%)
100	28.364 (-4,08%)	29.569	30.810 (+4,20%)

As Figuras 4.17 e 4.18 demonstram o que aconteceria com valores médios dos parâmetros de qualidade ao adotar-se diferentes graus de confiabilidade (=probabilidade mínima de ocorrência de argila cerâmica). Para absorção d'água, os valores mantêm-se aproximadamente constantes, com uma suave queda para índices mais altos de certeza, mesmo assim um pouco acima do limite superior máximo requerido para argilas mais nobres, do tipo Monoporosa (15%). Para retração linear, as diferenças são mais significativas ao aumentar-se as exigências em termos de chance de ocorrência de argila nos padrões requeridos. Valores mais baixos tendem a ser obtidos com o aumento dessas exigências, atingindo nos níveis mais elevados ( $\geq 90\%$ ), o intervalo requerido para argila monoporosa ( $\leq 1,5\%$ ). Numa hipótese conservadora ao extremo, um quadro prevendo a lavra de blocos exclusivamente com 100% de certeza de ocorrência de argila cerâmica garantiria em média uma matéria-prima de boa qualidade, do tipo Biqueima mas já no limite para o tipo Monoporosa. Porém as toneladas totais seriam muito reduzidas, de aproximadamente 30.000 t.

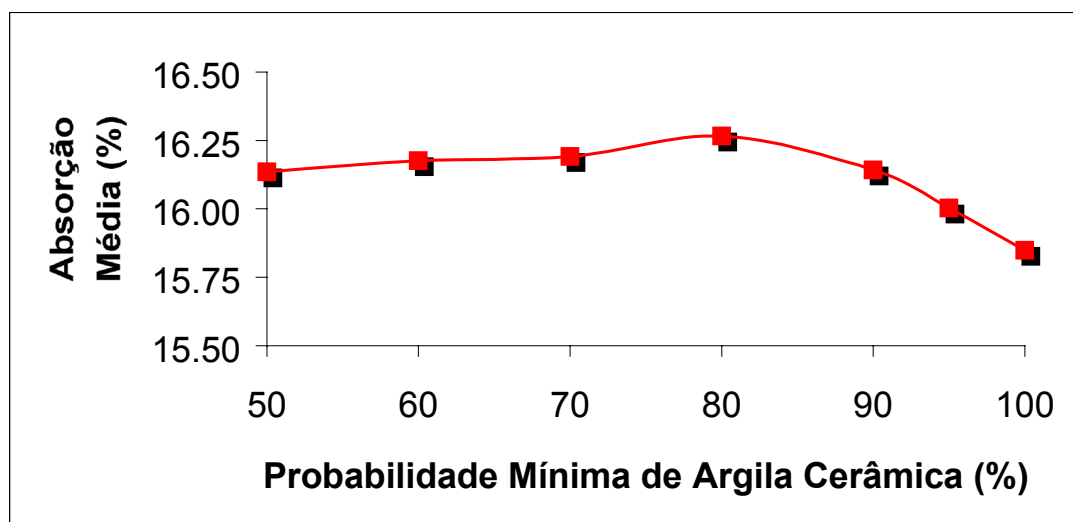


Figura 4.17 - Valores simulados médios de absorção d'água para diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica (suporte 25m x 25m).

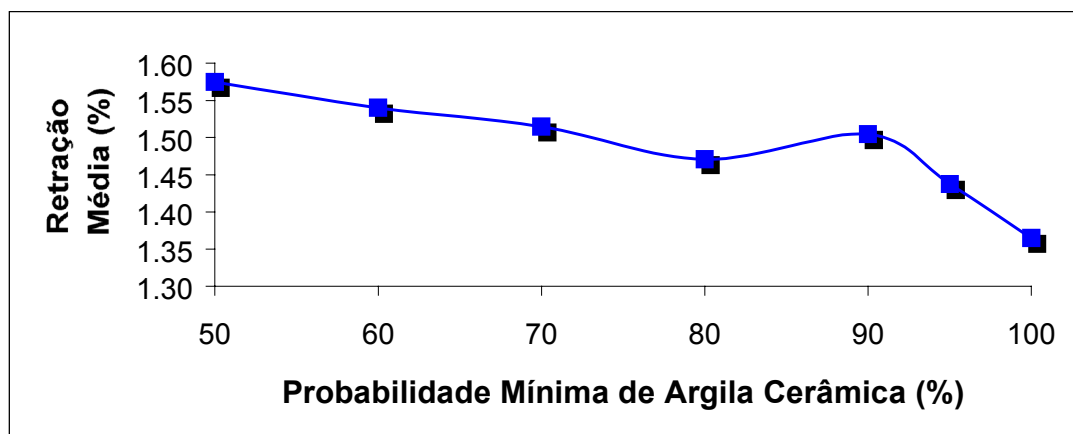


Figura 4.18 - Valores simulados médios de retração linear para diferentes níveis de chance de ocorrência de argila cerâmica (suporte 25m x 25m).

A análise de reservas recuperáveis, adotando um enfoque probabilístico sob critérios de qualidade, permite a apreciação de benefícios e riscos associados na performance da argila nos processos cerâmicas para os quais será destinada. Diferentes níveis de certeza podem ser adotados, conforme a política vigente na empresa mineradora e/ou consumidora da argila do depósito em estudo, e tonelagens resultantes podem ser obtidas para cada situação. Isso possibilita antecipar diferentes possíveis situações, suas chances de ocorrência e impactos nos resultados advindos.

#### 4.5.2.3 Combinação de Critérios Mineiros e Cerâmicos

Da mesma forma que a avaliação local de reservas recuperáveis só se torna completa quando são considerados conjuntamente critérios de seletividade mineira e critérios de qualidade cerâmica (item 4.5.1.3), a avaliação global de reservas recuperáveis é mais abrangente e realista quando os dois critérios são combinados e tomados em consideração simultaneamente. O trabalho de Stangler et al. (2001a), Apêndice A, no qual para a análise de reservas recuperáveis realizada com o mesmo banco de dados do presente trabalho somente a espessura foi simulada e avaliada, já recomendava como possível refinamento do trabalho o uso de simulações de variáveis de qualidade, integrando todas as incertezas numa análise mais completa de riscos, local e globalmente.

A aplicação da premissa da independência estocástica entre a magnitude de valores simulados de espessura e as chances de ocorrência de argila cerâmica em um bloco (item 4.5.1.3) é estendida à presente análise global. A probabilidade de ocorrência de argila enquadrável como cerâmica em um bloco, condicionalda à espessura acima de um determinado limite mínimo minerável, corresponde portanto simplesmente à multiplicação das duas probabilidades independentes.

Um tipo de abordagem de curvas de parametrização similar ao utilizado nos dois subitens anteriores é aqui aplicado, tomando espessuras definidas (em intervalos de 0,10 m, de 0,40 m até 1,00 m). Para cada caso são identificados os cenários extremos e medianos, em grupos distintos conforme a probabilidade da argila ser cerâmica.

A Figura 4.19 apresenta as reservas recuperáveis segundo diferentes níveis de seletividade agrupadas em três diferentes níveis de confiabilidade de ser cerâmica. A Tabela 4.4 apresenta os números correspondentes. Os procedimentos de construção das curvas de parametrização de reservas, segundo critérios mistos, são descritos abaixo (onde AC = argila cerâmica, e esp = espessura de argila).

- (i) Cálculo de probabilidades bloco-a-bloco de ocorrência de AC: proporção dos cinquenta valores simulados por bloco classificáveis

- como tal, gerando uma série de valores compreendidos no intervalo [0,1];
- (ii) Seleção de um grupo de blocos (sub-banco de dados) com uma dada probabilidade mínima de ser A.C. [e.g.,  $P \geq 50\%$  ( $P \geq 0,50$ ): 199 blocos de um total de 245 blocos];
  - (iii) Para essa série de dados selecionada, filtragem dos blocos acima de uma determinada espessura (e.g.,  $esp. \geq 0,60$  m);
  - (iv) Cálculo das médias de espessura por realização, obtida a partir de um número variável de blocos selecionados (e.g., para  $P_{esp \geq 0,60m} | P_{AC \geq 50\%}$ , observa-se o número de blocos no intervalo [186,195];
  - (v) Cálculo de reservas realização por realização, multiplicando o número de blocos selecionados (para o exemplo acima, entre 186 e 195) pela respectiva média, área constante de bloco ( $625 \text{ m}^2$ ), e pelo peso específico assumidamente constante, igual a  $2 \text{ t/m}^3$ ;
  - (vi) Para as cinquenta tonelagens obtidas (cinquenta possíveis cenários), seleção dos cenários mínimo, mediano e máximo de reservas;
  - (vii) Repetição do mesmo procedimento para cada espessura mínima minerável (0,40 a 1,00 m), em cada grupo de probabilidades mínimas de argila cerâmica (no caso ilustrado na Figura 4.20 e Tabela 4.3, foram selecionados três grupos:  $P_{AC \geq 50\%}$ ,  $P_{AC \geq 80\%}$ ,  $P_{AC = 100\%}$ );
  - (viii) Plotagem e união dos pontos de mesma categoria de cenário para cada sub-grupo de probabilidade mínima de argila cerâmica, formando as curvas de parametrização de reservas.

Como seria de se esperar, as reservas recuperáveis diminuem sua magnitude prevista em relação ao mesmo grau de exigência dos dois tipos de critérios tomados isoladamente. Quanto maior a probabilidade mínima da argila avaliada ser aproveitável na indústria cerâmica, além de menor a tonelagem total para mesmas espessuras mínimas (queda drástica ao passar de níveis de certeza de 80% para 100%), menor será a taxa de decréscimo do total de reservas ao aumento da espessura mínima minerável (menor a inclinação nas curvas). Além disso, dispersões máximas em torno de

cenários medianos, caracterizando cenários extremos (pessimista e otimista), apresentam similar padrão de oscilação verificado para reservas recuperáveis segundo critérios exclusivamente mineiros (Figura 4.14 e Tabela 4.2): a incerteza nas predições aumenta na medida em que se aumenta a espessura mínima minerável, para um dado índice de confiabilidade de ocorrência de argila cerâmica.

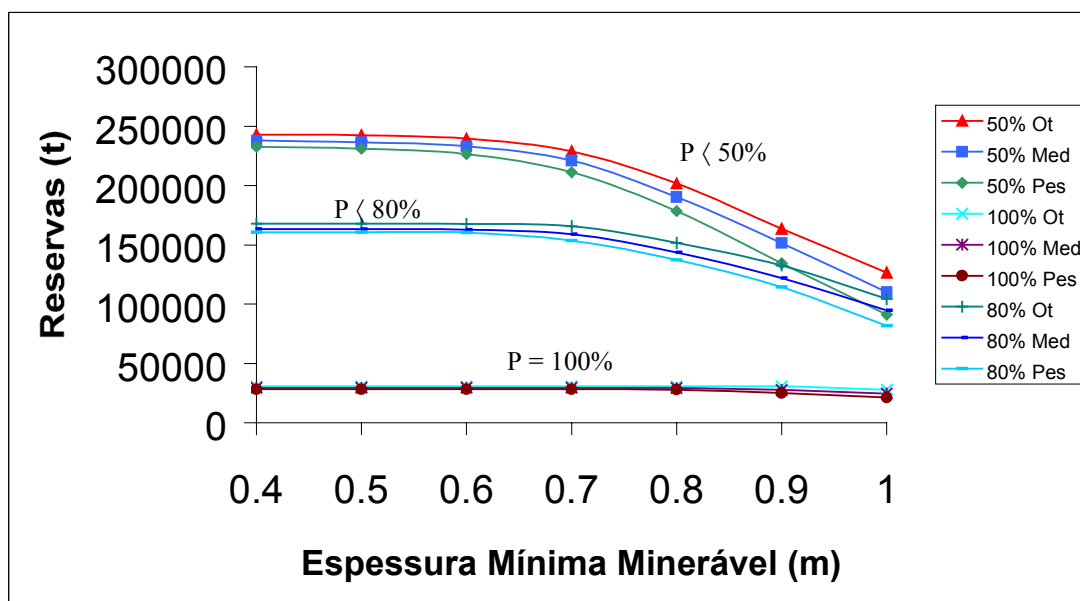


Figura 4.19 - Cenários extremos e mediano de reservas recuperáveis conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica (50, 80 e 100%) e sete diferentes níveis de seletividade mineira (P = chance de ocorrência de argila cerâmica; Ot = cenário otimista; Med = cenário mediano; Pes = cenário pessimista).

É interessante observar que, para espessuras maiores que 0,90 m há uma sobreposição entre as curvas de cenário pessimista, das reservas computadas para blocos com probabilidade mínima de 50% de conter argila cerâmica, e a de cenário otimista, para probabilidade mínima de 80% de ocorrência de argila cerâmica. Isso demonstra a infinidade de diferentes situações para as quais podem ser previstas as chances de ocorrência, denotando a versatilidade desse tipo de análise de riscos.

Novamente uma postura exigente, conservadora, requerendo segurança de 100% na lavra de material aproveitável na indústria cerâmica, resulta em tonelagens bastante reduzidas de argila recuperável, mesmo para maior seletividade mineira. Por outro lado, tonelagens mais expressivas (e.g., maiores que 200.000 t), podem somente resultar efetivamente em reservas

recuperáveis mediante riscos de até 50% em encontrar uma argila fora dos padrões requeridos e a necessidade de métodos mais seletivos. Em algum local intermediário o minerador deverá achar seu ponto de equilíbrio riscos/seletividade mineira/tonelagens recuperadas, e para isso acredita-se que o tipo de análise apresentado seja suficientemente elucidativo e orientativo à tomada de decisões mineiras relacionadas.

**Tabela 4.4 - Quadro de reservas recuperáveis em cenários extremos e mediano conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica e diferentes níveis de seletividade mineira.**

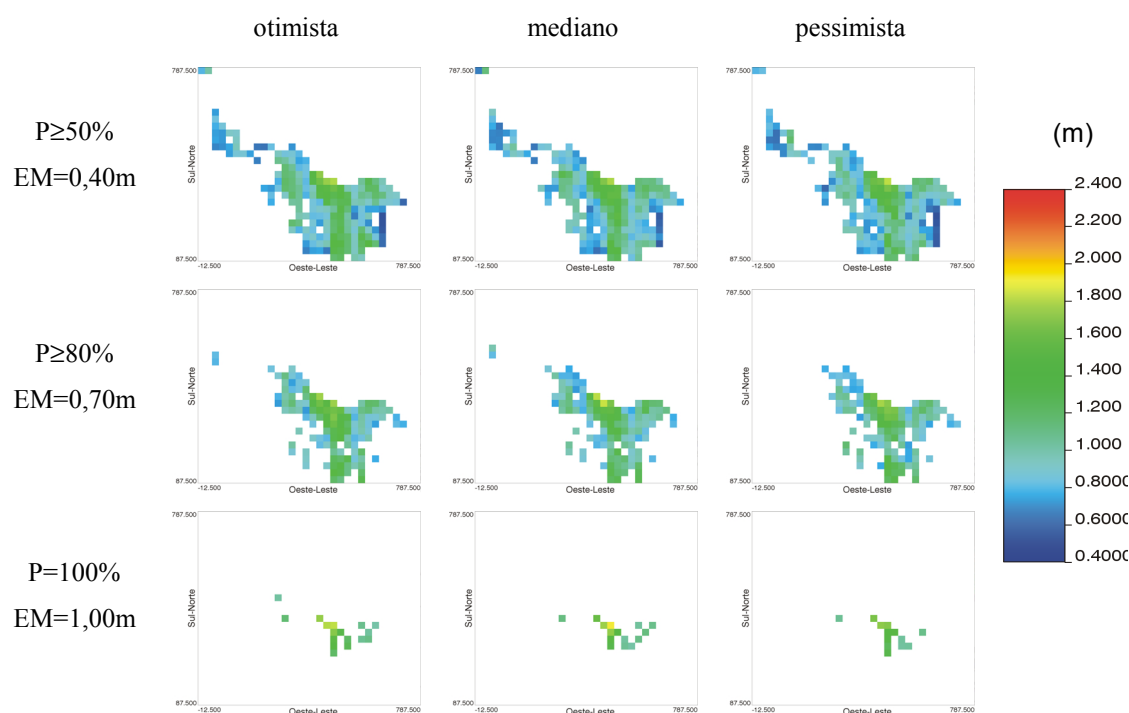
EM (m)	P < 50 %			P < 80 %			P = 100 %		
	Pes (t)	Med (t)	Ot (t)	Pes (t)	Med (t)	Ot (t)	Pes (t)	Med (t)	Ot (t)
0,4	232.767 (-2,18)	237.947	243.031 (+2,14)	160.480 (-1,67)	163.207	167.810 (+2,82)	28.364 (-4,19)	29.604	30.810 (+4,07)
0,5	231.056 (-2,30)	236.487	242.296 (+2,46)	160.480 (-1,67)	163.207	167.810 (+2,82)	28.364 (-4,19)	29.604	30.810 (+4,07)
0,6	226.467 (-2,85)	233.103	239.557 (+2,77)	160.362 (-1,45)	162.728	167.518 (+2,94)	28.364 (-4,19)	29.604	30.810 (+4,07)
0,7	211.221 (-4,40)	220.936	228.853 (+3,58)	153.575 (-3,43)	159.022	165.823 (+4,28)	28.364 (-4,19)	29.604	30.810 (+4,07)
0,8	178.425 (-6,20)	190.223	201.643 (+6,00)	137.305 (-4,42)	143.661	151.726 (+5,61)	27.915 (-4,87)	29.344	30.810 (5,00)
0,9	134.376 (-11,31)	151.516	163.516 (+7,92)	114.255 (-6,25)	121.871	132.710 (+8,89)	25.104 (-9,47)	27.729	30.810 (11,11)
1,0	91.151 (-17,24)	110.145	126.690 (+15,02)	81.689 (-13,79)	94.761	104.463 (+10,24)	21.277 (-14,12)	24.774	27.975 (12,92)

OBS.: P = probabilidade de argila cerâmica; EM = espessura mínima minerável; Pes = cenário mais pessimista; Med = cenário mediano; Ot = cenário mais otimista; entre parênteses: oscilação em torno da mediana em percentual, para cada espessura mínima minerável.

A Figura 4.20 apresenta os blocos incluídos em três situações distintas, envolvendo os dois tipos de critérios, cerâmicos e mineiros: (i) extremamente tolerável em termos de seletividade e grau de confiabilidade de atendimento a requisitos de qualidade; (ii) extremamente exigente em ambos os aspectos; (iii) caso intermediário. Para cada uma das três situações listadas acima, foram plotados os casos extremos pessimista e otimista, além do caso mediano, resultando num total de nove mapas (note que o número de blocos é variável entre os três cenários de mesmas



condições de seletividade mineira e confiabilidade de qualidade cerâmica). A análise visual destes mapas permite verificar claramente que o isolamento de alguns blocos acarretaria inevitavelmente numa redução do montante de reservas recuperáveis, decorrente de prováveis restrições operacionais advindas.



**Figura 4.20 – Mapas de espessura recuperável de argila conjugando três diferentes níveis de chance mínima de ocorrência de argila cerâmica e três diferentes níveis de seletividade mineira (P = chance de ocorrência de argila cerâmica; EM = espessura mínima minerável).**

Inúmeras outras combinações de diferentes espessuras mínimas seletivas e diferentes graus de confiabilidade na qualidade cerâmica podem ser visualizados em mapa, o que junto às curvas de parametrização apresentadas anteriormente (Figura 4.19), podem vir a constituir importantes e flexíveis ferramentas no planejamento de lavra.

#### 4.5.2.4 Comparativo com Outras Metodologias

A maneira mais tradicional de análise de reservas recuperáveis, a partir dos resultados de krigagem ordinária em blocos, é ilustrada a seguir

para o depósito em estudo, a título comparativo com a análise anteriormente apresentada. A Figura 4.21 mostra as curvas de parametrização de reservas resultantes das estimativas por krigagem apresentadas no Capítulo 3, aplicando os mesmos critérios mineiros e cerâmicos empregados para a análise via simulações estocásticas.

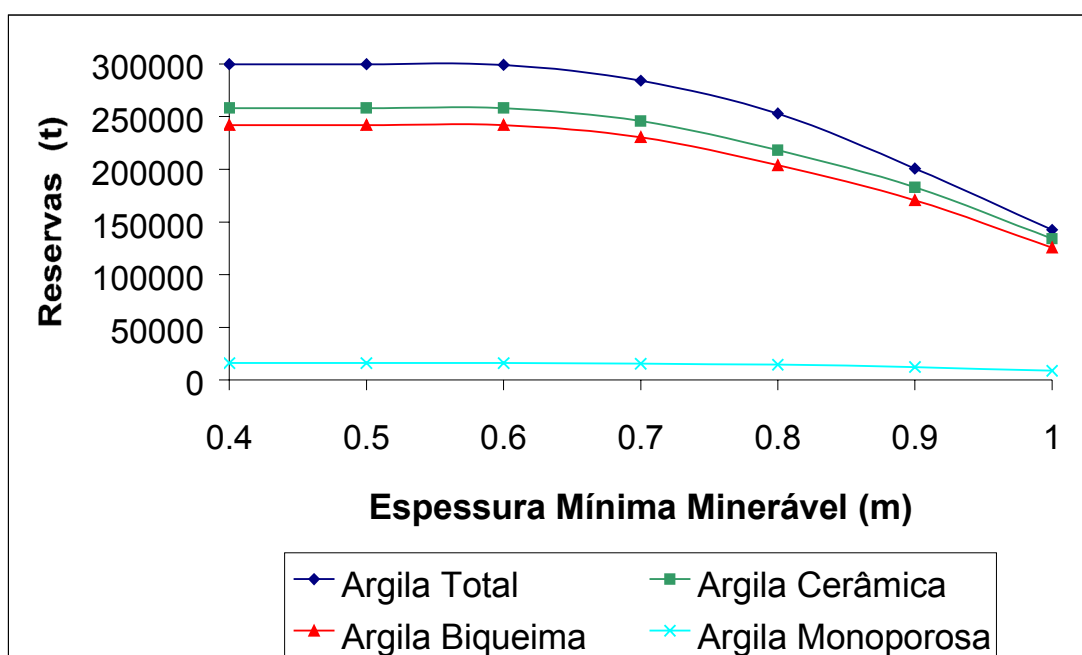


Figura 4.21 - Curvas de reservas recuperáveis estimadas por krigagem ordinária em blocos (argila cerâmica = argila biqueima + argila monoporosa).

As tonelagens recuperáveis estimadas por krigagem ordinária praticamente mantém-se estáveis para espessuras de até 0,70 m para os diferentes grupos considerados. Tendências observadas podem ser verificadas numericamente na Tabela 4.5. Para tonelagens considerando apenas níveis distintos de seletividade mineira (coluna « Argila Total »), percebe-se que há uma superestimativa da krigagem em relação aos montantes obtidos por simulações. Isso segue uma tendência natural, visualizável na Figura 4.2b (« efeito informação ») e discutido em Isaaks & Srivastava (1989, p.483-486) e Myers (1996, p.309-313), concernente ao posicionamento dos valores de referência (no caso, espessuras mínimas mineráveis) em relação à média. Para situações como a presente, quando esses valores são menores que a média (exceto para a espessura de 1,00 m, ligeiramente maior que a média krigada de 0,979 m), a tonelagem

recuperável tende a ser maior para valores krigados do que para os simulados, para os quais a dispersão mais realística dos valores é considerada. Assim, os percentuais indicados entre parênteses na Tabela 4.5 mostram que essa superestimativa vai aumentando progressivamente à medida em que se aumenta a espessura mínima minerável, até a espessura de 1,00 m quando essa diferença começa a cair.

**Tabela 4.5 - Quadro de reservas recuperáveis estimado por krigagem ordinária em blocos, segundo diferentes níveis de seletividade mineira.**

<b>Espessura Mínima Minerável (m)</b>	<b>Argila Total (t)*</b>	<b>Argila Cerâmica (Bq+Mp) (t)</b>	<b>Argila Biqueima (t)</b>	<b>Argila Monoporosa (t)</b>
0,4	299.743 (+6,37%)	258.132	242.000	16.133
0,5	299.743 (+7,35%)	258.132	242.000	16.133
0,6	299.000 (+10,04%)	258.132	242.000	16.133
0,7	284.226 (+13,72%)	245.822	230.454	15.369
0,8	253.021 (+20,08%)	218.227	203.790	14.437
0,9	200.796 (+20,97%)	182.940	170.665	12.275
1,0	142.460 (+20,13%)	134.159	125.507	8.651

OBS.: Bq = argila do tipo biqueima; Mp = argila do tipo monoporosa; \*: nesta coluna os números entre parênteses representam a diferença percentual superestimada em relação ao cenário mediano da Tabela 4.2, para mesmas espessuras.

A Figura 4.22 justapõe no mesmo gráfico as funções de recuperação obtidas por diferentes métodos em diferentes suportes, a diferentes níveis de seletividade mineira para a argila total cubada (independente de sua classificação cerâmica). A Tabela 4.6 apresenta os números correspondentes. No caso da curva dos polígonos de influência, manteve-se o mesmo suporte em blocos de 25 m x 25m utilizado nas simulações e krigagem, simplesmente atribuindo ao bloco como um todo o valor de espessura correspondente ao intervalo amostrado para o furo no centro deste bloco. Para os blocos com ausência de furos, tomou-se o valor do furo mais

próximo ou a média destes, no caso de apresentarem mesmas distâncias ao centro dos blocos nesta situação.

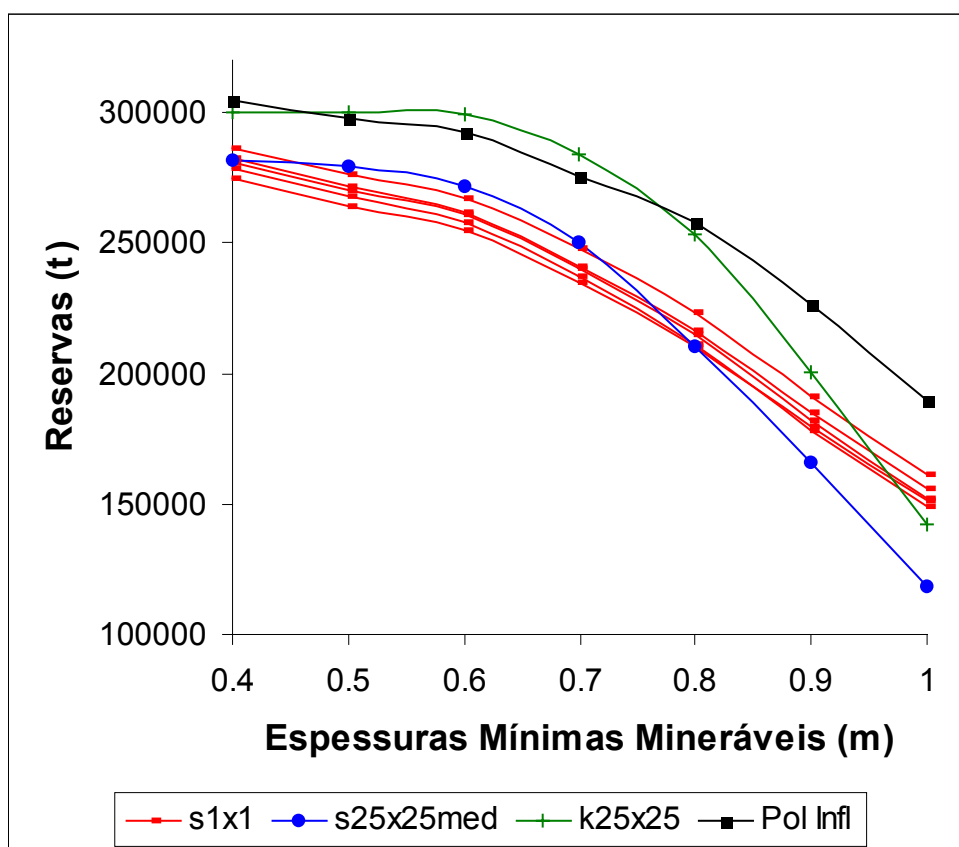


Figura 4.22 – Curvas de parametrização de reservas obtidas a partir de: s1x1 = simulações no suporte 1m x 1m; s25x25med = simulações no suporte 25m x 25m (cenário mediano); k25x25 = krigagem de blocos 25m x 25m; Pol Infl = polígonos de influência em blocos 25m x 25m.

Algumas feições são evidentes na Figura 4.22:

- (i) dois pares de curvas aproximadamente coincidentes entre si, pelo menos até a espessura de 0,8 m:
  - mais acima, indicando estimativas de comparativamente maiores reservas: krigagem em blocos 25m x 25m e blocos com o valor do ponto central (polígonos de influência);
  - mais abaixo, simulações 1m x 1m e 25m x 25m;

- (ii) dois pares de curvas aproximadamente paralelas entre si, tendendo suavemente a convergir ao aumento de espessura mínima:
  - pontos e « quase-pontos »: polígonos de influência acima e simulações 1m x 1m abaixo;
  - blocos 25m x 25m: krigagem acima e simulações abaixo;
- (iii) o cruzamento, em ângulo razoavelmente acentuado, entre as curvas das simulações no suporte quase-pontual e a curva da krigagem, na altura da espessura mínima minerável de 0,95m aproximadamente;
- (iv) o paralelismo e similaridade entre si no comportamento das cinco curvas de simulação no suporte 1m x 1m.

Para (i), no caso das curvas superiores de krigagem e polígonos de influência, seu posicionamento denota em primeiro lugar o aspecto já discutido ao longo dessa dissertação: superestimativa em geral para reservas obtidas por polígonos de influência. Para a krigagem, sua estabilização e superestimativa para espessuras mais baixas, juntamente com o forte declínio da curva e na respectiva recuperabilidade das reservas para condições menos seletivas de lavra, reflete diretamente o já discutido nesse item: o efeito suavizador da krigagem e o posicionamento dos « *cut-offs* » em valores na maior parte menores que a média. Nesse sentido se explica também o cruzamento das curvas reportado em (iii), resultando em subestimativas da krigagem para espessuras mínimas maiores que 1 m, em relação às simulações em malha fina.

O paralelismo das curvas mencionado em (ii) pode ser atribuído ao efeito suporte discutido anteriormente. O quase horizontalismo das curvas relacionadas ao suporte dos blocos para espessuras mais baixas, seguidas de um abrupto incremento no gradiente de redução da recuperabilidade das reservas, contrapondo a um gradiente mais suave e homogêneo das curvas obtidas para o suporte pontual, reflete a redução da variabilidade ao aumento

de suporte para blocos de lavra. O posicionamento das curvas de simulação mais abaixo, implicando em menor recuperação dos recursos geológicos, é decorrente do impacto da preservação da variabilidade da espessura no caso das predições a partir das simulações – preservando assim espessuras extremas mais baixas. Entre os dois grupos simulados (suportes 1m x 1m e 25m x 25m), o declínio das reservas observado para espessuras maiores em se considerando blocos 25m x 25m reflete novamente o efeito suporte.

Finalmente, as feições de convergência observadas em (iv) atestam a ergodicidade do modelo aplicado, também impactante na análise de reservas recuperáveis.

**Tabela 4.6 - Quadro de reservas recuperáveis (t) estimado por diferentes métodos e suportes.**

EM (m)	Simu 1m					Simu 25m	Krig 25m	PI 25m
0,4	286.224	274.963	282.629	281.124	278.849	281.792	299.743	304.474
0,5	276.045	264.135	271.492	270.526	267.774	279.218	299.743	297.973
0,6	267.198	254.805	261.986	261.056	258.146	271.724	299.000	292.347
0,7	247.619	234.570	241.233	240.435	236.940	249.931	284.226	275.482
0,8	223.535	210.703	216.771	215.033	210.998	210.706	253.021	257.837
0,9	191.404	179.364	184.895	182.002	178.175	165.989	200.796	226.378
1,0	161.427	151.095	155.929	152.027	148.775	118.589	142.460	189.958

OBS.: EM = espessura mínima minerável; Simu 1m = 5 realizações aleatoriamente tomadas no suporte 1m x 1m; Simu 25m = cenário mediano para simulações no suporte 25m x 25m; Krig 25m = krigagem no suporte 25m x 25m; PI = polígono de influência para suporte 25m x 25m.

A discussão acima justifica a opção de se fazer toda a análise de reservas recuperáveis apresentada ao longo desse item a partir de simulações, no suporte 25m x 25m, ao mesmo tempo preservando a variabilidade do atributo, fundamental em estudos de cunho não-linear como o presente, e aplicando o suporte a ser efetivamente utilizado na lavra.

Mostra-se patente a inapropriedade na aplicação de krigagem ordinária na avaliação de reservas recuperáveis para o presente estudo de caso. Além da suavização habitual da krigagem levando a uma

superestimativa das reservas para o caso específico, não se tem disponível nenhuma informação sobre a incerteza sobre as previsões, como no caso das figuras com curvas de parametrização apresentadas. Mesmo a classificação cerâmica adquire uma conotação mais realista com a aplicação de simulações, propiciando previsões de reservas a partir de margens de segurança determinadas. Da mesma forma, acredita-se que todas as restrições apontadas ao longo dessa dissertação em relação ao perigo do uso do método de polígonos de influência em estimativas, de uma maneira geral, foram acima devidamente exemplificadas de forma quantitativa.

#### **4.6 Discussão dos Resultados**

As simulações realizadas permitiram uma avaliação da variabilidade da argila ocorrente no depósito em estudo para as três variáveis de interesse. A combinação dos resultados obtidos propiciou a quantificação de reservas recuperáveis sob diferentes aspectos, sempre mantendo um enfoque probabilístico, onde riscos nas previsões foram quantificados.

As tonelagens obtidas mostraram uma sensibilidade maior de redução especialmente para espessuras mínimas mineráveis maiores que 0,70 m, paralelamente ao incremento de seu âmbito de incerteza. Isso denota a relevância da escolha de métodos mais seletivos de lavra para um aproveitamento mais amplo dos recursos da jazida.

O montante de reservas recuperáveis mostra-se altamente sensível ao grau de confiabilidade empregado à classificação como argila cerâmica, i.e., na discriminação minério/estéril. Índices mais altos, por exemplo maiores que 80%, reduzem drasticamente os totais de argila, implicando possivelmente na inviabilidade de abertura de mina para exigências de margens de riscos pequenas, no caso de demandas mensais serem relativamente altas, encurtando a vida útil da jazida. Esse impacto é acentuado quando níveis de seletividade mineira são considerados simultaneamente.

A independência estatística entre espessura da argila e suas propriedades cerâmicas foi investigada e assumida como tal. A partir dessa premissa, probabilidades condicionadas de ocorrências de argila bloco-a-

bloco preenchendo requisitos cerâmicos e mineiros puderam ser facilmente calculadas. Para a combinação dos critérios na análise global, embora apenas três probabilidades (50, 80 e 100%) tenham sido estrategicamente selecionadas para demonstrativo, qualquer outro índice de interesse poderá ser aplicado dependendo das circunstâncias, utilizando a mesma idéia básica.

A porção centro-leste da planície configura-se como a mais favorável tanto em termos de seletividade mineira quanto na garantia de aproveitamento cerâmico adequado. Em contra-partida, a sua porção NW, mais isolada, além de valores esperados pouco encorajadores, apresenta uma instabilidade muito grande nas previsões em geral.

As baixas probabilidades de ocorrência de argila monoporosa e as margens de erro calculadas para chances da argila ser cerâmica, mesmo em seu tipo menos nobre (biqueima), mostram o perigo nas classificações cerâmicas locais a partir de estimativas por krigagem, incorrendo em riscos de equívocos e problemas nos processamentos cerâmicos posteriores. A superestimativa verificada para o cálculo global de reservas recuperáveis a partir de métodos como krigagem ordinária e especialmente polígonos de influência pode comprometer otimisticamente investimentos posteriormente frustrantes. Para ambos os casos, as simulações estocásticas obtidas pelo método de simulação seqüencial Gaussiana mostram sua adequabilidade para a avaliação de recuperabilidade dos recursos anteriormente estimados, em especial ao levar em consideração instabilidades nas previsões. É assim quantificado o grau de desconhecimento assumido do depósito em estudo, propiciando um melhor embasamento na tomada de decisões mineiras.



# Capítulo 5

## Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

Neste item são apresentadas considerações finais conclusivas, relacionadas à dissertação como um todo. Inicialmente uma síntese dos resultados básicos obtidos é apresentada. Uma metodologia de referência para avaliações do tipo de depósito aqui estudado é a seguir proposta. Segue-se então uma discussão em torno do cumprimento dos objetivos específicos à essa dissertação, inicialmente traçados.

#### 5.1.1 Sumário dos Resultados Obtidos

Os trabalhos executados cujos resultados foram apresentados ao longo dessa dissertação permitiram, em primeiro lugar, a obtenção de estimativas de recursos geológicos distribuídos da seguinte forma:

- três subdomínios geológicos/geoestatísticos: Planície, Transição e Tálus;
- três variáveis de interesse: espessura de argila, e as variáveis de qualidade cerâmica absorção d'água e retração linear;
- três variáveis regionalizadas: espessura de argila, acumulação de absorção d'água e acumulação de retração linear;
- três produtos finais: argilas tipo Biqueima e Monoporosa, e estéril.

Subseqüentemente, a análise de reservas recuperáveis centrou-se no subdomínio Planície, significativamente mais favorável que os demais. Simulações estocásticas para as variáveis de interesse, indiretamente nos parâmetros de qualidade, permitiram a obtenção de funções de probabilidades locais, que por sua vez levaram à obtenção de funções de recuperação, apresentadas na forma de curvas de parametrização de reservas. Critérios mineiros, cerâmicos e uma combinação dos dois nortearam essa seleção de reservas, a nível local e global, os quais numa perspectiva probabilística possibilitam a apreciação de inúmeros cenários, fundamentais nos processos de decisão em investimentos mineiros. Nessa avaliação a distinção entre a argila tipo Biqueima e Monoporosa não se mostrou prática, optando-se por distinguir nas estimativas simplesmente em “argila cerâmica” e “argila fora dos padrões”, i.e., minério e estéril.

Um comparativo com metodologias tradicionais de avaliação de reservas recuperáveis permitiu a constatação da maior eficiência e versatilidade da metodologia empregada, via simulações estocásticas.

### **5.1.2 Proposta Metodológica**

A meta dessa dissertação, conforme apresentado no item 1.2, consistia basicamente na criação de uma proposta metodológica de avaliação de reservas recuperáveis para esse tipo de depósito de argila cerâmica, diante de todos os problemas atualmente encontrados neste meio, decorrentes da ineficiência dos métodos tradicionalmente utilizados.

A seqüência apresentada a seguir constitui uma extensão natural do fluxograma inicial do Capítulo 1 (Figura 1.1), adaptado ao que seria a seqüência ideal de procedimento para avaliação desse tipo de reservas. Embora apresentado na forma seqüenciada, é evidente que para cada caso haverá interações específicas entre as diferentes etapas, ocasionalmente com algumas inversões de ordem ou mesmo supressões. De qualquer maneira, essa proposta almeja ser generalista e robusta o suficiente para permitir sua utilização como um guia de referência inicial, passível de adaptações e implementações específicas para o caso em estudo.

- (i) Revisão e preparação do banco de dados para tratamento geoestatístico, agrupando todas as informações geológicas relevantes, idealmente com visitas a campo;
- (ii) Compilação de todos os aspectos cerâmicos relevantes envolvidos, com compreensão do significado das variáveis de qualidade envolvidas e procedimentos amostrais e laboratoriais, adequando-as ao tratamento geoestatístico subsequente;
- (iii) Modelamento digital do terreno;
- (iv) Definição dos limites geográficos e das amostras a serem levadas em consideração na análise geoestatística subsequente;
- (v) Verificação se as amostras foram coletadas sob um mesmo suporte; em caso negativo proceder à regularização, com o uso de variáveis de trabalho (acumulações) se necessário;
- (vi) Verificação da homogeneidade geológica da área de estudo e, se necessário, subdivisão em diferentes domínios geoestatísticos;
- (vii) Definição de tratamento a ser dispensado em zonas periféricas e possíveis zonas de transição;
- (viii) Análise exploratória dos dados: mapas amostrais e histogramas, desagrupando se necessário; verificação de correlações entre as variáveis;
- (ix) Análise Estrutural / Variografia;
- (x) Krigagem ordinária e classificação de qualidade da argila em blocos de lavra, quantificando e mapeando recursos geológicos separadamente em subdomínios homogêneos;
- (xi) Análise da relação estéril-minério separadamente por subdomínios, se existentes;
- (xii) Seleção inicial de áreas potenciais para lavra, para estudo de reservas recuperáveis;
- (xiii) Definição dos fatores técnicos que fundamentarão o discernimento em recurso recuperável ou não (limitantes, “*cutoffs*”, etc.);
- (xiv) Definição do método de simulações estocásticas a ser efetivamente aplicado;
- (xv) Definição do número de realizações necessárias para a análise de variabilidade como um todo;

- (xvi) Simulações estocásticas em suporte quase-pontual (mesmo suporte amostral), mudando-o *a posteriori* para blocos de lavra;
- (xvii) Validações das simulações;
- (xviii) Análise de variabilidade bloco-a-bloco da argila e criação de probabilidades locais;
- (xix) Avaliação local (bloco-a-bloco) de reservas recuperáveis sob diferentes critérios, com produção de mapas de probabilidades;
- (xx) Avaliação global de reservas recuperáveis sob diferentes critérios, com produção de curvas de parametrização e possibilidade de auxílio a planejamento mineiro;
- (xxi) Obtenção de quadros finais de reservas recuperáveis no depósito;
- (xxii) Comparação com resultados advindos de metodologias já existentes;
- (xxiii) Reconciliação: valores estimados x valores reais.

### 5.1.3 Atendimento a Objetivos Específicos

Face aos resultados obtidos ao longo dos capítulos precedentes, tendo em mente o cumprimento dos objetivos específicos propostos no item 1.3, são apresentadas a seguir as correspondentes conclusões finais dessa dissertação.

- A devida compreensão do contexto geológico local, atuante na distribuição espacial das variáveis de interesse, é de suma importância no modelamento variográfico, e portanto na qualidade das estimativas e simulações subseqüentes. A delimitação criteriosa de subdomínios geológicos/geoestatísticos homogêneos evita mistura de populações de características estatísticas distintas, minimizando tendenciosidades nas predições;
- O uso de variáveis de trabalho (acumulações das variáveis de qualidade com respectiva espessura do intervalo amostrado), decorrente da não homogeneidade do suporte amostral, a despeito do caráter indireto do processamento como um todo mostrou sua coerência na metodologia

empregada. A cuidadosa caracterização espacial desse conjunto de variáveis permitiu a apreciação final quantitativa (tonelagens) e qualitativa (tipos cerâmicos) da substância mineral pesquisada, nas unidades de medição de real interesse na indústria relacionada, ao nível de blocos de lavra. Portanto, a aplicabilidade prática e realística da metodologia proposta foi sempre tomada em primeiro plano;

- O método tradicional de krigagem ordinária em blocos e sua característica de minimização do erro de estimativa, levando também o importante efeito suporte em consideração, mostra-se eficiente na classificação cerâmica de recursos geológicos da argila ocorrente em depósito em avaliação. O zoneamento e a quantificação setorizada desses recursos propicia uma idéia da qualidade e ordem de grandeza dos recursos existentes. O resultante discernimento de porções promissoras do depósito daquelas sem maiores perspectivas, embasa o descarte no último caso, e orienta a seqüência de trabalhos mais detalhados de avaliação de reservas recuperáveis;
- As oscilações locais e globais da argila ocorrente no depósito em estudo, tanto em termos de qualificação cerâmica quanto em termos de toneladas medidas, são apropriadamente estimadas a partir da aplicação de métodos conceitualmente simples como a simulação seqüencial Gaussiana. Os resultados obtidos permitem uma apreciação dinâmica de diferentes possíveis cenários de reservas recuperáveis, conjugando critérios industriais e de seletividade mineira a partir de uma ótica probabilística;
- O método de estimativa por polígono de influência, tradicionalmente usado neste tipo de depósito na região em estudo, mostra suas substanciais restrições quando comparado à maior elaboração da metodologia aqui empregada. A desconsideração a mudanças na variabilidade da argila em diferentes suportes, e todas as implicações decorrentes na classificação cerâmica e avaliação das reservas

recuperáveis são causadores de problemas crônicos na indústria cerâmica e mineira associada. A também completa ignorância das relações espaciais entre os valores amostrais negligencia a importância da geologia local como controladora da disposição final dos valores do atributo em estudo. Ainda, a flexibilidade da apreciação de diferentes cenários de reservas recuperáveis, a níveis local e global, indicando realisticamente riscos incorridos, é inexistente nessa metodologia tradicionalmente aplicada.

## 5.2 Recomendações

A seguir, são apontadas sugestões para desenvolvimento de possíveis futuros trabalhos, dando continuidade e aprimorando a metodologia proposta.

- Regiões de transição geológica/geoestatística, como a ocorrente no presente estudo de caso, mereceriam uma amostragem mais densificada, a fim de mapear distintas populações de forma mais clara, contribuindo na maior adequabilidade da aplicação de métodos de simulação estocástica de cunho estacionário, como o aqui empregado. A conjugação de características geológicas, cerâmicas e mineiras indicadas pelas estimativas de recursos geológicos existentes no subdomínio tálus, alicerçados pelas características sócio-econômicas locais, permitem segurança na recomendação de descarte desta porção do depósito;
- O comparativo entre diferentes métodos e diferentes suportes executado para funções de recuperação obtidas para a parametrização de reservas segundo critérios mineiros, tendo como base espessuras mínimas identificando diferentes níveis de seletividade mineira, poderia ser estruturado também para critérios cerâmicos, tendo como base os parâmetros de qualidade. Mesmo uma combinação de critérios poderia ser investigada neste comparativo, a exemplo da análise realizada a partir de simulações no suporte de blocos. Isso permitiria verificar comparativamente o impacto da aplicação de simulações estocásticas

também em termos de qualidade cerâmica, em relação a resultados obtidos a partir de métodos tradicionalmente utilizados;

- Em caso de concretização da abertura de mina no depósito estudado, uma reconciliação de valores estimados com valores reais efetivamente minerados, para as três variáveis de interesse, seria extremamente conveniente a fim de verificar a apropriação da metodologia proposta, procedendo aos devidos ajustes onde necessários.

# Referências Bibliográficas

- Agterberg, F.P. 1974. *Geomathematics*. Developments in Geomathematics 1. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 596p.
- Alabert, F. 1987a. The practice of fast conditional simulations through the LU decomposition of the covariance matrix. *Mathematical Geology*, 19(5), p.369-386.
- Alabert, F. 1987b. *Stochastic Imaging of Spatial Distributions Using Hard and Soft Information*. MSc. Thesis, Stanford University.
- Andriotti, J.L.S. 1988. Introdução à geoestatística. *Estudos Tecnológicos Acta Geologica Leopoldensia* 27. Volume XI, p.5-81.
- Armstrong, M. 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Springer, Berlin, 153p.
- Barba, A., Feli, C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., Sanz, V. & Beltrán, V. 1997. *Materias Primas para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerámicas*. Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón, 292p.
- Bonato, F.S. 2000: *Desenvolvimento de metodologia baseada em simulação geoestatística para incorporação da incerteza no planejamento de lavra*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 87p.
- Borgman, L.E. & Frahme, R.B. 1975. A case study: multivariate properties of bentonite in Northeastern Wyoming. *Advanced geostatistics in the mining industry*, Nato Advanced Study Industry, Rome, p.381-390.
- Bortoluzzi, C.A., Awdziej, J. & Zardo, S.M. 1987. "Geologia da Bacia do Paraná em Santa Catarina", em: *Textos Básicos de Geologia e Recursos Minerais de Santa Catarina*, DNPM / Coordenadoria de Recursos Minerais da Secretaria da Ciência e Tecnologia, Minas e Energia, Florianópolis, p.131-192.
- Chilès, J.P. & Delfiner, P. 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley-Interscience Publication, Wiley Series in Probability and Statistics, New York, 695p.



- Clark, I. 1979. *Practical Geostatistics*. Applied Science Publishers Ltd., London, 129p.
- Clarke, K.C. 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers & Geosciences*, Vol.12, No.5, Great Britain, p.713-722.
- Costa, J.F. 1997. *Developments in Recoverable Reserves and Ore Body Modeling*. PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, The University of Queensland, 333p.
- Cruz Júnior, A.C. 1998. *Análise das Funções de Recuperação para a Parametrização de Reservas Minerais*. Dissertação de Mestrado. IG UNICAMP, 82p.
- Cruz Júnior, A.C. & Remacre, A.Z. 2001. Impacto dos efeitos suporte e informação sobre a recuperação de reservas. *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto* (no prelo), 11p.
- David, M. 1977. *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 2. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 364p.
- David, M. 1988. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 6. Elsevier Scientific Publishers B.V., Amsterdam, 216p.
- Deutsch, C.V. 1989. DECLUS: A Fortran program for determining optimum spatial declustering weights. *Computers & Geoscience*, Vol.15, No.3, p.325-332.
- Deutsch, C.V. 1992. *Annealing Techniques Applied to Reservoir Modeling and Integration of Geological and Engineering Data*. PhD Thesis, Stanford University, 304p.
- Deutsch, C.V. & Journel, A.G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 345p.
- Dimitrakopoulos, R. 1996. Stochastic Methods for Petroleum Reservoir Characterization and Production Forecasting. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, Vol.61, No.6, p.537-548.
- Dimitrakopoulos, R. 1998. Conditional Simulation Algorithms for Modelling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimization. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol.12, No.4, p.173-179.
- Durão, F., Cortez, L., Brito, G. & Orea, S. 1999. Optimization of ceramic pastes production by modeling the chemical and physical properties of their clay components. *Proceedings, 28th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, Golden, U.S.A, p.511-518.
- Easterbrook, D. J. 1969. *Principles of Geomorphology*. McGraw-Hill, USA, 462p.

- Ehlschlaeger, C.R., Shortridge, A.M. & Goodchild, M.F., 1997. Visualizing spatial data uncertainty using animation. *Computers & Geoscience*, Vol.23, No.4, p.387-395.
- Ethridge, F.G. 1985. *Recognition of Fluvial Depositional Systems and Their Resource Potential (Cap.5)*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Oklahoma, 290p.
- Gilbert, L. E. 1989. Are topographic data sets fractal? *Pageoph*, USA, Vol.131, No.1/2, p.241-254.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 464p.
- Herzfeld, U.C., Eriksson, M.G. & Holmlund, P. 1993. On the influence of kriging parameters on the cartographic output - a study in mapping subglacial topography. *Mathematical Geology*, Vol.25, No.7, p.881-899.
- 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. & Srivastava M.R. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561p.
- Johnson, M.E. 1987. *Multivariate Statistical Simulation*, Wiley and Sons Publ., New York, 230p.
- Journel, A.G. 1974. Geostatistics for conditional simulation of ore bodies. *Economic Geology*, Vol.69, No.5, p.673-687.
- Journel, A.G. & Alabert, F. 1989. Non-Gaussian data expansion in the Earth Sciences. *Terra Nova*, 1(2), p.123-134.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press, London, 600p.
- Koch, G.S. & Link, R.F. 1970. *Statistical Analysis of Geological Data - Volume I*, John Wiley & Sons, USA, 375p.
- Krige, D.G. 1951. *A Statistical Approach to some Mine Valuations and Allied Problems at the Witwatersrand*. Master's thesis, University of Witwatersrand, South Africa.
- Krige, D.G. 1981. *Lognormal-de Wijsian Geostatistics for Ore Evaluation South African Institute of Mining and Metallurgic*. Johannesburg, 51p.
- Krige, D.G. & Rendu, J.M. 1975. The fitting of contour surfaces to hanging and footwall data for an irregular ore body. *Proceedings of the 13th International APCOM Symposium*, Clausthal, West Germany, p.C.V.1-12.
- Kukal, Z. 1971. *Geology of Recent Sediments*, Prague, Academic Press, 490p.

- Leeder, M.R. 1992. *Sedimentology: Process and Products*. Chapman & Hall, London, 344 p.
- Lefond, S.J. (editor), 1983. *Industrial Minerals and Rocks*. Volume 1. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Baltimore, 722p.
- Luís J., Soares, A., Gonzaga, J., Silva, F. & Ferreira A. 1994. Geostatistical characterization of the shape of an orebody by using mining and geological data. *Proceedings, 24th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, CIM publisher, Canada, p.402-409.
- Luster, G.R. 1985. *Raw Materials for Portland Cement – Applications of Conditional Simulation of Coregionalization*. Doctoral dissertation, Stanford University, 531p.
- Marechal, A. 1976. The practice of transfer functions: numerical methods and their application. *Proceedings, NATO ASI: Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, Rome (Oct. 1975), p.221-36.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, No.58, p.1246-1266.
- Matheron, G. 1973. *Le krigeage disjonctif*. Note du Centre de Géostatistique de Fontainebleau, Ecole des Mines de Paris, N.360.
- Matheron, G. 1984. The Selectivity of the Distributions and “The Second Principle of Geostatistics”. In: *Geostatistics for Natural Resources Characterization*. Lake Tahoe USA. D. Reidel Publishing Company, p.421-433.
- Myers, J.C. 1996. *Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty For Enviromental Sampling And Mapping*. Van Nostrand Reinhold, New York, 545p.
- Olea, R.A. 1974. Optimal contour mapping using universal kriging. *Journal of Geophysical Research*, USA, Vol.79, No.5, p.695-702.
- Olea, R.A. 1991. *Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary*. Oxford University Press, New York, 177p.
- Olea, R.A. 1999. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 303p.
- Oliveira, S.A., Koppe, J.C. & Costa, J.F.C.L. 1995. Overburden volume estimation assisted by geostatistics in open cast coal mine. *Proceedings, 25th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, Brisbane, p.181-187.
- Pawlowsky, V., Olea, R.A. & Davis, J.C. 1993. Boundary Assesment Under Uncertainty: A Case Study. *Mathematical Geology*, Vol.25, No.2, p.125-143.
- Pereira,R.S. 1979. *A Estatística e suas Aplicações*. Grafosul, Porto Alegre, 658p.

- Peroni, R. 1998. *Introdução de Variável Espectro-Colorimétrico no Modelamento e Planejamento de Jazidas de Caulim e Comparação da Seletividade Produzida por Modelos de Diferentes Dimensões*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 125p.
- Peroni, R., Costa, J.F., Koppe, J. & Petter, C. 2000. New mine planning strategies applied to kaolin deposits. CD-ROM, *Geostats 2000, 6th International Geostatistical Congress*, Cape Town, South Africa, 9p.
- Pilger, G.G. 2000. *Crítérios para Locação Amostral Baseados em Simulação Estocástica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 127p.
- Reading, H.G. 1986. *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 615p.
- Remacre, A.Z. 1984. *L'Estimation du Recupérable Local – Le Conditionnement Uniforme*. These Doctour Ingénieur en Sciences et Techniques Minières – Option Géostatistique, École des Mines de Paris, 99p.
- Rendu, J.M. 1984. Geostatistical modelling and geological controls. *Proceedings of the 18th APCOM International Symposium*, Institution of Mining and Metallurgy, London, p.467-476.
- Rivoirard, J. 1994. *An Introduction to Disjunctive Kriging and Nonlinear Geostatistics*. Clarendon Press, Oxford. 181p.
- Rossi, M.E. & Alvarado C., S.B. 1998. Conditional simulations applied to recoverable reserves. *Proceedings, 27th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, London, United Kingdom, p.19-23.
- Rossi, M.E. 1999. Uncertainty and risk models for decision-making processes. *Proceedings, 28th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, Golden, U.S.A, 185-195.
- Roth, C. & Deraisme, J. 2000. The information effect and estimating recoverable reserves. CD-ROM, *Geostats 2000, 6th International Geostatistical Congress*, Cape Town, South Africa, 13p.
- Schmitt, M. & Bisquay, H. 2000. Structural description of digital elevation models, CD-ROM, *Geostats 2000, 6th International Geostatistical Congress*, Cape Town, South Africa, 9p.
- Silva, A.H.M. 2001. *Modelagem Geológica e Estocástica da Porção NE da Mina de Morro de Ouro, Paracatu (MG)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 99p.
- Silva, E.L., Ceita, A., Raspa, G. Simões, J. & Bruno, R. 2000. Estimation of the “in situ” grain-size distribution curve of Quihita Kaolin Deposit (South of Angola). CD-

- ROM, *Geostats 2000, 6th International Geostatistical Congress*, Cape Town, South Africa, 8p.
- Spiegel, M.R. 1978. *Probabilidade e Estatística*. Tradução de Alfredo Alves de Farias, Coleção Schaun, McGraw-Hill do Brasil, 527p.
- Srivastava, R.M. 1994. "The visualization of spatial uncertainty", em: *Stochastic Modeling and Geostatistics Principles, Methods and Case Studies*, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, p.339-345.
- Stangler, R.L. 1999. *Geostatistical Evaluation of a Clay Mineral Deposit in Nova Veneza, Brazil*. CFSG Report, Centre de Géostatistique de Fontainebleau, France, S-378, 85p.
- Stangler, R.L., Armstrong, M., Strieder, A.J., Koppe, J.C. & Costa, J.F. 2001. Geostatistical framework for modeling clay deposits: Nova Veneza case study in Southern Brazil. *Geostatistics Rio 2000, Proceedings, 31<sup>st</sup>. International Geological Congress, geostatistics sessions*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Holland, p.131-146.
- Stangler, R.L., J.F. Costa, Koppe & J.C. 2001. Risk in stripping ratio estimation. *Proceedings, 29th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM2001)*, Beijing, China, p.81-86.
- Thwaites, A.M. 1998. Assessment of geological uncertainty for a mining project. *Proceedings, 27th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM)*, London, United Kingdom, p.391-404.
- Wackernagel, H. 1998. *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin, 291p.
- Zhu, H. 1991. *Modeling Mixture of Spatial Distributions with Integrations of Soft Data*, PhD Thesis, Stanford University, 310p.

## **Apêndice A – Publicações Associadas à Essa Dissertação**

Os trabalhos apresentados a seguir foram produzidos durante o período de Mestrado que resultou na presente dissertação, abrangendo tópicos relacionados e que fizeram parte de todo o estudo efetivado. Os dois primeiros correspondem a resumos (*abstracts*) incluídos no CD-ROM referente ao “31<sup>st</sup> International Geological Congress”, realizado em Agosto de 2.000, no Rio de Janeiro/RJ.

As referências bibliográficas completas dos dois artigos completos, apresentados na seqüência, podem ser encontradas no item “Referências Bibliográficas” dessa dissertação.

## **Geostatistical framework for modeling clay deposits: Nova Veneza case study in Southern Brazil**

**<sup>1</sup>Roger Luis Stangler, <sup>2</sup>Margaret Armstrong, <sup>1</sup>Adelir José Strieder, <sup>1</sup>Jair Carlos Koppe, <sup>1</sup>João Felipe Costa**

<sup>1</sup>Dept. of Mining Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil;

<sup>2</sup>Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris, France

The region of Criciúma, Santa Catarina State, Southern Brazil, is one of the world's main industrial districts for ceramics production. Clay minerals are one of the key ingredients. The clay's characteristics including several physical and chemical parameters need to be known over the whole deposit in order to allow appropriate mine planning, scheduling and blending. The clays homogeneity is vital for ceramic processing.

This paper proposes a geostatistical framework to model two quality variables: water absorption and linear retraction, both expressed as percentages, in addition to the clay seam thickness. The methodology described was used in a clay deposit located in the region above cited. Two sedimentary systems conditioned by tectonic structuring, corresponding to two anisotropy systems with different representativity, interact and affect the spatial continuity of the variables in different ways. Samples were available from 452 auger holes covering an area of 800m x 800m approximately. As the sample lengths varied, a 2D approach was carried out using accumulations. Run of mine was classified as high/low quality based on these quality variables estimations, requiring maximum accuracy in estimate at each block.

Ordinary kriging provided estimates at 25 x 25m blocks, and stochastic simulations were performed to assess the variability on the mining blocks' quality. The results obtained proved to be more efficient than traditional evaluation methods currently used.

## **Abstract: 31st IGC Brazil – General Symposium 8.1**

# **Geological Controls on the Ceramic Characteristics of a Clay Mineral Deposit in Nova Veneza, Southern Brazil**

**Roger Luis Stangler, Adelir José Strieder, João Felipe Costa**

Dept. of Mining Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil;

The geological processes normally influence directly the industrial parameters and their spatial distribution on the clay minerals deposits. This paper presents a study on a deposit of this type, located in one of the world's main ceramics production areas. Water absorption and linear retraction, both expressed as percentages, were evaluated, in addition to the thickness of the clay. Depending on the quality parameters, two kinds of clay can be mined: single and double firing. Samples were available from auger holes spread over an area of 64 ha approximately. Geostatistical methodologies were applied.

This clay deposit is associated to a quaternary sedimentation coming from a close source of Paleozoic clay-bearing rocks, in a transition to a quaternary coastal plain. Residual contributions were investigated. Two groups of sedimentary features controlled by tectonic structures interact and influence the variables in different ways. A NW-SE structure acts over most of this region and controls most of the local relief and the drainage patterns. It appears in the western border of the study area, controlling the sedimentary features that correspond to the overall trend of the quality variables. A second structure is located in the central north part of the area and trends NNE-SSW. A well defined channel with the thickest clay horizon can be regarded to this direction.

The results show the strict relationships between the sedimentary and structural conditions and the spatial disposition of ceramic characteristics of the clay, and can be used to guide exploration works on surroundings.



## **GEOSTATISTICAL FRAMEWORK FOR MODELLING CLAY DEPOSITS: NOVA VENEZA CASE STUDY IN SOUTHERN BRAZIL**

ROGER LUIS STANGLER<sup>1</sup>, ADELIR JOSÉ STRIEDER<sup>1</sup>, JAIR CARLOS KOPPE<sup>1</sup>,  
JOÃO FELIPE COSTA<sup>1</sup> AND MARGARET ARMSTRONG<sup>2</sup>

*1) Dept. of Mining Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil*

*Av. Osvaldo Aranha 99/504 - Porto Alegre/RS - 90035-190 – Brazil*

*2) Centre de Géostatistique, 35, rue Saint-Honoré - 77305 Fontainebleau, France*

### **Abstract**

The region of Criciúma, Southern Brazil, is known as one of the main ceramic industrial districts in the world. Clay minerals are one of the key ingredients in the ceramic industry. Clay characteristics including several physical and chemical parameters need to be known throughout the entire deposit to help in defining the mining plan, scheduling and blending strategies.

This paper proposes a geostatistical framework to model two essential clay properties required to be controlled in the ceramic industrial process, respectively water absorption and linear retraction. The methodology proposed is illustrated in a deposit consisting of two sedimentary systems conditioned by tectonic structures. These structures define two anisotropy systems interacting and affecting the spatial continuity of the parameters studied. Geological, topographical and geomorphological mapping were followed by geostatistical evaluation. Two distinct geological domains were defined, resulting in two sub-datasets. Samples available from auger holes were logged and analysed at different lengths (support), requiring the use of accumulations to overcome the problem caused by multiple sample supports.

Ordinary kriging was selected to estimate 25 x 25m blocks and stochastic simulation was used to assess the variability of the thickness values assigned to each block. Risk on recoverable reserves was quantified. The results obtained encourage the application of the proposed methodology as they proved to be more efficient than traditional evaluation methods.

### **Key words**

Clay minerals, clay classification, recoverable reserves, conditional simulations, block kriging

## 1. Introduction

Industrial minerals including those used in the ceramic industry for wall and floor tiles are experiencing a period of world-wide production expansion. These are a combination of clay-argillite, sand-sandstones, kaolin, talc, rhyolit, phyllit, feldspar, and others.

The characterisation of deposits containing these industrial minerals always goes beyond merely quantitative evaluating the minerals potentially interesting for ceramic manufacturing. In order to help the decision making process, risk should be addressed. In particular, decisions such as choosing which deposit should be mined first out of several alternatives, or of assessing the risk of an economic failure of a certain mining plan require an appraisal of the uncertainty associated with the estimates. To answer these problems we require a measurement of variability in the recoverable reserves. A proper measure of these uncertainties is obtained under the conditional simulation framework as discussed by Costa (1997), Dimitrakopoulos (1998), Rossi & Alvarado (1998), Thwaites (1998) and Rossi (1999).

Various parameters are required to be known in the ceramic manufacturing process and the minerals used in the so-called ceramic formulation must satisfy specific quality requirements. Consequently, the deposit should be classified according to distinct ore categories, respecting the quality required by the industrial plant. Few papers report applications of geostatistics in the field of ceramics or related to clay minerals (Borgman and Frahme, 1975; Durão et al., 1999; Silva et al., 2000). Stangler (1999) reports a case study to enhance ore classification using kriging in clay deposits.

Due to the complexity of the ceramic processes and its dependence on the quality of multiple minerals used, proper geological modelling is vital to minimise fluctuations in the plant head grade. Fluctuations cause operational disturbances, which ultimately leads to financial lost. This paper proposes a geostatistical framework using kriging and stochastic simulations to model clay deposits. The study illustrates how ordinary kriging (Matheron, 1963) can be used to give accurate estimates for physical parameters such as linear retraction and water absorption. It also addresses the question of how uncertainty on the recoverable reserves estimation can be determined.

## 2. Geological Setting

The area studied in the case is located in southern Brazil (see Figure 1). The region is a transition between major geological units (Figure 2). Basically, the area comprises the contact of Paraná Basin and a wide quaternary coastal plain. This quaternary coastal plain is represented locally by small alluvial fans mostly composed of clays. The late Paleozoic sedimentary rocks represent the main source of sedimentation and are also constituted by clay minerals. These gondwanic rocks belong to the upper part of the stratigraphic column of the Paraná Basin. The age of sedimentary formations is Late Paleozoic, covered by Mesozoic desertic sandstones and some hundred meters thick of volcanic rocks (mostly basaltic flow) topping the sequence (Bortoluzzi et al., 1987). Due to the basin board environment, many gaps in the sedimentation sequence are apparent. Lateral discontinuities are often found in the formations and in the quaternary covering sediments.



Fig 1 – Geographical situation of the Nova Veneza clay deposit.

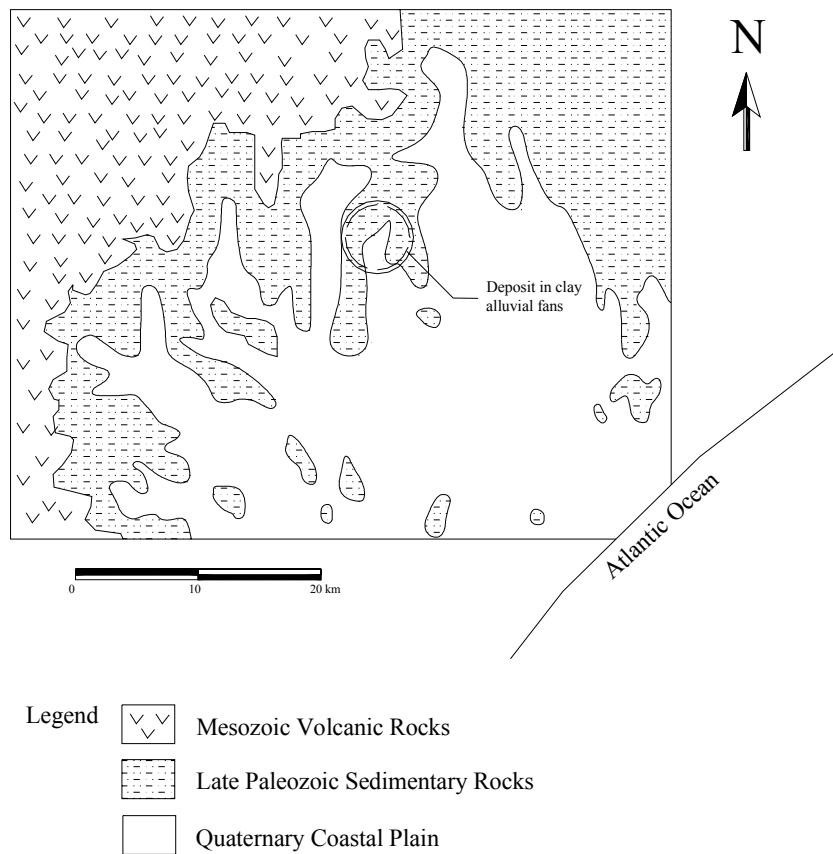
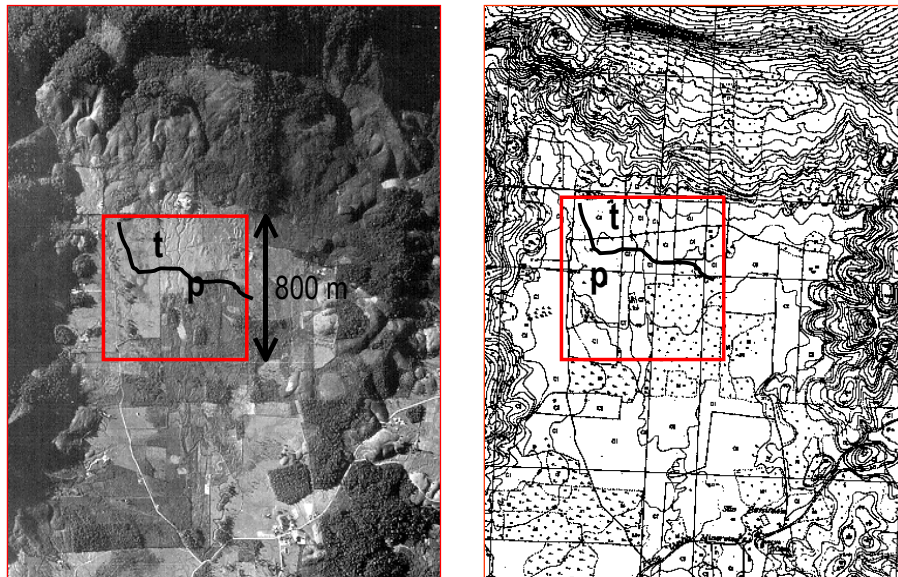


Fig. 2 - Geological setting.

A strong tectonic NW-SE structure and a subordinated tectonic N-S structure are present. These structures conditioned the relief and consequently the patterns of the drainage. Ancient gravity NW-SE systems were intercepted by NE-SW structures, which are responsible for the present coastal alignment in this part of Southern Brazil. The deposit which is the object of this study is part of this truncated geological environment (Figure 2). The clay mineral occurs in the quaternary plain resulting from the transportation of sedimentary Paleozoic clay rocks. In addition to the dominant NW-SE structural system which conditioned the shape of the drainage channels in the west of the area, a subordinated drainage channel oriented NNE-SSW intercepts the north part of the deposit (Figure 3).



**Fig. 3** – Aerial photograph on left and topographic map on right both at the same scale. Two subdomains are depicted: **t** for talus and **p** for plain. Contour lines every 5 m.

The clay occurring in the area is predominantly quartz-kaolinitic. The bedrock is basically a black shale. The quality of clay for ceramic application depends on various parameters including its grain size distribution, i.e. proportion between clay and sand. The latter is normally constituted predominantly of quartz, which is more refractory in the ceramic process. In general, after firing at high temperatures, the more clay constituted is the material the higher is its linear retraction, while water absorption decreases as the clay minerals constitution increases (Barba et al., 1977, p.261). Understanding the sedimentation and the tectonic structures is important in the subsequent geostatistical evaluation.

Two sub-domains were defined locally. The first one consists of an alluvial fan forming a clay plain related to the main NW-SE drainage partially covered by a talus deposit in the North portion of the area. The second subdomain comprises sediments formed along the North portion, transported by gravity from the cliffs along the North border. Details of the

local geological settings are depicted on Figure 3. The flat valley is surrounded by mountains composed of clay Paleozoic rocks on the West and East edges. The northern portion is partially covered by a talus deposit. These two geological domains were used to define two corresponding geostatistical subdomains, and as such the two will be treated separately hereafter.

**3. The Data Set in the Plain Domain Subset**

The original data set comprises 452 auger drill holes 25 mm in diameter. Samples were collected on a quasi regular 25 X 25 m grid covering an area of 775 x 775 m. In this paper the authors present the proposed procedure only in the southern domain, i.e. the plain. Figure 4 shows the thickness of the clay bed at 231 sample locations within this subdomain.

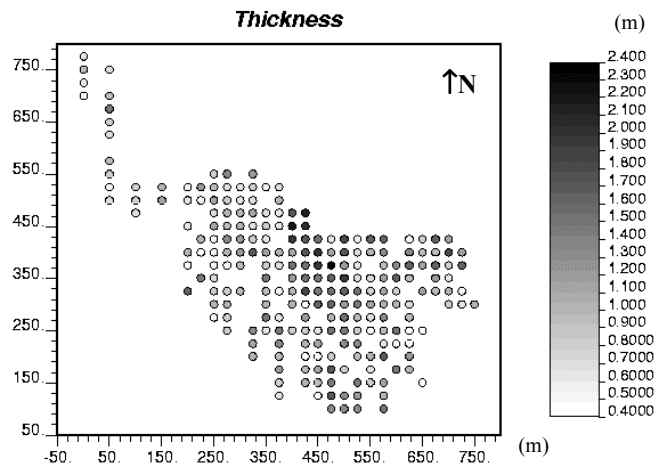


Fig. 4 – Collar location for the auger holes and their clay bed thickness.

Prior to any structural analysis or estimations/simulations, it is essential to properly define the limits of the field to be considered. The area was divided into two homogeneous subdomains. As the auger holes were drilled and sampled at different lengths (down to the bedrock), it was decided to model the deposit in 2D using grade accumulations.

The variables evaluated are water absorption and linear retraction, both obtained from laboratory assays and expressed as a percentage. Laboratory analyses are obtained after submitting the samples to the actual conditions of the ceramic process, i.e. 50 minutes at 1115° C. Water absorption represents the amount of water that a ceramic piece can absorb after firing conditions. Linear retraction represents the shrinkage suffered by the material after firing. In mixtures containing large amounts of silica the linear retraction can be negative, indicating a volumetric expansion of the material. The specifications used in classifying the clays are presented in Table 1.

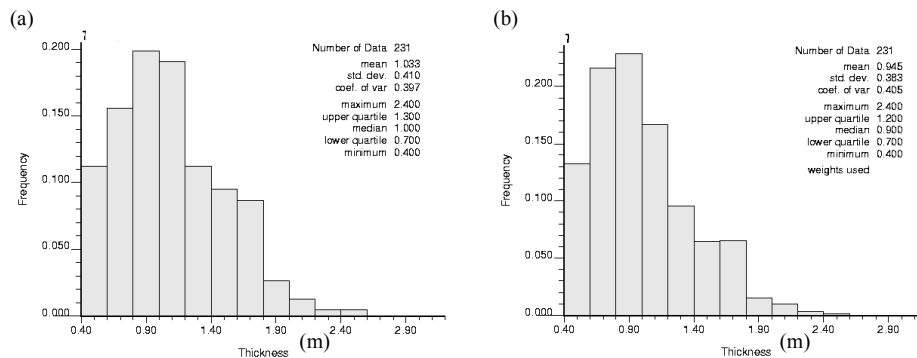
**Table 1** – Specifications for the 2 kinds of ore in the Nova Veneza area.

	Water Absorption (%)	Linear Retraction (%)
SINGLE FIRING CLAY	10 – 15 %	0 – 1.5 %
DOUBLE FIRING CLAY	10 – 20 %	0 – 2.5 %

Single firing clays are more valuable as they require only one firing process to reach the ideal ceramic conditions, and produce a better quality product. In this kind of mining operation blending is very common in order to reach proper industrial requirements, and so an accurate classification of mining blocks is required.

The thickness values (Figure 4) present a concentration of high values in the central North region, roughly oriented NNW-SSE. They reflect the transition from the northeast talus subdomain where there is a channel running approximately N-S (Stangler, 1999). Moving from this region, low values of thickness are often found. These increase the nugget effect in the variograms.

Figure 5 shows the frequency histogram for thickness before and after declustering (see Isaaks and Srivastava, 1989, chapter 10, and Goovaerts, 1997, p.77-82 for a discussion in declustering methods). The mean, median and quartiles decreased after cell declustering is applied. The overall shape of the histogram and the coefficient of variation remained practically unchanged.

**Fig. 5** – Original sample distribution for thickness (a) and its declustering histogram (b).

Histograms for water absorption and linear retraction are depicted on Figure 6. Since the samples were collected over different lengths as was mentioned before, it was necessary to calculate their accumulations in order to make them additive. The use of these working variables is common in the geostatistical literature (Krige, 1981; Journel and Huijbregts, 1978, p.244-247 and David, 1977, p. 89-90).

Figure 6 shows the histograms of water absorption and linear retraction, and of their accumulations. The shape of the histograms of the accumulation is different to that of the original values for water absorption, (compare with Figure 5) but the linear retraction accumulation exhibits practically the same patterns as the raw variable.

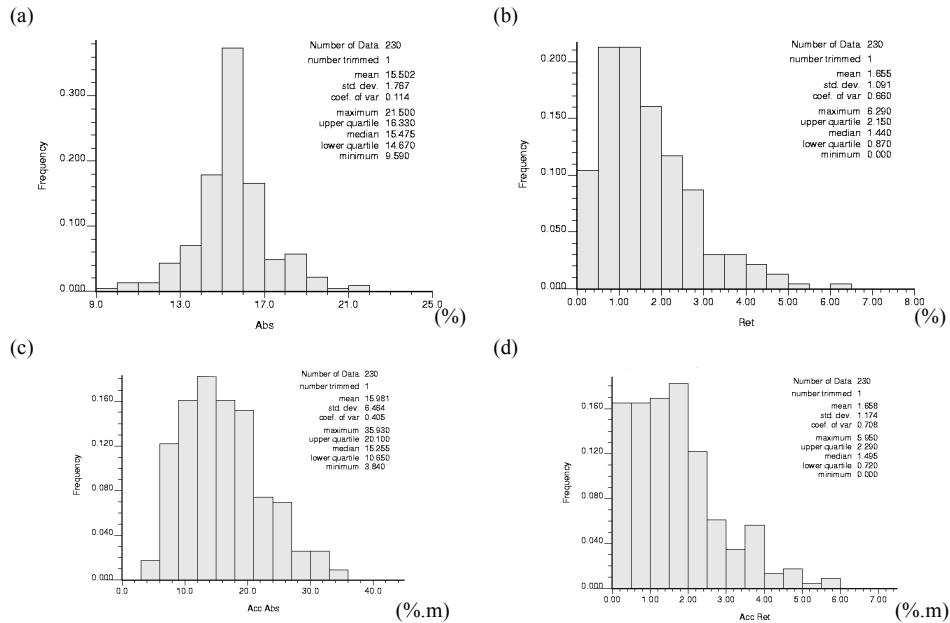


Fig. 6 – Basic statistics for the quality variables water absorption (a) and linear retraction (b), and their respective accumulations (c) (d).

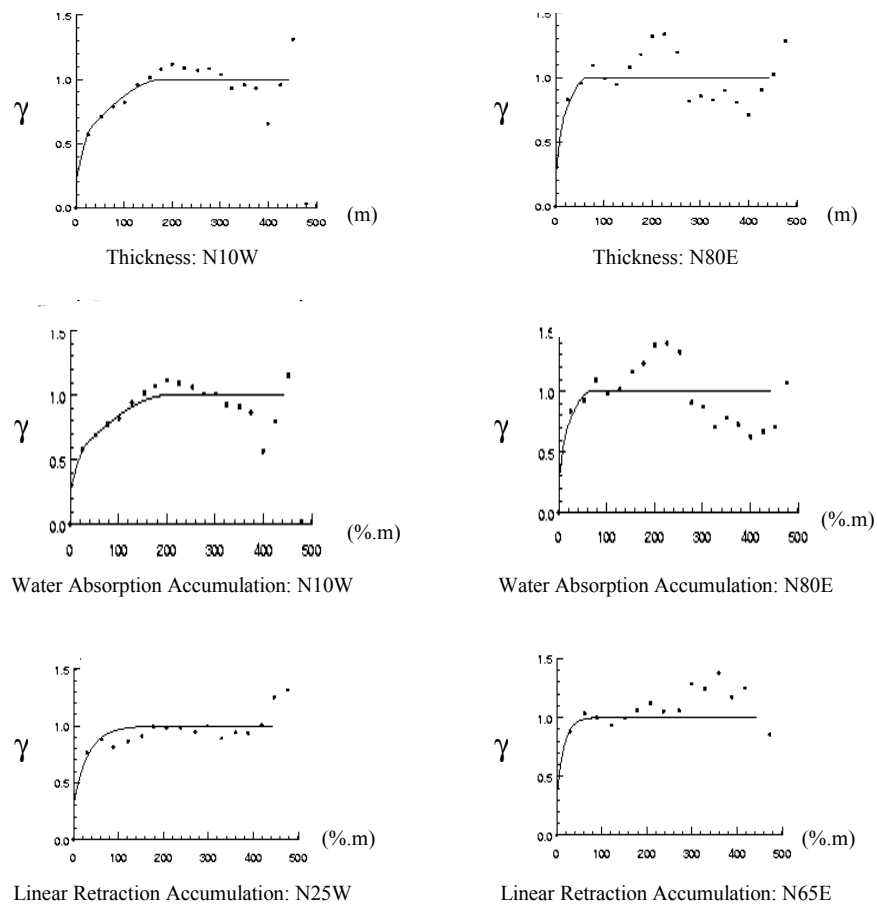
#### 4. Variography

The structural analysis was carried out by calculating the experimental semivariograms and fitting variogram models which were used subsequently in kriging and conditional simulations. In order to compare different variables measured using different units and magnitudes all the variograms were standardised. The fitted are depicted on Figure 7.

For thickness the major axis of anisotropy is N10W. It defines a geometric anisotropy which is the result of the combined effects of the plain sedimentation, the drainage in the western portion, which is NW-SE oriented and the talus reworking with minor drainages oriented approximately N-S (see Figure 3). The maximum continuity is at N25W for linear retraction accumulation.

#### 5. Kriging the Quality Parameters

Mining blocks have to be classified according to the different ceramic clays and waste as presented in Table 1. We aim at obtaining accurate estimations by applying ordinary block kriging (Isaaks and Srivastava, 1989, p.323-337; Goovaerts, p.152-158; Armstrong, p.86-91). The regionalised variables being modelled are accumulations (expressed in %.m), requiring the kriged block values be divided by the thickness of each block to express the final results at their original units (%). The kriged maps are shown in Figure 8.



**Fig. 7** – Variogram models for the three variables at the major (left) and minor directions of anisotropy.

The search strategies and the variograms used for kriging were cross-validated (Isaaks and Srivastava, 1989 chapter 15). Kriged models were used for classifying the zones of the deposit into different classes according to the single and double firing clay definition (Table 1). Figure 9 shows the block models and their block classification. The 348 estimated double firing clay blocks are distributed within the deposit in a relatively large band oriented NW-SE. Some gaps are observed in this band in the SE region corresponding mostly to single firing blocks. The 24 estimated single firing clay blocks are all located in the SE portion in a narrow and discontinuous band oriented NW-SE. These maps can be used to guide the mine planning and scheduling.



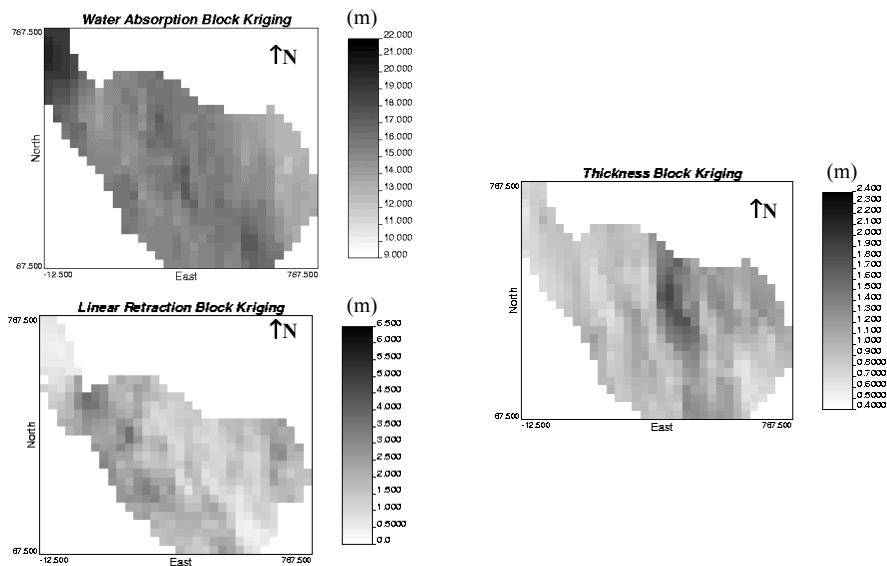


Fig. 8 – Kriged block maps for the quality variables and thickness. Blocks of 25x25m.

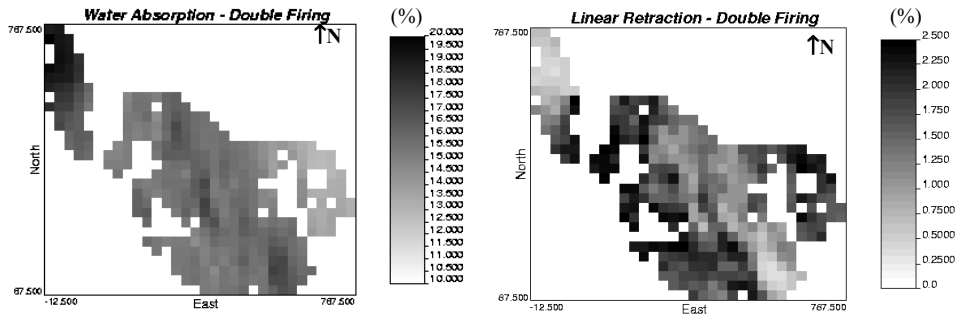
## 6. Sequential Gaussian Simulations of Thickness

As we need to assess thickness variability within the deposit of the pre-classified clay blocks, it was decided to use two techniques, respectively kriging for block classification (as presented in the previous section) and simulation for risk assessment. Conditional simulations were generated by sequential gaussian (SGS) algorithm (Isaaks, 1990). Following the steps required in SGS, the variogram of the normal transformed data obtained from the thickness was computed and modelled. Its shape turned out to be similar to the original one.

A high resolution grid file covering the entire area at 1.0 x 1.0 m cell spacing and containing a total of 560 000 nodes was generated. Fifty simulations were obtained, starting with a few realisations and progressively adding more realisations until the variance among the simulations stabilised. Validations of the simulations in the Gaussian space were performed, checking carefully if the basic statistics of realisations respect globally the convergence to an actual gaussian distribution. In the original data space, the histograms, variograms and maps for individual realisations were plotted and compared to the original reference distribution, variogram model and sample location map (see Figures 10, 11 and 12). Short scale ergodic fluctuations can be observed. With a good proximity between reference and obtained features, all these realisations could be accepted and thus taken equiprobably as possible scenarios of the data, in statistical, geostatistical, and geological terms. To obtain simulated values for 25 x 25m mining blocks, 625 point values were averaged per block. Multiple simulations provide a powerful tool for evaluating the recoverable reserves and for determining the risk at the blocks defined as ore in the

previous section.

**ESTIMATED SINGLE FIRING CLAY BLOCKS**



**ESTIMATED SINGLE FIRING CLAY BLOCKS**

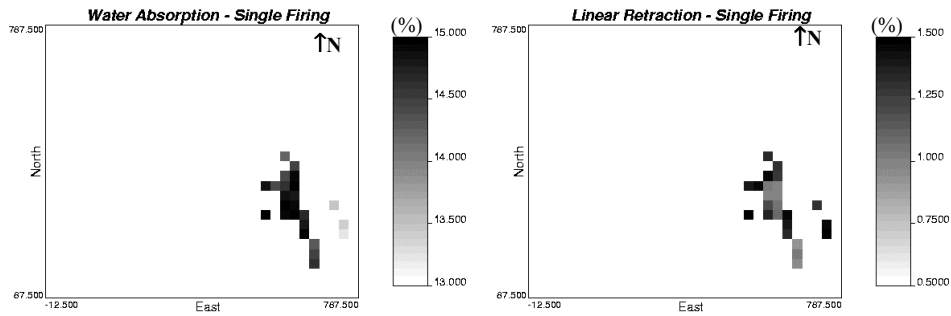


Fig. 9 – Block models generated by ordinary kriging and classified into the two types of clay.

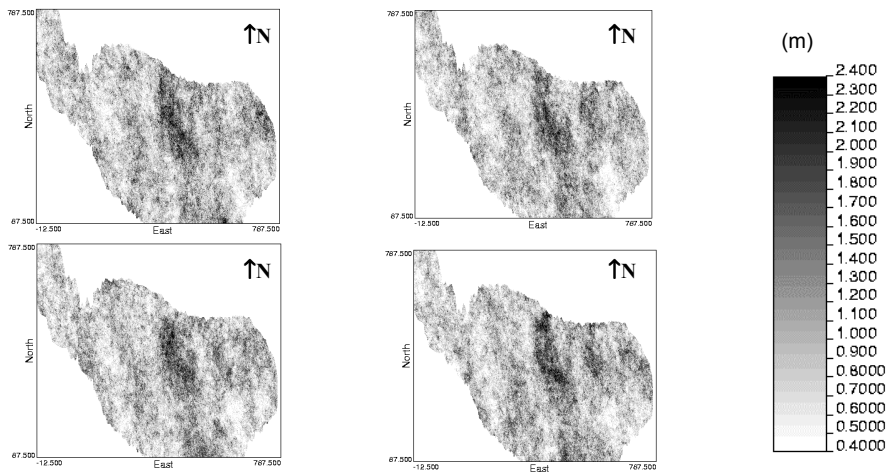


Fig. 10 – Four out fifty realisations of thickness at 1x1 m grid, showing the spatial patterns and local fluctuations.

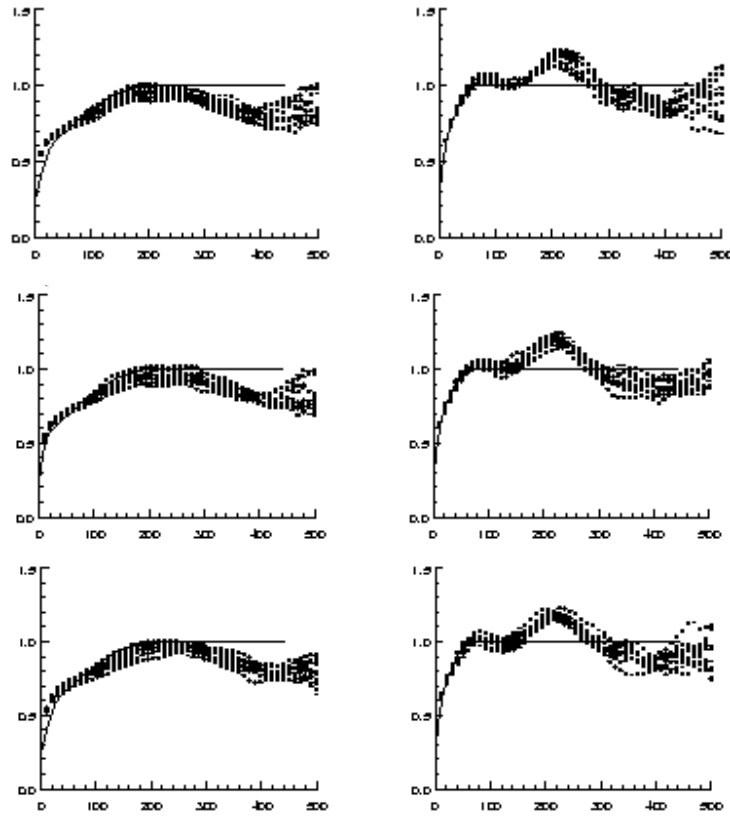


Fig. 11 – Experimental variograms for three groups of ten thickness realisations each (dots) plotted against the input model (continuous line), at the major (left) and minor directions of anisotropy (N10W and N80E).

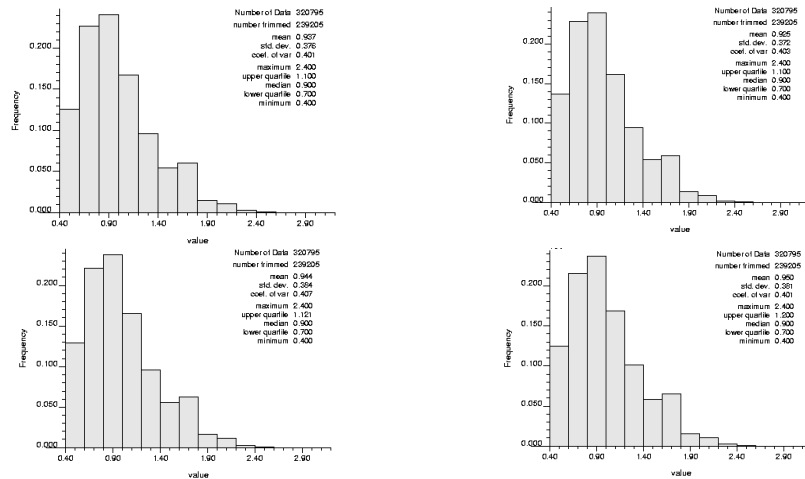


Fig. 12 – Thickness frequency histograms for four out of fifty realisations, showing a close proximity to the reference declustered distribution of Figure 5 b.

Goovaerts (1997, p333-340) and Srivastava (1994) describe several methods for assessing and visualising local uncertainty in mineral deposits using the results of conditional simulations. We chose two measures for local uncertainty based on 50 realisations: (i) coefficient of variation (CV) and (ii) probability maps, displaying block-by-block the probability of exceeding a given threshold value.

Figure 13 shows the CV's for mineralised blocks. In the case of double firing clay blocks, most of the highest values are located in the borders, beyond the limit defined by the samples. In the remaining of the area low fluctuations are observed, with some isolated blocks showing more variability. For the few single firing clay blocks a similar situation is observed, and the less erratic blocks are observed in the central and N parts of this zone.

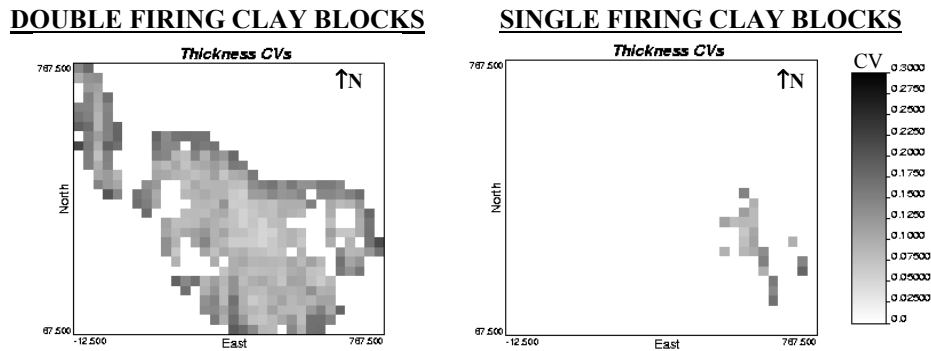


Fig. 13 – Maps of the coefficients of variation for thickness in mineralised blocks.

Maps of the probability of a block thickness exceeding a given threshold, such as those as shown in Figure 14, are useful to guide mine planning and scheduling in small deposits. These maps are also relevant to select appropriate equipment given a required selectivity during mining. Seams with low thickness require more care to be mined to avoid high dilution. If we define a minimum thickness of 0.5 m, nearly all mineralised blocks have very high probability to be mined without operational problems. Conversely, if we consider a less selective mining method using larger equipment, the minimum mineable thickness would be 1.00 m. In this situation, blocks with high confidence (say 90 %) to be equal or above the minimum thickness comprise less than half mineralised zone.

## 7. Recoverable Reserves

In the previous sections we classified mineralised blocks according their estimated quality parameters, following the study of seam thickness for each mineralised blocks. It is also relevant to assess risk in the recoverable reserves. To address this issue, tonnages were calculated by multiplying the constant area of each block ( $625 \text{ m}^2$ ) by its simulated average thickness, assuming a constant value for the specific gravity ( $2 \text{ t/m}^3$ ). We selected the worst, the median and the best scenarios according the average global thickness for each simulation, in each type of pre-classified clay blocks.

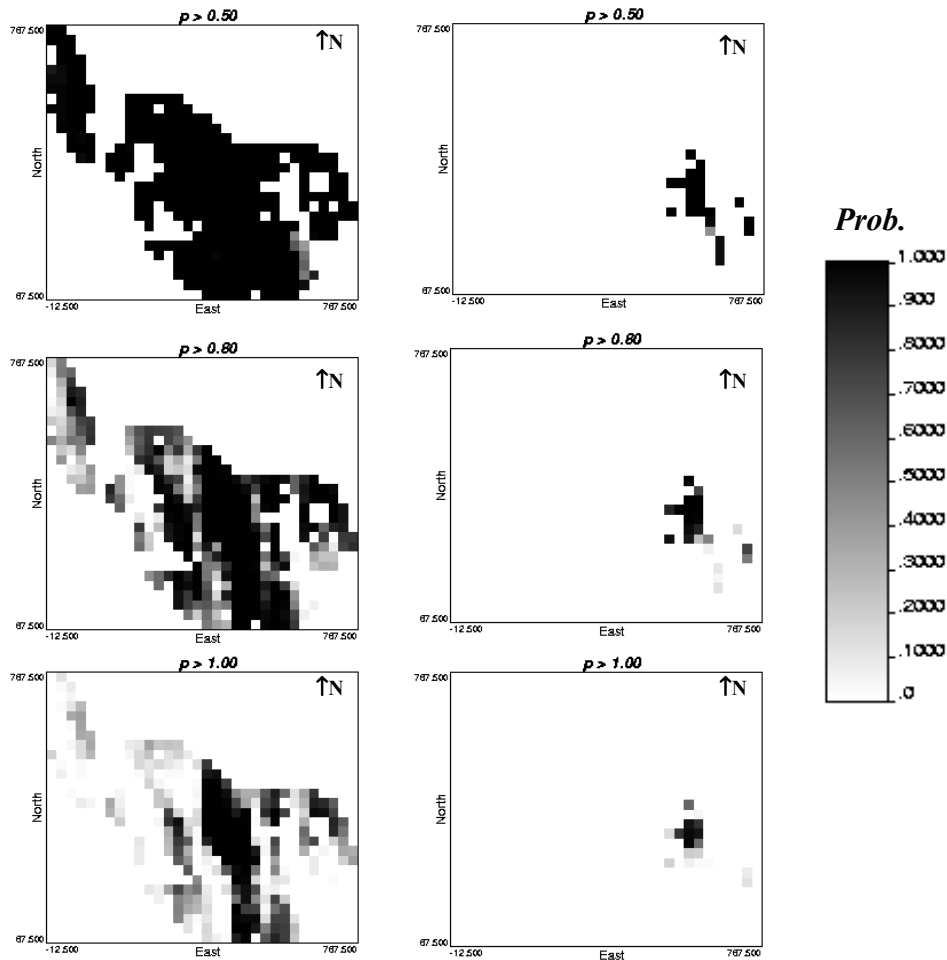


Fig. 14 – Probability maps for blocks to exceed a given thickness.

The variability of the recoverable reserves can be visualised for both types of ceramic clay on Figure 15. The uncertainty is greater for the single firing clay, which is partly explained by the small number of blocks included in this class. Table 2 quantifies the instability (or risk) in predicting recoverable reserves for both types of clay in this deposit, especially for high thickness thresholds. The uncertainty tends to be higher for thresholds above the median.

It is also relevant in this kind of application to evaluate the area involved in mining. When several deposits are being compared in order to select one for mining, the area involved impacts economically on the overall project as costs are involved in land acquisition. Fluctuations in the  $t/m^2$  parameter are relevant to the decision process described earlier. Figure 15 shows critical aspects, highlighting the uncertainty in single firing clay.

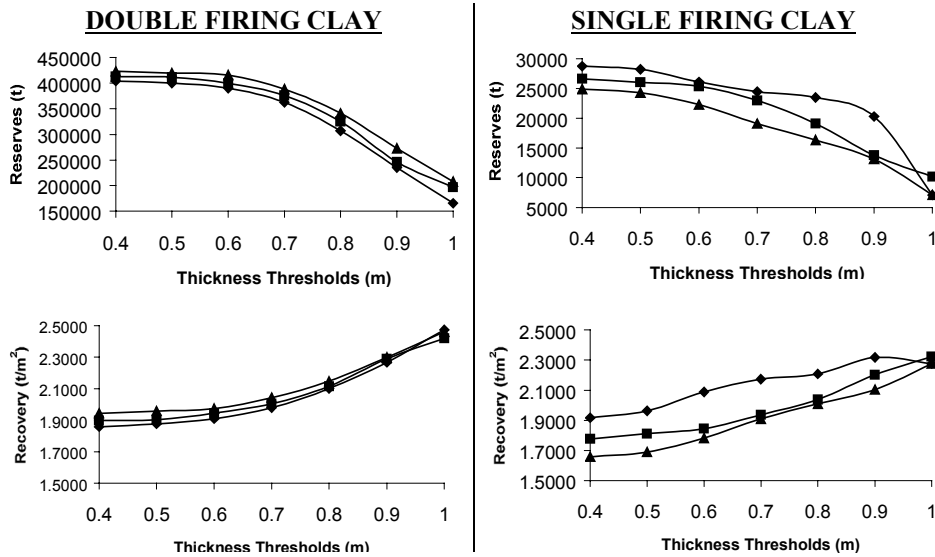


Fig. 15 – Recoverable reserves for the worst, the best and the median scenarios (respectively the lower, the upper and the intermediate curves on the graphics).

Table 2 – Relative variations around the median thickness values.

RECOVERABLE RESERVES UNCERTAINTY LEVEL IN TONNAGES				
Thickness' threshold (m)	Double Firing Blocks		Single Firing Blocks	
	Maximum fluctuation above the median (%)	Maximum fluctuation below the median (%)	Maximum fluctuation above the median (%)	Maximum fluctuation below the median (%)
0.4	2.466	-2.053	7.916	-6.663
0.5	2.024	-2.771	8.360	-6.715
0.6	3.960	-2.417	2.910	-12.175
0.7	3.241	-3.649	6.379	-16.925
0.8	4.842	-5.530	22.802	-14.512
0.9	10.897	-4.437	47.325	-4.448
1.0	5.658	-15.796	-30.016*	-30.016

\*local inversion in which the best global reserves scenario presents a situation worse than the median one, for this specific threshold.

## 8. Conclusions

- It should be stressed that geological understanding is essential to validate geostatistical recoverable reserves estimation. The present case study started by defining two homogeneous geological sub-domains. Subsequently, results were geologically validated accompanied by statistical and geostatistical checks.

- The geostatistical framework applied demonstrated its usefulness in evaluating reserves for this kind of industrial mineral deposit. The established methods of ordinary block kriging and sequential gaussian simulation were combined for mapping and classifying types of ceramic raw materials.
- The methods also provided the tools for mine planning and the assessment on the variability of recoverable reserves. The identification of extreme and median scenarios for recoverable reserves proved to be valid to alert for possible fluctuations either globally or locally.
- One possible improvement in this work would be to use simulations of the quality variables, integrating all uncertainties involved into a more complete assessment of risks local and globally. As this deposit is supposed to be mined soon, reconciliation is imperative.

## 9. Acknowledgements

This project received the financial support of CNPq, National Science and Research Council in Brazil. The authors are grateful to Eliane Revestimentos Cerâmicos, especially to the geologists, Márcio Geremias and Jorge Christ, who provided the data set and permitted the publishing of this paper.

## 10. References

- Armstrong, M. 1998. "Basic linear geostatistics", Berlin, Springer. 153 p
- Barba, A., Feli., C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., Sanz, V. and Beltrán, V. 1997 "Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas", Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón, 292p.
- Borgman, L. E. and Frahme, R.B. 1975. "A Case Study: Multivariate Properties of Bentonite in Northeastern Wyoming", in: "Advanced geostatistics in the mining industry", Nato Advanced Study Industry, Rome, p.381-390
- Bortoluzzi, C.A., Awdziej, J. and Zardo, S.M., 1987. "Geologia da Bacia do Paraná em Santa Catarina", in: "Textos Básicos de Geologia e Recursos Minerais de Santa Catarina", DNPM / Coordenadoria de Recursos Minerais da Secretaria da Ciência e Tecnologia, Minas e Energia, Florianópolis, 216p.
- Costa, J.F., 1997. "Developments in Recoverable Reserves and Ore Body Modeling", PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, The University of Queensland, 333p.
- David, M. 1997. "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier, Amsterdam.
- Dimitrakopoulos, R. 1998. "Conditional Simulation Algorithms for Modeling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimisation", International Journal of Surface, Reclamation and Environment, vol.12, p.173-179.
- Durão, F., Cortez, L., Brito, G. and Orea, S. 1999. "Optimization of Ceramic Pastes Production by Modeling the Chemical and Physical Properties of their Clay Components", Proceedings, 28<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), Golden, U.S.A, 511-518, October.
- Goovaerts, P., 1997. "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, 438p.
- Isaaks, E.H., 1990. "The Application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data", PhD Thesis, Stanford University, USA, 213p.
- Journel A. G. and Huijbregts C. 1978. "Mining geostatistics", London, Academia Press, 600 p.
- Isaaks E.H. and Srivastava R.M 1989. "An introduction to applied geostatistics", N.Y : OUP. 561 p.
- Krige, D.G. 1981. "Lognormal-de Wijsian Geostatistics for Ore Evaluation South African Institute of Mining and Metallurgic", Johannesburg, 51p.
- Matheron, G. 1963. "Principles of Geostatistics", Economic Geology, No. 58, p.1246-1266.
- Rossi, M.E. and Alvarado C., S.B. 1998 "Conditional simulations applied to recoverable reserves", Proceedings, 27<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), London, United Kingdom, 19-23, April.
- Rossi, M.E. 1999. "Uncertainty and Risk Models for Decision-Making Processes" - Proceedings, 28<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), Golden, U.S.A, 185-195, October.
- Silva, E.L., Ceita, A., Raspa, G. Simões, J. and Bruno, R. 2000. "Estimation of the 'In Situ' Grain-Size

- Distribution Curve of Quihita Kaolin Deposit (South of Angola)", WJ Kleingeld and DG Krige (eds.), Geostats 2000, Cape Town.
- Srivastava, R. M. 1994. "The Visualization of Spatial Uncertainty", in "Stochastic Modeling and Geostatistics Principles, Methods and Case Studies", The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, p339-345.
- Stangler, R.L. 1999. "Geostatistical Evaluation of a Clay Mineral Deposit in Nova Veneza, Brazil", CFSG Report, Centre de Geostatistique de Fontainebleau, France, S-378.
- Thwaites, A.M. 1998. "Assessment of geological uncertainty for a mining project", Proceedings, 27<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), London, United Kingdom, 391-404, April.



# Risk in stripping ratio estimation

R. L. Stangler, J. F. Costa & J.C. Koppe

*Mining Engineering Dept., Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil – roger@ufrgs.br*

**ABSTRACT:** Stripping ratio plays a major role in the profitability of open cast mines. Precise digital elevation models and other interpolation surfaces used for overburden volume definition are required. This paper uses ordinary kriging to build a 3D overburden model and conditional simulations to model multiple scenarios for the deposit tonnage. The former permits to obtain the best interpolated models. The second provides the tools to assess the uncertainty in mineral resources. Combining overburden volume model and multiple models for the deposit tonnage makes possible to evaluate the range of equally probable expected stripping ratios. The methodology is demonstrated in a clay deposit in Southern Brazil.

## 1 INTRODUCTION

Industrial minerals used for wall and floor tiles in the ceramic industry are very important to the economy of south Santa Catarina State, Southern Brazil. Clay is a key ingredient in the ceramic manufacturing process.

Clay minerals used in the ceramic industry are frequently low valued. The combination of production costs and market value restrict maximum mine-plant transport distance, maximum payable royalties, and maximum stripping ratio. Additionally to these economical factors, engineering and geological parameters need to be added to the model in order to proceed with mine planning.

During the selection of potential deposits to be exploited, overburden removal cost plays an essential role. Uncertainty associated with stripping ratio estimates depends on both estimation risks related to the total clay reserves and to the volume of overburden. Deposits with high variability can be risky to be mined economically.

Resource or reserves estimation and the related uncertainty can be addressed via conditional simulations (Costa, 1997, Dimitrakopoulos, 1998, Rossi & Alvarado, 1998, Thwaites, 1998, Rossi, 1999, Stangler et al., 2000). Geostatistics applications to the field of topography are found in various publications (Krige and Rendu, 1974, Olea, 1974, Clarke, 1986, Gilbert, 1989, Herzfeld et al., 1993, Luís et al., 1994, Oliveira et al., 1995, Schmitt, 2000). The risk or uncertainty associated

with volume estimation and its consequences to a mining project requires a new framework to be evaluated.

Overburden volume is obtained by calculating the volume between two surfaces: the original terrain surface and the top of the clay seam. Therefore, this paper proposes a geostatistical framework using kriging and stochastic simulation. The former is used for overburden volume modeling; the second is applied to assess seam thickness and clay tonnage variability. The proposal is illustrated in a case study.

## 2 GEOLOGICAL SETTING

The deposit is located in Southern Brazil, inserted in a quaternary coastal plain represented locally by small alluvial fans, mostly composed of clays. Topographical, geological, geomorphological survey and the ceramic process parameters, obtained in laboratory tests from auger holes samples and used for spatial continuity analysis, helped in delineating two subdomains (Fig. 1). This work will focus on the stripping ratio analysis of the southern subdomain named plain.

Aspects on local geology can be found in Stangler et al. (2000). A typical cross section from the deposit is presented in Figure 2.

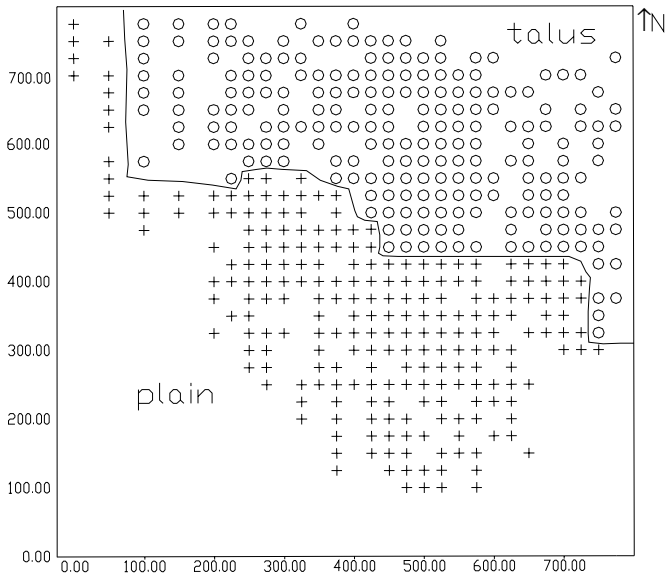


Figure 1. Auger-holes collars (circles and crosses) at a 25x25m grid. The continuous line separates two geological domains defined by a transitional geological contact.

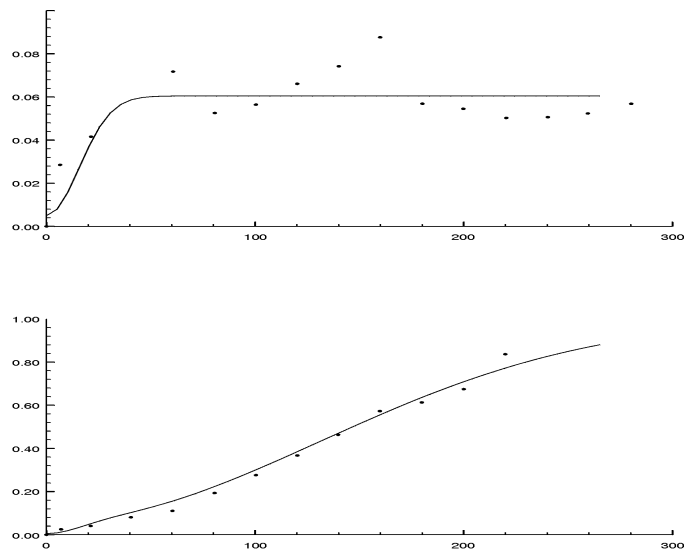


Figure 3. Variograms modeled for the elevation data: major continuity direction (E-W) at the top, and minor continuity direction (N-S) at the bottom. Note the scale difference at the vertical axis (semivariogram function); distance in meters.

### 3 TOPOGRAPHICAL MAPPING

Field survey data were used to build a topographical map via point ordinary kriging, at a regular grid (10x10m). Figures 3 and 4 present respectively the variograms and the contour map defined for the elevation. Note that the map covers the area drilled with auger holes and was used to define the two domains mentioned in the previous section.

### 4 DATA SET WITHIN THE PLAIN

The original data set comprises 452 auger drill holes (25 mm diameter). Samples were collected at a quasi-regular 25x25 m grid covering an area of 775x775 m (Fig. 1). The plain subdomain evaluated here comprises 231 holes, with one sample/hole.

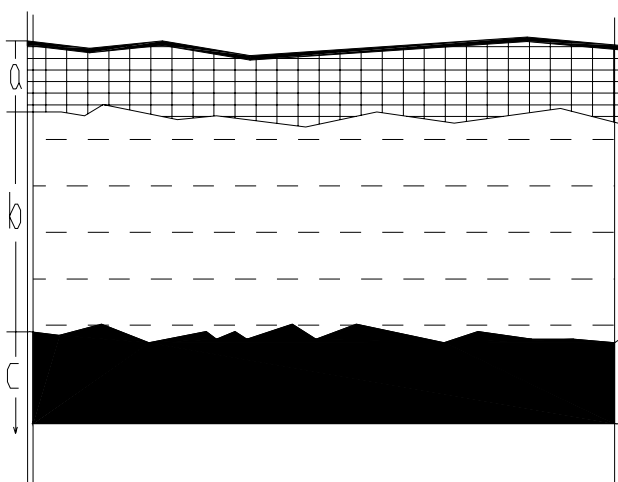


Figure 2. Schematic cross section from the deposit in the plain subdomain: (a) overburden, 0.0 to 1.3 m thickness, mean=0.33m; (b) clay seam (ore), 0.4 to 2.4 m, mean=0.94 m; (c) bedrock (shale).

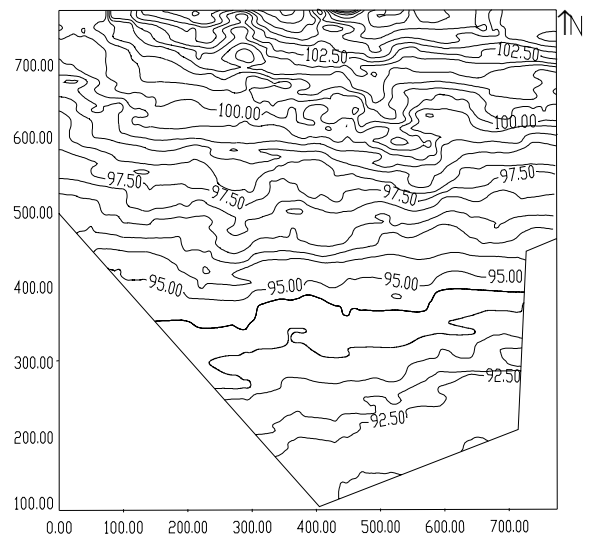


Figure 4. Topographical elevation for the study area (lines every 0.5 m).

These holes were logged and used to define clay seam and overburden thickness. Figure 5 shows the histogram for clay thickness after applying a declustering procedure (Isaaks and Srivastava, 1989, chap. 10, Goovaerts, 1997, p.77-82).

## 5 VARIOGRAPHY

The structural analysis was carried out by calculating the experimental variograms and fitting variogram models. These models were subsequently used for ordinary kriging and simulation. The fitted models are shown on Figures 6 and 7.

The clay seam thickness exhibits a major axis of anisotropy along N10W (geometric anisotropy). Similarly to the terrain elevation variograms, the top of the seam elevation variogram shows both zonal and geometric anisotropy. Along E-W (for the topography elevation) or close to E-W (for the top of the clay seam elevation), the two variables show a large continuity and a lower variance (sill). Along N-S a strong drift is observed (note the difference at the vertical axes in Figs. 3 and 6). Restricting data used in kriging to a close neighborhood of each grid (in the present case, <100 m) minimizes the possible undesirable consequences the drift can cause to the estimations (according discussion in Rossi, 1988, and Journel & Rossi, 1989).

## 6 SIMULATION FOR CLAY THICKNESS

In order to assess the variability on the reserves and consequently fluctuations on the stripping ratio, the clay seam thickness variability is required. Conditional simulations generated by the sequential

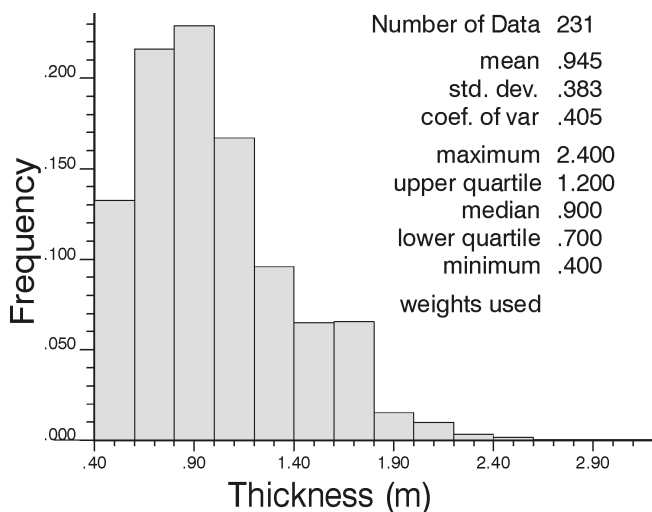


Figure 5. Declustered samples distribution for clay seam thickness.

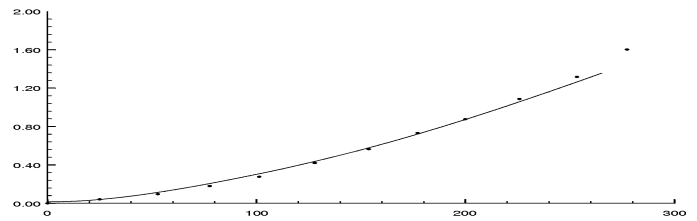
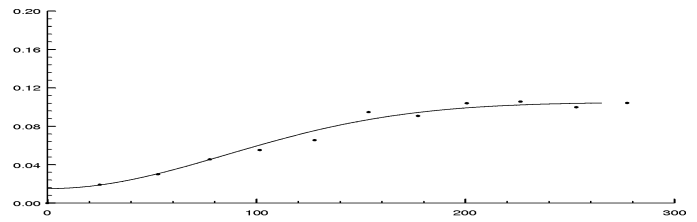


Figure 6 – Variogram models for top of clay seam elevation (continuous lines): major continuity direction (N80E) at the top, and minor continuity direction (N10W) at the bottom. Distance in meters. Dots represent the experimental variograms.

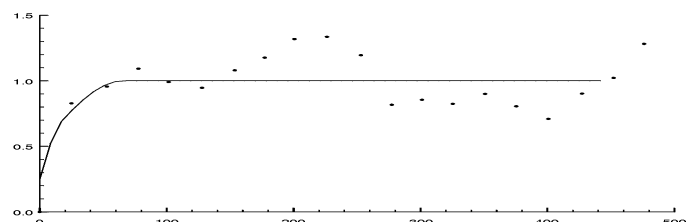
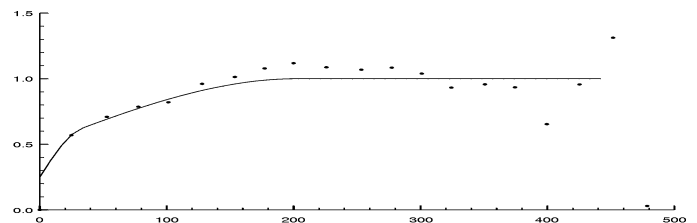


Figure 7 – Variogram model for clay seam thickness (continuous line): major continuity direction (N10W) at the top, and minor continuity direction (N80E) at the bottom. Distance in meters. Dots represent the experimental variograms.

gaussian (SGS) algorithm (Isaaks, 1990) provide the tools for this purpose. Stangler et al. (2000) presents an application of SGS to predict fluctuation in recoverable reserves for the same deposit.

Multiple simulations obtained for clay thickness were ranked by average seam thickness. The optimistic, median and pessimist scenarios were kept for further use. The criterion for ranking was based on the total seam tonnage, which means that the optimistic scenario is the one representing the model leading to the highest clay reserves. Figure 8 shows the three selected simulations. They show common characteristics, however small local variations among the maps are observed.

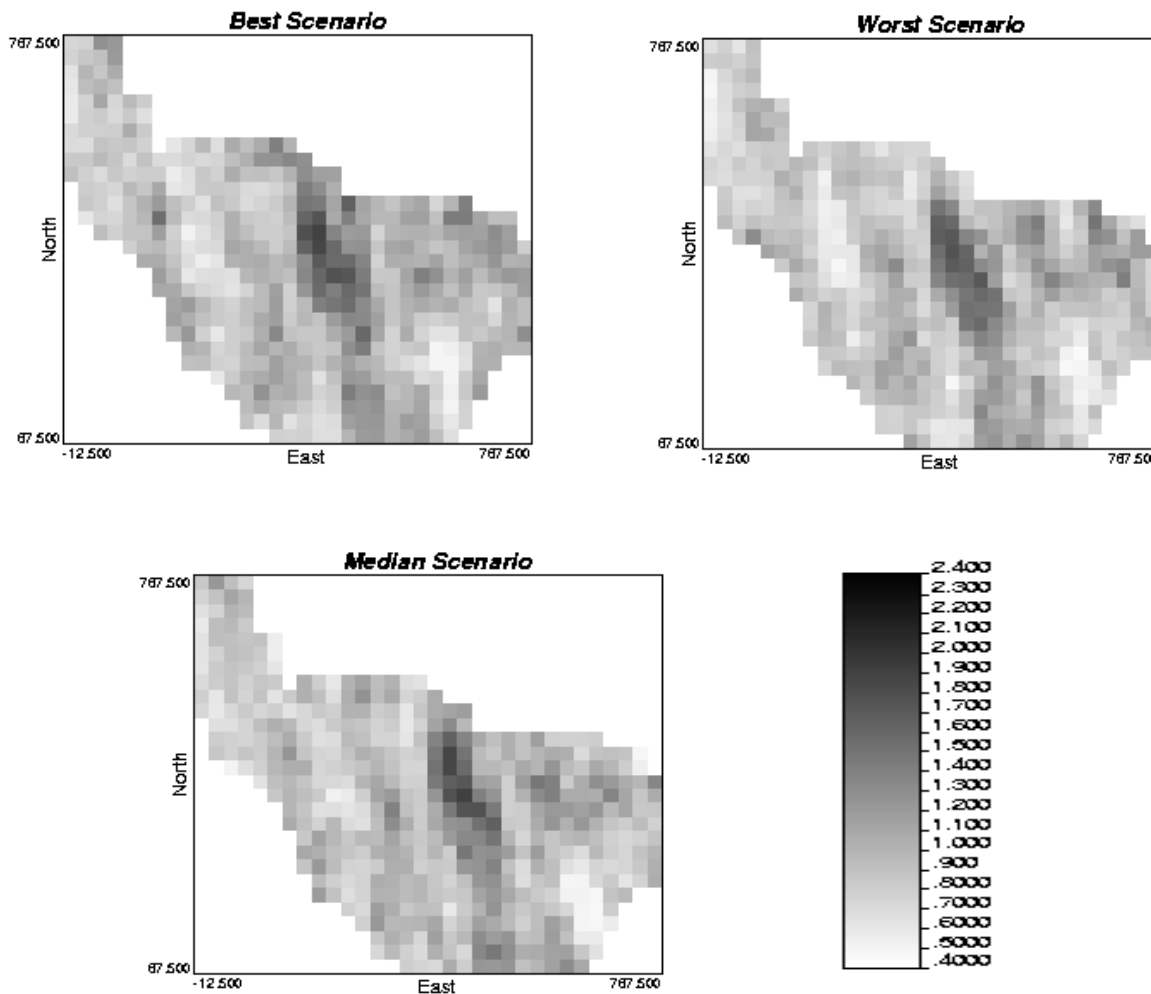


Figure 8 – Extremes (best and worst) and median scenarios for clay seam thickness. The maps represent the clay seam thickness models at 25x25m block support (3 out of 50 realizations). Values are expressed in meters.

## 7 OVERBURDEN VOLUME ESTIMATION

Several methods are commonly used to estimate overburden volume (Annels, 1991, Oliveira et al. 1995). In this study the volume was defined firstly modeling the upper and lower surfaces, calculating the volume in between the two afterwards. The three necessary computational steps are explained in what follows.

Using the variogram previously presented (Fig. 3), a topographical elevation model for the entire area was built using point kriging (Fig. 4). This grid was contoured at every 0.5m. Changes in the topographical slope gradient helped in defining the geological domains.

Elevation contours were then truncated by the boundaries delimiting the clay deposit in the plain domain, building thus the digital elevation model (DEM) (Fig. 9).

Similarly to the topographical surface, the clay hanging-wall surface was gridded using ordinary kriging, at a 25x25m block model. The isocountour map obtained is shown in Fig. 10. Note the strong similarities between the two surfaces, the original topography and the top of the clay seam.

The overburden volume was obtained directly calculating the volume defined within the two surfaces estimated by ordinary kriging: (i) terrain surface; (ii) top clay seam surface. The volume is presented in Table 1.

## 8 DISCUSSION

In the previous sections we presented different equally probable scenarios for the thickness model of a clay seam. It was also discussed a procedure using kriging to evaluate overburden volume.

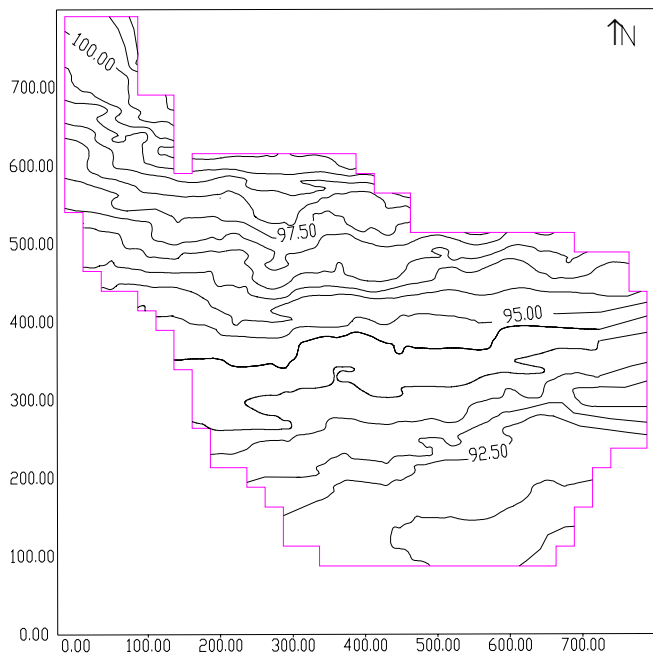


Figure 9 – Digital elevation model within the clay deposit limits (lines every 0.5m).

Combining the simulated models and the kriged volume one is able to evaluate resource and stripping ratio fluctuations (Table 1).

For this specific case study the resources tonnages can have a maximum of 3.1% above the expected value and a minimum of 2.6% below. In terms of stripping ratio the median expected value ranges approximately 3% above and below. These low expected fluctuations certainly would not impact the profitability of the operation.

## 9 CONCLUSIONS

Established geostatistical methods as ordinary kriging proved to be efficient to generate reliable digital elevation models (DEM's). Zonal anisotropies and drifts, frequent present in topographical applications, can be properly managed if the data is densely collected.

The identification of the extremes and median scenarios for global resources and stripping ratio improves decision making in feasibility studies, especially for marginally profitable deposits.

## 10 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out through the financial support of CNPq (National Science and Research Council in Brazil). The undergraduate mining engineering students Evandro dos Santos and Fernando Gambin are acknowledged for their computer support.

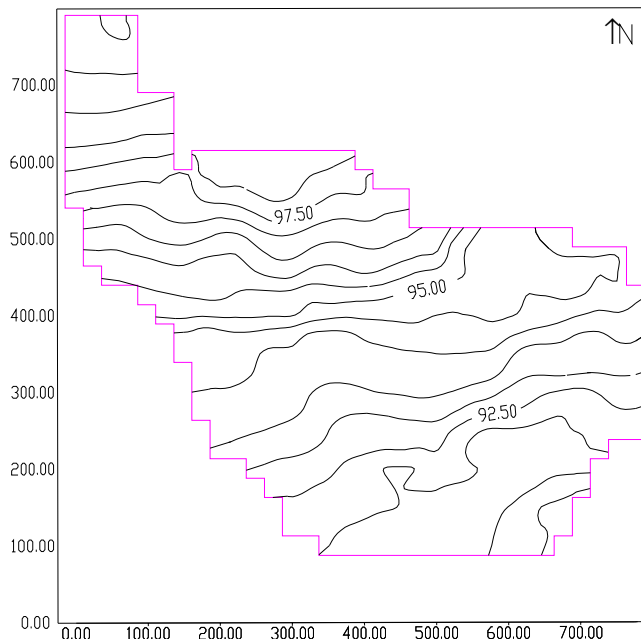


Figure 10 – The top of the clay seam elevation contours within the deposit limits (lines every 0.5m).

The authors are kindly grateful to Eliane Revestimentos Cerâmicos, especially to the geologists, Márcio Geremias and Jorge Christ, who provided the data set and permitted the publishing of this paper.

## 11 REFERENCES

- Annels, A.E., 1991. Mineral Deposits Evaluation: A Practical Approach, Chapman & Hall: UK, 436p.
- Costa, J.F., 1997. Developments in Recoverable Reserves and Ore Body Modeling, PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, The University of Queensland, 333p.
- Clarke, K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers & Geosciences* Vol 12, No. 5, Great Britain, pp. 713-722.
- Dimitrakopoulos, R., 1998. Conditional Simulation Algorithms for Modeling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimisation, *International Journal of Surface, Reclamation and Environment*, vol.12, pp.173-179.
- Gilbert, L. E., 1989. Are topographic data sets fractal? *Pageoph*, USA, Vol. 131 No 1/2, pp. 241-254.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, 438p.

Table 1 – Resources summary.

Ranked Simulation (by average thickness)	Clay Thickness Mean (m)	Clay Resources (m <sup>3</sup> and t*)	Overburden Volume (m <sup>3</sup> )	Stripping Ratio (m <sup>3</sup> /t)
highest	0.961	299,708 m <sup>3</sup> 599,416 t	96,100	0.160
median	0.932	290,722 m <sup>3</sup> 581,444 t	96,100	0.165
lowest	0.908	283,057 m <sup>3</sup> 566,114 t	96,100	0.170

\*specific gravity = 2 t / m<sup>3</sup>

Herzfeld, U.C., Eriksson, M.G., Holmlund, P., 1993. On the influence of kriging parameters on the cartographic output – a study in mapping subglacial topography - *Mathematical Geology*, Sweden, vol.25, No. 7, pp 881-899.

Isaaks, E.H., 1990. “The Application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data”, PhD Thesis, Stanford University, USA, 213p.

Journel, A.J. & Rossi, M.E., 1989. When do we need a trend model in kriging?, *Mathematical Geology*, USA, Vol. 21, No. 7, pp. 715-739.

Krige, D.G. & Rendu, J.M., 1974. The fitting of contour surfaces to hanging and footwall data for an irregular ore body, South Africa, pp. C-V 2 – C-V 12.

Luís J., Soares, A., Gonzaga, J. Silva, F. Ferreira A., 1994. Geostatistical characterization the shape of an orebody by using mining and geological data, Proceedings, 24<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), CIM published, Canada, pp. 402-409.

Olea, R. A., 1974. Optimal contour mapping using universal kriging, *Journal of Geophysical Research*, USA, Vol. 79, No. 5, pp. 695-702.

Oliveira, S.A., Koppe, J.C., Costa, J.F.C.L., 1995. Overburden volume estimation assisted by geostatistics in open cast coal mine, Proceedings, 25<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), Brisbane, pp. 181-187.

Rossi, M. E., 1988. Simplifying the practice of kriging in presence of trends, Proceedings, 21<sup>st</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), USA, pp. 253-261.

Rossi, M.E. & Alvarado C., S.B., 1998. Conditional simulations applied to recoverable reserves, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in

the Mineral Industries (APCOM), London, United Kingdom, pp. 19-23.

Rossi, M.E., 1999. Uncertainty and risk models for decision-making processes, Proceedings, 28<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), Golden, U.S.A, pp. 185-195.

Schmitt, M., Bisquay, H., 2000. Structural description of digital elevation models, CD-ROM, T20, Geostats 2000, 6<sup>th</sup> International Geostatistical Congress, Cape Town, South Africa, 9p.

Stangler, R.L., Armstrong, M., Strieder, A.J., Koppe, J.C., J.C. Costa, 2000. Geostatistical framework for modeling clay deposits: Nova Veneza case study in Southern Brazil, Proceedings, 31<sup>st</sup> International Geological Congress (IGC), Sessions of Geostatistics, Rio de Janeiro, Brazil, (unpublished).

Thwaites, A.M., 1988. Assessment of geological uncertainty for a mining project, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries (APCOM), London, United Kingdom, pp. 391-404.

## **Apêndice B – Procedimentos Laboratoriais**

### **Preparação da Amostra**

- Amostragem (sondagem);
- Limpeza das amostras;
- Quarteamento: homogeneização e redução da amostra, com auxílio de uma pá metálica, em uma caixa de madeira com bordas de aproximadamente 100x100 cm de largura e comprimento capaz de acomodar uma amostra de 30kg;
- Secagem;
- Destorroamento (britador de martelo);
- Moagem (moinho de bolas de porcelana - via úmido), com resíduo de moagem máximo 5% (#325);
- Secagem (estufa a 110°C);
- Desagregação com rolo;
- Umidificação (5 a 6%);
- Granulação em malha (#9);
- Repouso (24 horas) para homogenização da umidade;
- Prensagem;
- Secagem (estufa a 110°C);
- Queima (forno de laboratório).

### **Ensaio**

#### **Absorção d'água**

- Pesar as peças e em seguida emergi-las em recipiente com água;
- Ferver por duas horas;
- Esfriar naturalmente ou em água corrente. Os corpos devem ser colocados na vertical e sempre cobertos pela água;

- Retirar o excesso de água com um pano úmido;
- Pesar novamente com precisão de 0,1 g.

### **Retração de Queima**

- Medir o corpo-de-prova seco com precisão de 0,1 mm;
- Após a queima, com ciclo e temperatura pré-definidos, medir novamente as peças.



## Apêndice C – Banco de Dados de Sondagem

A.A. = Absorção d'água

R.L. = Retração Linear

Esp. = Espessura de Argila

A.A.A. = Acumulação de Absorção d'água

A.R.L. = Acumulação de Retração Linear

C.E. = Cobertura Estéril

### Planície

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
7	0	775	16,83	0,75	0,60	10,10	0,45	0,20
8	0	750	20,86	0,54	0,90	18,77	0,49	0,40
9	0	725	21,05	0,42	0,60	12,63	0,25	0,20
10	0	700	21,50	0,41	0,40	8,60	0,16	0,20
82	50	750	18,66	0,98	0,70	13,06	0,69	0,40
84	50	700	19,40	0,30	0,90	17,46	0,27	0,40
85	50	675	18,91	0,25	1,40	26,47	0,35	0,20
86	50	650	19,83	0,51	0,80	15,86	0,41	0,20
87	50	625	17,56	1,08	0,70	12,29	0,76	0,10
89	50	575	18,15	0,08	0,90	16,34	0,07	0,10
90	50	550	15,88	1,41	0,80	12,70	1,13	0,20
91	50	525	16,88	1,31	0,50	8,44	0,66	0,10
92	50	500	15,22	2,02	0,70	10,65	1,41	0,20
118	100	475	16,08	2,68	0,70	11,26	1,88	0,30
119	100	500	19,85	1,41	0,80	15,88	1,13	0,10
120	100	525	10,26	4,18	0,80	8,21	3,34	0,20
141	150	525	12,65	4,18	1,00	12,65	4,18	0,20
142	150	500	14,74	2,59	1,10	16,21	2,85	0,20
171	200	325	16,47	2,87	1,60	26,35	4,59	0,10
173	200	375	12,33	3,89	0,40	4,93	1,56	0,90
174	200	400	15,48	2,68	1,00	15,48	2,68	0,00
176	200	450	15,87	1,04	0,60	9,52	0,62	0,20
178	200	500	15,58	2,83	0,60	9,35	1,70	0,20
179	200	525	16,16	2,09	0,50	8,08	1,05	0,40
200	225	525	14,75	1,92	1,20	17,70	2,30	0,40
201	225	500	14,92	1,90	0,50	7,46	0,95	0,80
204	225	425	14,49	2,05	1,00	14,49	2,05	0,20
205	225	400	9,59	6,29	0,40	3,84	2,52	0,20
207	225	350	16,68	1,15	1,40	23,35	1,61	0,10
213	250	275	14,47	3,70	0,40	5,79	1,48	0,20
214	250	300	18,44	0,79	1,00	18,44	0,79	0,20
215	250	325	15,65	3,01	0,80	12,52	2,41	0,20

<b>Furo</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>A.A. (%)</b>	<b>R.L. (%)</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>A.A.A. (%.m)</b>	<b>A.R.L. (%.m)</b>	<b>C.E. (m)</b>
216	250	350	15,43	1,49	0,70	10,80	1,04	0,80
217	250	375	15,28	3,32	0,50	7,64	1,66	0,30
218	250	400	15,45	2,38	0,50	7,73	1,19	0,30
219	250	425	13,50	4,58	0,50	6,75	2,29	1,20
220	250	450	13,91	4,40	1,10	15,30	4,84	0,40
221	250	475	14,36	2,47	0,70	10,05	1,73	0,70
222	250	500	15,73	1,55	1,10	17,30	1,71	0,10
223	250	525	14,78	1,93	0,90	13,30	1,74	0,30
224	250	550	18,08	0,52	0,80	14,46	0,42	0,20
243	275	550	13,15	2,98	1,30	17,10	3,87	0,20
244	275	525	15,16	1,57	0,70	10,61	1,10	0,30
245	275	500	11,98	4,88	0,80	9,58	3,90	0,20
246	275	475	16,98	1,30	1,00	16,98	1,30	0,20
247	275	450	15,33	2,15	0,90	13,80	1,94	0,50
248	275	425	14,71	2,89	1,30	19,12	3,76	0,20
249	275	400	15,41	1,80	1,00	15,41	1,80	0,20
250	275	375	16,57	1,22	0,50	8,29	0,61	1,00
252	275	325	14,01	2,83	0,80	11,21	2,26	0,20
253	275	300	-	-	1,00	-	-	0,20
254	275	275	15,24	3,67	0,80	12,19	2,94	0,20
255	275	250	15,19	2,69	0,80	12,15	2,15	0,10
259	300	325	15,90	2,74	0,90	14,31	2,47	0,20
261	300	375	15,70	0,92	0,90	14,13	0,83	0,30
262	300	400	15,35	0,98	1,20	18,42	1,18	0,20
263	300	425	14,67	2,04	1,20	17,60	2,45	0,40
264	300	450	18,16	0,27	1,00	18,16	0,27	0,20
265	300	475	17,02	0,72	1,00	17,02	0,72	0,20
266	300	500	14,67	2,34	0,60	8,80	1,40	0,80
267	300	525	16,78	0,58	0,60	10,07	0,35	0,20
287	325	550	16,54	2,08	1,20	19,85	2,50	0,30
288	325	525	18,59	0,38	0,80	14,87	0,30	0,20
289	325	500	17,08	0,82	0,70	11,96	0,57	0,30
290	325	475	16,63	1,46	1,10	18,29	1,61	0,20
291	325	450	17,00	1,34	0,60	10,20	0,80	0,40
292	325	425	15,50	2,19	0,80	12,40	1,75	0,40
293	325	400	15,10	1,85	1,70	25,67	3,15	0,20
299	325	250	12,53	4,25	1,30	16,29	5,53	0,20
300	325	225	16,21	1,25	1,10	17,83	1,38	0,20
301	325	200	15,68	1,76	1,00	15,68	1,76	0,10
306	350	250	15,40	2,82	0,60	9,24	1,69	0,30
307	350	275	14,93	1,26	1,40	20,90	1,76	0,20
308	350	300	18,63	3,06	1,00	18,63	3,06	0,40
309	350	325	16,10	1,68	0,90	14,49	1,51	0,60
310	350	350	16,09	1,60	1,40	22,53	2,24	0,20
311	350	375	15,97	0,73	0,80	12,78	0,58	0,20
312	350	400	13,41	3,57	1,10	14,75	3,93	0,20
313	350	425	15,64	1,48	0,60	9,38	0,89	0,30
314	350	450	17,08	0,56	0,80	13,66	0,45	0,40
315	350	475	16,51	0,98	0,70	11,56	0,69	0,70
317	350	525	15,59	2,09	0,50	7,80	1,05	0,40

<b>Furo</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>A.A. (%)</b>	<b>R.L. (%)</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>A.A.A. (%.m)</b>	<b>A.R.L. (%.m)</b>	<b>C.E. (m)</b>
338	375	525	15,83	0,71	0,70	11,08	0,50	0,40
339	375	500	15,98	0,98	1,00	15,98	0,98	0,20
340	375	475	15,25	1,28	0,60	9,15	0,77	0,40
341	375	450	15,97	1,18	0,60	9,58	0,71	0,20
343	375	400	15,31	1,62	1,00	15,31	1,62	0,20
344	375	375	17,02	0,62	0,70	11,91	0,43	0,30
346	375	325	15,00	3,37	0,50	7,50	1,69	0,20
348	375	275	11,95	5,36	0,60	7,17	3,22	0,60
349	375	250	15,08	1,29	1,40	21,11	1,81	0,30
350	375	225	12,90	3,47	1,30	16,77	4,51	0,10
351	375	200	16,90	1,08	0,90	15,21	0,97	0,30
352	375	175	16,22	1,44	1,20	19,46	1,73	0,10
353	375	150	15,30	1,91	0,80	12,24	1,53	0,20
354	375	125	15,95	2,18	0,60	9,57	1,31	0,20
361	400	250	15,09	1,66	0,80	12,07	1,33	1,20
363	400	300	18,23	0,58	1,00	18,23	0,58	0,30
364	400	325	19,45	0,07	1,00	19,45	0,07	0,50
365	400	350	15,73	1,75	1,20	18,88	2,10	0,70
366	400	375	19,15	0,08	1,50	28,73	0,12	0,20
367	400	400	16,75	0,45	1,10	18,43	0,50	0,60
368	400	425	15,83	0,98	1,90	30,08	1,86	0,20
369	400	450	16,33	0,98	2,20	35,93	2,16	0,30
370	400	475	14,91	1,42	1,70	25,35	2,41	0,20
396	425	475	15,26	1,75	2,10	32,05	3,68	0,40
397	425	450	15,00	1,38	2,00	30,00	2,76	0,60
398	425	425	15,31	1,64	1,70	26,03	2,79	0,40
399	425	400	15,49	1,63	1,70	26,33	2,77	0,30
400	425	375	14,24	2,05	1,50	21,36	3,08	0,20
401	425	350	14,17	2,65	1,50	21,26	3,98	0,40
402	425	325	15,34	1,85	1,80	27,61	3,33	0,20
403	425	300	16,41	0,91	0,40	6,56	0,36	0,80
404	425	275	18,17	0,00	1,20	21,80	0,00	0,10
405	425	250	15,47	2,35	0,80	12,38	1,88	0,70
406	425	225	15,86	1,05	1,00	15,86	1,05	0,10
407	425	200	14,21	2,88	0,40	5,68	1,15	1,00
408	425	175	16,72	1,75	0,90	15,05	1,58	0,10
409	425	150	13,19	2,03	1,00	13,19	2,03	0,10
411	450	125	15,82	0,42	0,40	6,33	0,17	0,20
412	450	150	16,56	1,31	0,90	14,90	1,18	0,10
413	450	175	14,36	2,38	1,10	15,80	2,62	0,20
414	450	200	14,28	3,65	0,50	7,14	1,83	1,00
415	450	225	15,55	1,40	1,10	17,11	1,54	0,10
416	450	250	17,12	0,91	0,60	10,27	0,55	1,20
418	450	300	14,59	2,20	1,60	23,34	3,52	0,20
419	450	325	15,64	1,11	1,40	21,90	1,55	0,40
420	450	350	14,58	2,17	1,40	20,41	3,04	0,40
421	450	375	16,41	0,63	1,90	31,18	1,20	0,40
422	450	400	16,31	1,80	2,00	32,62	3,60	0,10
423	450	425	17,21	0,47	1,50	25,82	0,71	0,20
452	475	425	15,93	0,73	0,60	9,56	0,44	0,80

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
453	475	400	15,37	1,37	1,10	16,91	1,51	0,20
454	475	375	14,04	1,75	2,40	33,70	4,20	0,40
455	475	350	15,76	0,52	1,60	25,22	0,83	0,40
456	475	325	16,50	0,33	1,50	24,75	0,50	0,20
457	475	300	15,54	0,86	1,60	24,86	1,38	0,20
458	475	275	15,16	1,58	1,00	15,16	1,58	0,20
459	475	250	15,52	2,43	1,50	23,28	3,65	0,10
461	475	200	14,57	3,23	0,80	11,66	2,58	0,30
462	475	175	16,12	0,72	1,70	27,40	1,22	0,20
463	475	150	14,37	2,09	1,40	20,12	2,93	0,10
464	475	125	14,88	1,73	1,70	25,30	2,94	0,10
465	475	100	15,65	0,87	1,30	20,35	1,13	0,50
467	500	100	16,79	1,23	1,30	21,83	1,60	0,20
468	500	125	15,44	2,65	1,30	20,07	3,45	0,20
470	500	175	18,51	1,18	0,80	14,81	0,94	0,20
472	500	225	15,28	2,96	1,30	19,86	3,85	0,10
473	500	250	16,71	1,47	1,40	23,39	2,06	0,20
474	500	275	17,45	0,20	1,50	26,18	0,30	0,10
475	500	300	16,13	0,98	1,20	19,36	1,18	0,20
476	500	325	15,83	1,32	1,60	25,33	2,11	0,20
477	500	350	16,25	0,81	1,90	30,88	1,54	0,20
478	500	375	15,40	1,15	1,20	18,48	1,38	0,20
479	500	400	15,99	0,89	1,70	27,18	1,51	0,20
480	500	425	15,06	1,05	1,80	27,11	1,89	0,20
507	525	425	15,78	0,83	0,50	7,89	0,42	0,60
508	525	400	14,62	1,68	0,70	10,23	1,18	0,80
509	525	375	15,72	0,64	0,60	9,43	0,38	0,80
510	525	350	16,02	0,67	0,70	11,21	0,47	0,40
511	525	325	15,54	0,86	1,50	23,31	1,29	0,40
512	525	300	14,81	1,32	1,40	20,73	1,85	0,20
513	525	275	16,33	1,21	0,90	14,70	1,09	0,70
514	525	250	16,63	0,72	0,80	13,30	0,58	0,40
515	525	225	15,49	1,52	1,30	20,14	1,98	0,20
516	525	200	14,82	2,69	0,90	13,34	2,42	0,20
518	525	150	15,89	1,47	1,40	22,25	2,06	0,10
519	525	125	15,08	1,99	1,20	18,10	2,39	0,10
520	525	100	14,17	3,50	1,30	18,42	4,55	0,10
525	550	150	14,05	3,47	0,80	11,24	2,78	0,20
526	550	175	14,98	0,55	0,70	10,49	0,39	0,40
527	550	200	15,66	1,67	1,00	15,66	1,67	0,10
529	550	250	16,60	0,03	0,50	8,30	0,02	1,20
530	550	275	14,31	1,98	0,70	10,02	1,39	0,30
531	550	300	14,80	1,29	1,10	16,28	1,42	0,20
532	550	325	13,76	2,95	0,80	11,01	2,36	0,20
533	550	350	14,38	2,07	0,70	10,07	1,45	0,10
535	550	400	16,21	0,77	1,00	16,21	0,77	0,10
536	550	425	14,69	1,39	1,60	23,50	2,22	0,40
563	575	425	12,88	2,26	1,60	20,61	3,62	0,20
564	575	400	13,10	1,86	1,30	17,03	2,42	0,10
565	575	375	15,05	1,34	0,90	13,55	1,21	0,80

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
566	575	350	13,40	2,59	1,10	14,74	2,85	0,10
567	575	325	15,24	1,06	1,10	16,76	1,17	0,10
568	575	300	15,09	1,27	1,00	15,09	1,27	0,60
569	575	275	15,92	0,12	1,30	20,70	0,16	0,10
570	575	250	16,38	0,21	0,90	14,74	0,19	0,60
571	575	225	15,89	1,72	0,60	9,53	1,03	1,10
572	575	200	16,91	0,20	1,70	28,75	0,34	0,20
574	575	150	18,89	0,03	1,10	20,78	0,03	0,20
575	575	125	18,49	0,53	1,00	18,49	0,53	0,20
576	575	100	15,48	1,61	1,50	23,22	2,42	0,10
583	600	175	17,96	0,23	1,40	25,14	0,32	0,20
585	600	225	15,79	0,94	0,40	6,32	0,38	0,80
586	600	250	15,56	1,22	1,50	23,34	1,83	0,40
588	600	300	14,10	2,03	1,00	14,10	2,03	0,50
589	600	325	15,72	0,79	0,80	12,58	0,63	0,20
590	600	350	15,19	0,92	1,60	24,30	1,47	0,40
591	600	375	14,74	0,59	1,30	19,16	0,77	0,10
618	625	425	14,62	0,79	0,50	7,31	0,40	1,00
619	625	400	15,26	1,63	1,30	19,84	2,12	0,10
620	625	375	15,28	0,58	1,60	24,45	0,93	0,20
621	625	350	13,87	0,95	0,90	12,48	0,86	1,20
623	625	300	13,93	1,21	0,70	9,75	0,85	0,80
624	625	275	16,54	0,36	0,90	14,89	0,32	0,10
625	625	250	17,80	1,13	0,40	7,12	0,45	0,60
626	625	225	15,36	1,49	0,40	6,14	0,60	0,80
627	625	200	15,36	1,58	1,20	18,43	1,90	0,20
628	625	175	15,62	0,37	1,00	15,62	0,37	0,40
632	650	150	15,22	0,39	0,40	6,09	0,16	0,90
636	650	250	15,09	1,88	0,40	6,04	0,75	0,40
639	650	325	15,56	1,44	1,10	17,12	1,58	0,40
641	650	375	15,37	0,74	1,10	16,91	0,81	0,40
642	650	400	13,55	1,12	0,90	12,20	1,01	0,50
643	650	425	12,93	1,82	0,80	10,34	1,46	0,80
668	675	425	12,45	2,46	1,60	19,92	3,94	0,30
669	675	400	14,83	2,61	0,90	13,35	2,35	0,60
670	675	375	12,56	3,72	1,60	20,10	5,95	0,20
671	675	350	13,55	1,29	1,20	16,26	1,55	0,40
672	675	325	10,79	4,53	0,90	9,71	4,08	0,10
680	700	300	12,89	1,37	0,80	10,31	1,10	1,00
681	700	325	14,24	1,51	1,00	14,24	1,51	0,10
682	700	350	14,80	0,90	0,60	8,88	0,54	0,40
683	700	375	10,10	4,44	0,80	8,08	3,55	1,30
684	700	400	11,17	2,81	1,80	20,11	5,06	0,50
685	700	425	13,49	2,00	1,10	14,84	2,20	0,90
707	725	400	12,21	2,14	1,10	13,43	2,35	0,80
708	725	375	13,82	1,26	1,60	22,11	2,02	0,30
710	725	325	14,18	0,63	0,50	7,09	0,32	0,40
711	725	300	13,52	2,25	0,60	8,11	1,35	0,40
714	750	300	13,81	1,69	1,00	13,81	1,69	0,20

## Tálus

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
122	100	575	11,13	5,69	0,60	6,68	3,41	0,10
125	100	650	20,05	0,72	0,80	16,04	0,58	0,20
126	100	675	14,60	1,72	1,20	17,52	2,06	0,20
127	100	700	9,50	5,76	1,30	12,35	7,49	1,20
128	100	725	20,17	0,13	1,60	32,27	0,21	0,20
129	100	750	17,99	0,45	0,80	14,39	0,36	0,20
130	100	775	12,82	3,96	1,10	14,10	4,36	0,20
131	150	775	10,28	5,08	1,70	17,48	8,64	0,80
132	150	750	16,18	2,55	1,00	16,18	2,55	0,20
134	150	700	14,13	3,13	0,90	12,72	2,82	0,50
135	150	675	16,25	0,81	1,10	17,88	0,89	0,50
136	150	650	16,98	1,13	0,90	15,28	1,02	0,50
137	150	625	16,28	1,55	1,10	17,91	1,71	0,20
138	150	600	14,73	3,52	0,70	10,31	2,46	0,00
182	200	600	15,11	1,21	1,30	19,64	1,57	0,10
183	200	625	12,77	3,44	0,40	5,11	1,38	1,20
184	200	650	12,65	2,69	0,80	10,12	2,15	0,80
187	200	725	14,38	1,92	1,20	17,26	2,30	1,40
188	200	750	13,32	1,77	0,60	7,99	1,06	2,20
189	200	775	10,67	3,71	1,10	11,74	4,08	0,90
190	225	775	11,95	2,38	0,90	10,76	2,14	1,80
191	225	750	11,25	3,49	1,10	12,38	3,84	1,40
193	225	700	11,70	4,60	0,70	8,19	3,22	0,60
194	225	675	15,96	1,89	0,40	6,38	0,76	0,60
195	225	650	13,89	3,73	0,70	9,72	2,61	1,00
196	225	625	13,27	3,37	0,60	7,96	2,02	1,00
197	225	600	15,78	1,70	0,50	7,89	0,85	1,00
199	225	550	13,03	2,98	0,70	9,12	2,09	0,30
225	250	575	15,80	2,98	0,50	7,90	1,49	0,40
226	250	600	17,54	1,01	0,90	15,79	0,91	0,20
228	250	650	15,96	1,60	0,60	9,58	0,96	0,20
229	250	675	16,38	0,99	0,80	13,10	0,79	0,50
230	250	700	14,79	2,33	1,00	14,79	2,33	0,20
231	250	725	15,71	1,04	1,30	20,42	1,35	0,20
232	250	750	13,56	3,42	0,80	10,85	2,74	0,80
236	275	725	14,21	2,72	2,00	28,42	5,44	0,10
237	275	700	13,80	3,42	2,00	27,60	6,84	0,80
238	275	675	16,99	1,62	0,80	13,59	1,30	0,20
240	275	625	12,00	6,43	0,80	9,60	5,14	0,40
241	275	600	16,49	0,74	1,70	28,03	1,26	0,10
242	275	575	16,96	0,57	1,30	22,05	0,74	0,50
269	300	575	11,98	5,85	1,00	11,98	5,85	0,20
270	300	600	16,87	0,75	0,80	13,50	0,60	0,20
271	300	625	14,22	3,06	2,30	32,71	7,04	0,40
272	300	650	13,04	4,38	1,10	14,34	4,82	0,20
273	300	675	17,67	1,09	0,60	10,60	0,65	0,50

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
275	300	725	14,34	2,81	0,40	5,74	1,12	0,40
276	300	750	14,64	2,07	0,60	8,78	1,24	0,20
278	325	775	19,30	0,57	0,40	7,72	0,23	0,20
280	325	725	14,87	2,39	0,50	7,44	1,20	0,20
281	325	700	15,13	1,46	0,40	6,05	0,58	0,20
284	325	625	15,71	1,24	1,00	15,71	1,24	0,30
320	350	600	17,87	0,32	0,70	12,51	0,22	0,20
321	350	625	17,24	0,72	0,50	8,62	0,36	0,50
322	350	650	15,45	1,39	1,50	23,18	2,09	0,20
323	350	675	14,84	1,48	1,00	14,84	1,48	0,40
324	350	700	16,78	1,17	0,50	8,39	0,59	0,40
326	350	750	17,60	0,73	0,60	10,56	0,44	0,30
329	375	750	15,37	1,33	0,50	7,69	0,67	1,00
331	375	700	14,46	1,55	1,40	20,24	2,17	0,20
332	375	675	13,57	3,34	1,50	20,36	5,01	0,80
333	375	650	14,39	2,95	0,70	10,07	2,07	0,40
334	375	625	15,48	1,41	0,90	13,93	1,27	0,40
336	375	575	16,89	0,43	0,70	11,82	0,30	0,40
337	375	550	13,41	3,13	1,40	18,77	4,38	0,20
373	400	550	17,13	0,77	0,90	15,42	0,69	0,20
374	400	575	14,70	3,33	0,60	8,82	2,00	0,50
376	400	625	14,88	3,38	0,80	11,90	2,70	0,20
378	400	675	12,34	5,49	0,60	7,40	3,29	0,40
379	400	700	12,82	3,99	1,10	14,10	4,39	0,20
381	400	750	10,62	5,20	2,10	22,30	10,92	0,60
382	400	775	12,36	3,57	0,70	8,65	2,50	2,10
386	425	725	13,34	3,05	1,90	25,35	5,80	0,90
387	425	700	12,68	3,73	0,80	10,14	2,98	1,00
388	425	675	14,55	1,36	1,60	23,28	2,18	0,90
389	425	650	16,13	0,24	0,90	14,52	0,22	0,30
390	425	625	14,13	2,47	1,80	25,43	4,45	0,70
391	425	600	13,68	3,55	0,80	10,94	2,84	0,90
393	425	550	14,38	2,00	0,90	12,94	1,80	0,60
394	425	525	15,46	0,76	0,50	7,73	0,38	1,40
395	425	500	14,94	0,88	2,40	35,86	2,11	0,40
424	450	450	16,19	1,06	1,80	29,14	1,91	0,20
425	450	475	18,72	0,10	1,40	26,21	0,14	0,20
426	450	500	14,77	2,25	1,60	23,63	3,60	0,20
427	450	525	14,23	2,09	2,00	28,46	4,18	0,10
428	450	550	14,26	1,63	2,00	28,52	3,26	0,20
429	450	575	14,51	1,61	0,90	13,06	1,45	0,80
430	450	600	15,47	0,93	1,60	24,75	1,49	0,40
431	450	625	10,54	5,18	1,00	10,54	5,18	0,90
432	450	650	12,74	2,76	1,80	22,93	4,97	0,20
433	450	675	12,46	3,43	1,80	22,43	6,17	0,70
434	450	700	10,95	4,15	1,50	16,43	6,23	0,50
435	450	725	11,36	4,20	1,40	15,90	5,88	0,70
436	450	750	12,12	3,50	1,90	23,03	6,65	0,70
439	475	750	12,53	3,61	2,50	31,33	9,03	0,80
440	475	725	11,76	3,22	1,10	12,94	3,54	0,90

Furo	X (m)	Y (m)	A.A. (%)	R.L. (%)	Esp. (m)	A.A.A. (%.m)	A.R.L. (%.m)	C.E. (m)
441	475	700	13,21	2,47	2,10	27,74	5,19	0,80
442	475	675	14,26	1,48	2,70	38,50	4,00	0,40
445	475	600	11,71	3,47	1,50	17,57	5,21	0,40
446	475	575	14,09	2,28	0,60	8,45	1,37	2,00
447	475	550	12,22	3,30	2,40	29,33	7,92	0,10
448	475	525	13,42	3,01	2,00	26,84	6,02	0,10
449	475	500	14,44	2,14	0,50	7,22	1,07	1,60
450	475	475	14,97	1,72	1,80	26,95	3,10	0,20
451	475	450	14,22	1,42	0,80	11,38	1,14	1,60
481	500	450	17,17	0,41	1,70	29,19	0,70	0,20
482	500	475	14,22	1,66	1,70	24,17	2,82	0,20
483	500	500	14,16	1,50	1,80	25,49	2,70	0,20
484	500	525	13,33	2,70	1,90	25,33	5,13	0,10
485	500	550	14,13	1,91	1,90	26,85	3,63	0,20
486	500	575	12,74	2,42	2,30	29,30	5,57	0,20
487	500	600	13,23	2,16	1,60	21,17	3,46	0,40
488	500	625	12,56	2,94	1,20	15,07	3,53	0,20
489	500	650	12,84	2,57	0,20	2,57	0,51	1,40
490	500	675	11,56	2,97	2,00	23,12	5,94	1,10
491	500	700	14,43	2,25	2,20	31,75	4,95	1,40
492	500	725	13,16	2,38	1,90	25,00	4,52	3,10
494	525	750	14,47	1,92	1,50	21,71	2,88	0,70
495	525	725	13,01	2,25	1,70	22,12	3,83	0,80
496	525	700	13,65	2,54	0,40	5,46	1,02	3,00
497	525	675	12,44	2,43	2,40	29,86	5,83	0,40
498	525	650	13,81	2,04	2,20	30,38	4,49	0,80
499	525	625	15,04	0,84	2,00	30,08	1,68	1,60
500	525	600	15,86	0,49	0,90	14,27	0,44	3,10
501	525	575	14,13	2,22	3,00	42,39	6,66	1,00
502	525	550	13,69	2,52	1,90	26,01	4,79	0,80
503	525	525	15,16	1,21	1,40	21,22	1,69	0,70
504	525	500	14,51	1,19	1,60	23,22	1,90	0,20
505	525	475	14,51	1,78	1,60	23,22	2,85	0,20
506	525	450	13,85	2,29	1,30	18,01	2,98	0,40
537	550	450	12,94	3,13	1,40	18,12	4,38	0,30
538	550	475	13,13	2,93	0,70	9,19	2,05	1,30
539	550	500	13,51	1,69	0,80	10,81	1,35	2,30
540	550	525	13,65	3,46	1,40	19,11	4,84	0,40
541	550	550	15,35	0,22	1,40	21,49	0,31	2,00
542	550	575	14,89	0,61	0,40	5,96	0,24	2,70
543	550	600	14,42	0,73	0,70	10,09	0,51	2,00
544	550	625	12,40	2,89	2,10	26,04	6,07	0,90
545	550	650	12,33	2,17	0,60	7,40	1,30	2,20
546	550	675	12,04	3,06	0,80	9,63	2,45	1,50
547	550	700	8,60	4,36	0,50	4,30	2,18	1,50
553	575	675	5,18	6,54	0,50	2,59	3,27	1,50
554	575	650	11,46	2,68	0,80	9,17	2,14	2,00
555	575	625	10,51	4,13	0,40	4,20	1,65	2,00
556	575	600	12,92	1,85	2,70	34,88	5,00	0,30
557	575	575	10,43	5,37	1,50	15,65	8,06	2,00



<b>Furo</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>A.A. (%)</b>	<b>R.L. (%)</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>A.A.A. (%.m)</b>	<b>A.R.L. (%.m)</b>	<b>C.E. (m)</b>
558	575	550	11,77	2,00	0,90	10,59	1,80	2,60
559	575	525	10,27	4,68	1,00	10,27	4,68	0,80
560	575	500	10,27	4,68	1,70	17,46	7,96	0,80
562	575	450	15,48	0,28	1,30	20,12	0,36	0,80
597	600	525	15,50	0,61	0,80	12,40	0,49	0,20
598	600	550	9,82	5,41	1,60	15,71	8,66	0,20
602	600	650	11,67	3,36	1,30	15,17	4,37	1,00
603	600	675	8,56	5,07	1,40	11,98	7,10	0,40
610	625	625	13,64	3,61	0,90	12,28	3,25	0,40
612	625	575	15,07	1,79	1,10	16,58	1,97	0,50
615	625	500	10,84	3,73	1,70	18,43	6,34	0,40
616	625	475	12,96	1,93	0,70	9,07	1,35	0,80
617	625	450	14,84	1,03	1,80	26,71	1,85	0,30
644	650	450	14,46	1,41	1,60	23,14	2,26	0,20
646	650	500	11,81	2,70	1,10	12,99	2,97	0,40
647	650	525	8,15	5,24	0,80	6,52	4,19	0,10
648	650	550	13,70	2,61	1,20	16,44	3,13	0,60
649	650	575	11,43	3,80	1,40	16,00	5,32	0,20
650	650	600	12,84	2,33	0,80	10,27	1,86	0,20
651	650	625	11,11	3,78	0,80	8,89	3,02	0,20
663	675	550	9,64	5,16	1,10	10,60	5,68	1,10
664	675	525	10,16	3,44	1,40	14,22	4,82	1,30
665	675	500	10,77	4,77	0,90	9,69	4,29	0,20
666	675	475	11,68	3,25	1,10	12,85	3,58	0,60
667	675	450	9,71	4,34	1,40	13,59	6,08	0,20
686	700	450	12,05	3,43	1,10	13,26	3,77	0,20
687	700	475	10,46	4,20	0,60	6,28	2,52	0,90
688	700	500	12,16	2,77	1,70	20,67	4,71	0,10
689	700	525	6,79	4,75	0,80	5,43	3,80	1,60
690	700	550	13,03	2,33	2,00	26,06	4,66	1,00
691	700	575	5,80	7,59	2,20	12,76	16,70	1,20
701	725	550	4,18	8,19	2,00	8,36	16,38	1,20
703	725	500	11,02	2,85	1,40	15,43	3,99	0,30
704	725	475	4,52	6,73	1,50	6,78	10,10	0,50
705	725	450	10,69	3,95	1,30	13,90	5,14	0,20
715	750	325	11,03	3,14	0,70	7,72	2,20	0,40
716	750	350	11,63	4,06	1,20	13,96	4,87	0,70
717	750	375	11,77	2,75	1,40	16,48	3,85	0,40
719	750	425	11,69	3,87	0,60	7,01	2,32	0,70
720	750	450	11,34	3,14	0,80	9,07	2,51	0,20
721	750	475	10,93	4,74	0,90	9,84	4,27	0,80
737	775	500	8,32	4,51	1,00	8,32	4,51	0,50
738	775	475	13,67	2,58	0,80	10,94	2,06	0,70
740	775	425	11,35	4,11	0,70	7,95	2,88	0,80
742	775	375	9,73	4,06	1,00	9,73	4,06	1,00

## Apêndice D – Caracterização Global do Depósito

Decisões mineiras nem sempre estão atreladas necessariamente à delimitação em domínios geológicos ou mesmo geoestatísticos. Assim, é interessante obter-se uma visão da área pesquisada como um todo, a partir dos resultados da krigagem em blocos.

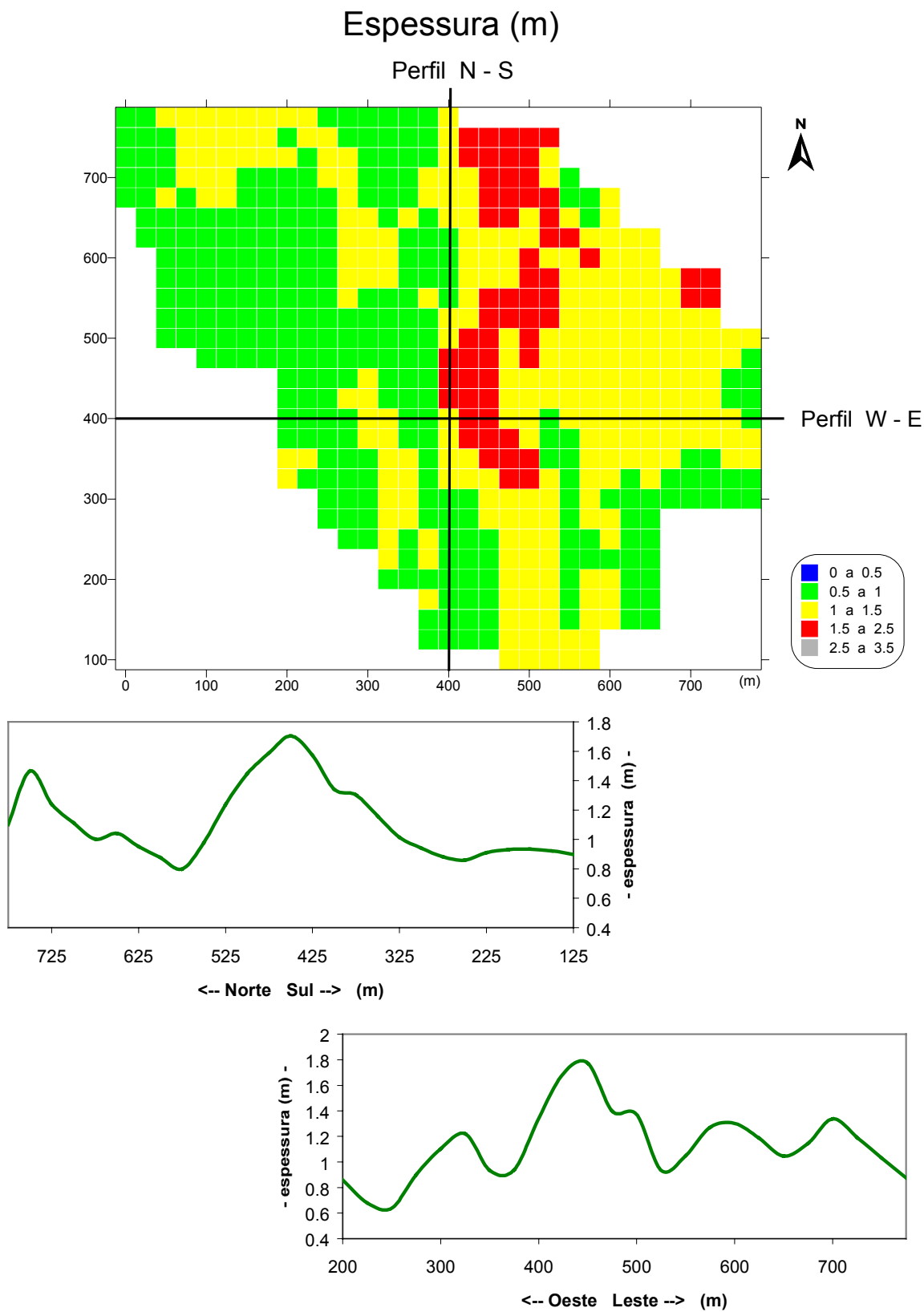
As Figuras D.1, D.2 e D.3 apresentam os resultados da estimativa por krigagem em blocos para o depósito como um todo, individualmente para cada variável, juntamente com seções verticais N-S e E-W, cortando o centro da área estimada. Essas direções foram escolhidas porque coincidem com a orientação das propriedades, minifúndios alongados no sentido N-S, com algumas subdivisões perpendiculares. Tanto eventuais trabalhos mineiros quanto de recuperação ambiental deveriam necessariamente tomar em consideração essa conformação das propriedades. O ideal, pelo menos em caso de mineração, seria ter-se em mãos várias dessas seções paralelamente distribuídas, a fim de melhor guiar os trabalhos de lavra. Aqui são apresentadas apenas duas seções perpendicularmente dispostas, exemplificando representações gráficas neste sentido. Os valores tomados como referência para construção dessa seções, embora representativos de um bloco 25m x 25m, foram considerados como pontos, para se ter uma idéia de tendências naquela determinada direção.

Os blocos estimados para espessura da camada de argila (Figura D.1) confirmam a tendência observada nos furos de sondagem, das maiores espessuras ocorrerem no centro-norte da área pesquisada, na forma de um canal de orientação geral N-S. As seções mostram uma grande flutuação na direção W-E, e o efeito do canal na direção N-S. Para retração linear (Figura D.2), a continuidade NW-SE é notória, sendo os valores maiores que 2,5 % (caracterizando já um material estéril), nitidamente predominantes no N do depósito. Tal tendência é claramente observável na seção vertical N-S, sendo mais oscilante na direção W-E. A absorção d'água mostra no mapa da Figura D.3 igualmente uma forte continuidade na direção NW-SE, com os valores progressivamente aumentando de N para S, conforme mostra a seção vertical

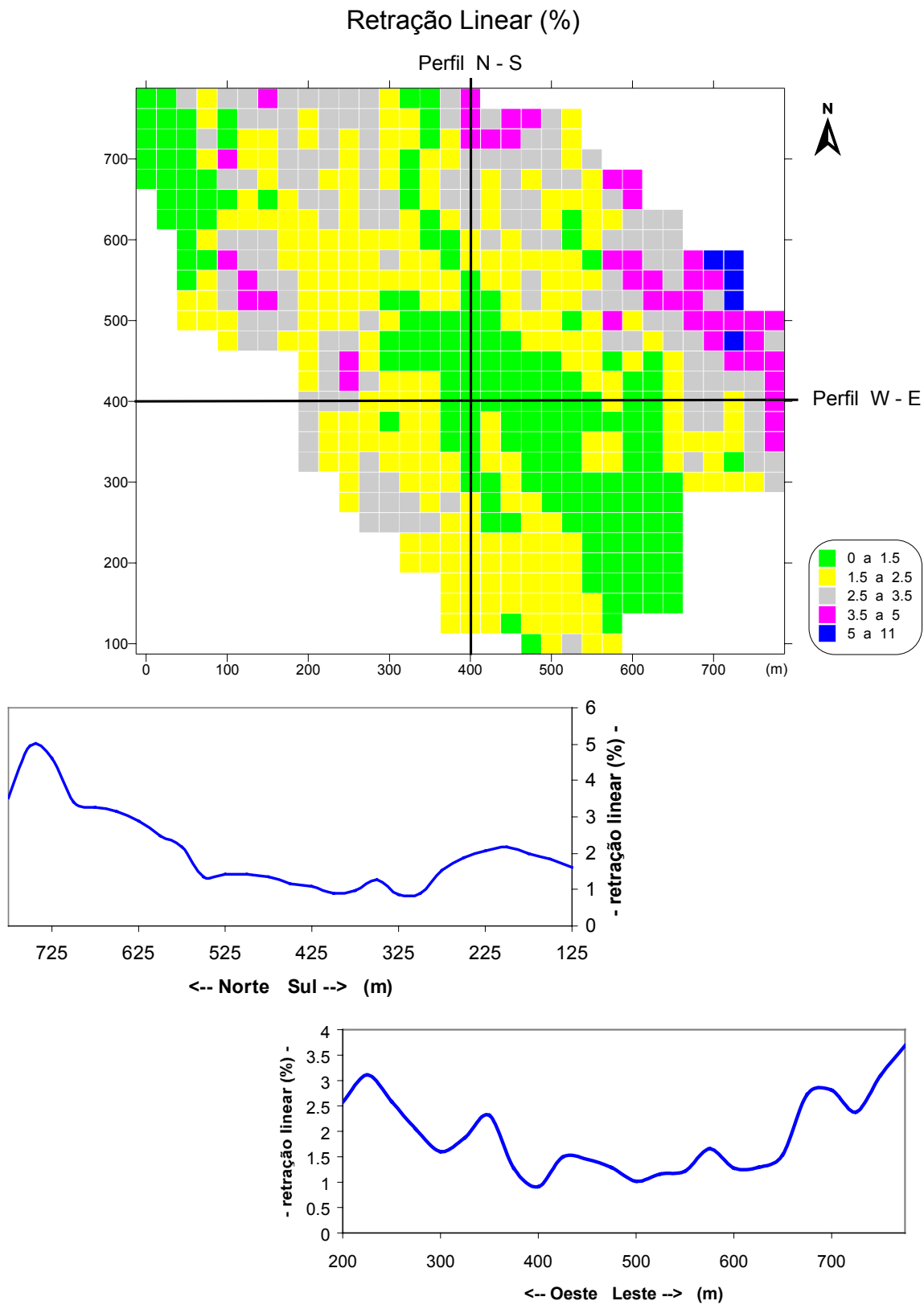
nesta direção. Na direção W-E, os valores mantêm-se aproximadamente constantes, com uma queda considerável no extremo E.

A partir dos resultados estimados para cada variável de qualidade, procede-se à classificação cerâmica da argila em cada bloco. As Figuras D.4 e D.5 apresentam respectivamente a classificação dos blocos krigados em estéreis ou mineralizados, e também em relação ao tipo de argila cerâmica.

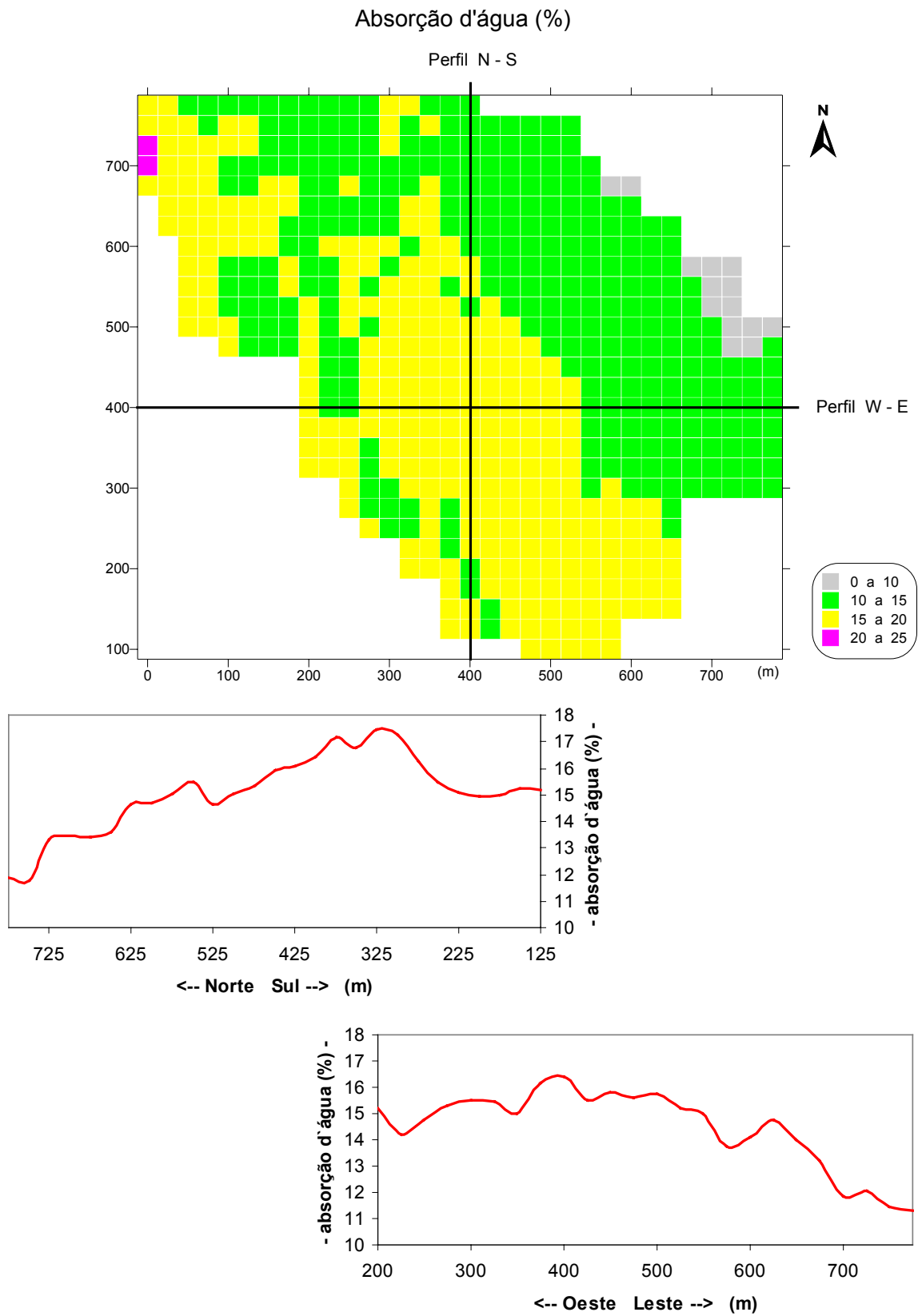
Em casos como o presente, onde se tem mais de uma variável de interesse e a classificação da argila é feita com base em dois atributos cerâmicos tomados em conjunto, é interessante a visualização simultânea das diferentes variáveis. A Figura D.6 combina os valores estimados de espessura, vistos em relevo e dando uma idéia de dimensão do depósito, por extensão dos recursos *in situ*, com a classificação cerâmica dos blocos. A parte SE da jazida é assim facilmente visualizável como sendo a região mais favorável para as três variáveis tomadas no conjunto. Já a Figura D.7 combina os mesmos valores estimados de espessura, vistos em relevo como antes, com os valores estimados dos atributos de qualidade, permitindo a análise integrada das três variáveis bloco-a-bloco.



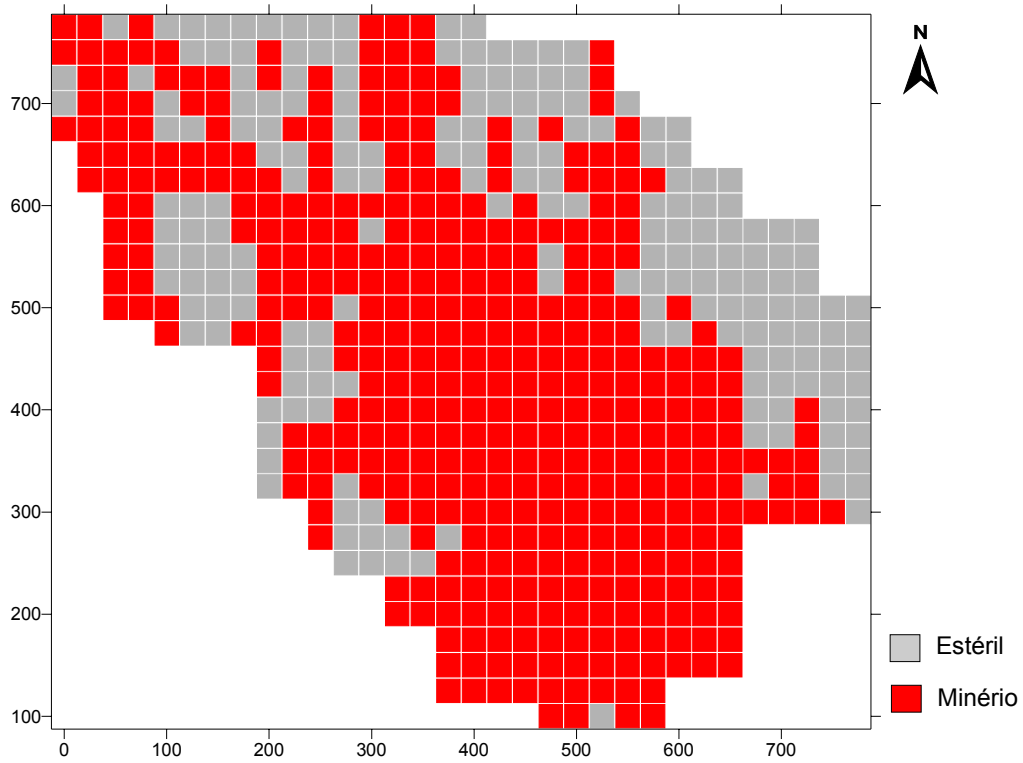
**Figura D.1- Espessura estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste.**



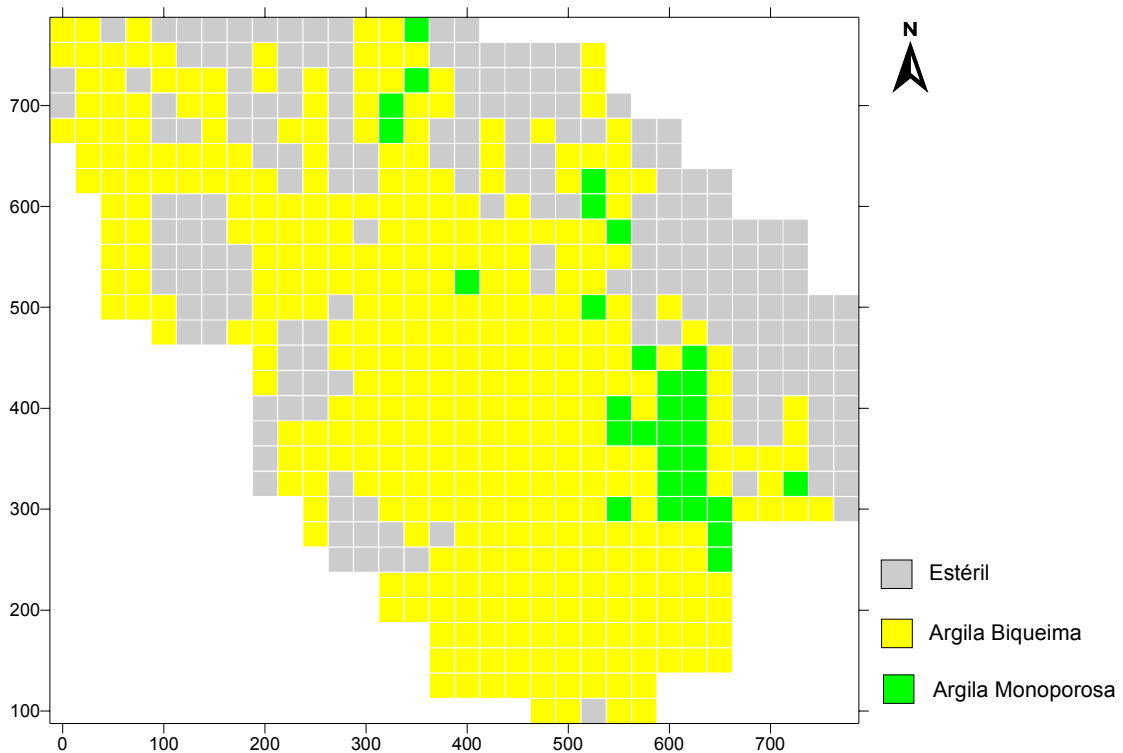
**Figura D.2 - Retração Linear estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste.**



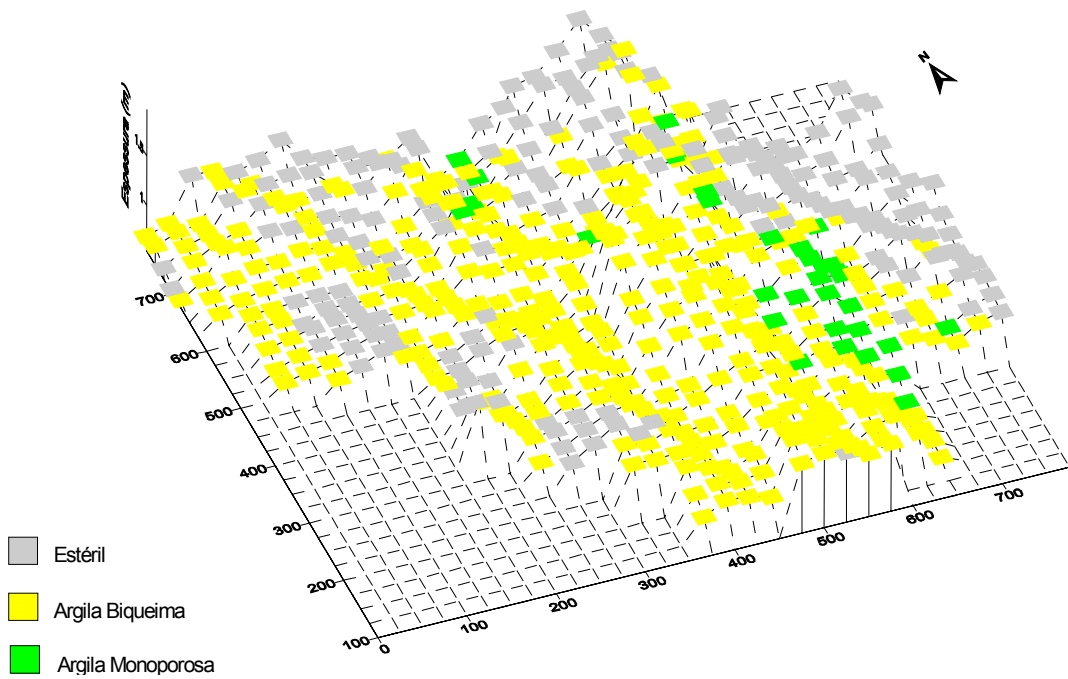
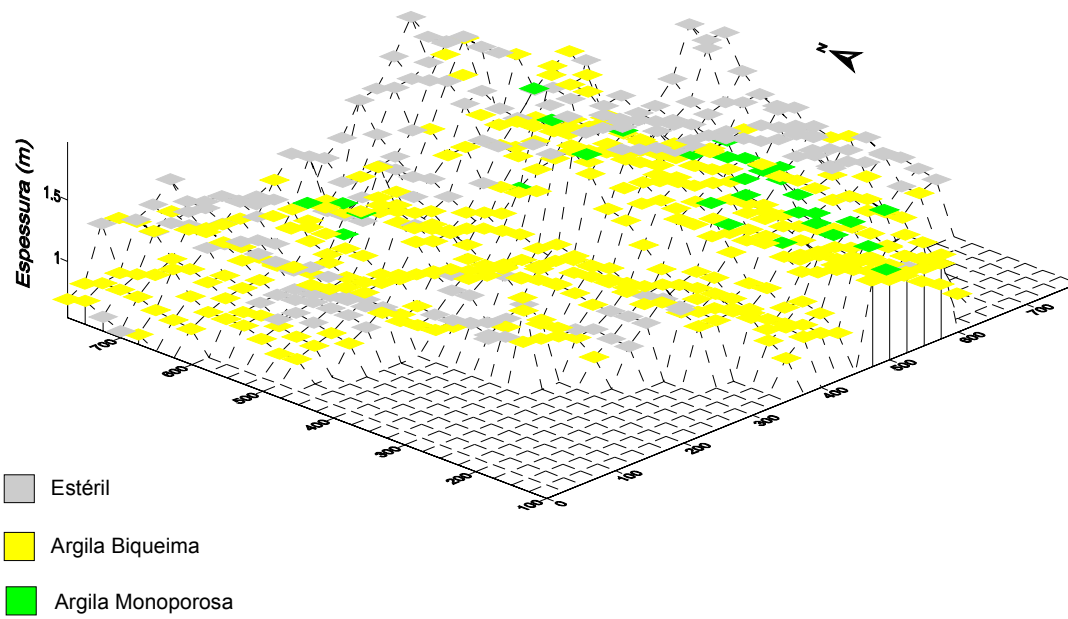
**Figura D.3 - Absorção d'água estimada em blocos: mapa e seções verticais Norte-Sul e Oeste-Leste.**



**Figura D.4 - Localização dos blocos 25m x 25m classificados como Estéril e Minério.**

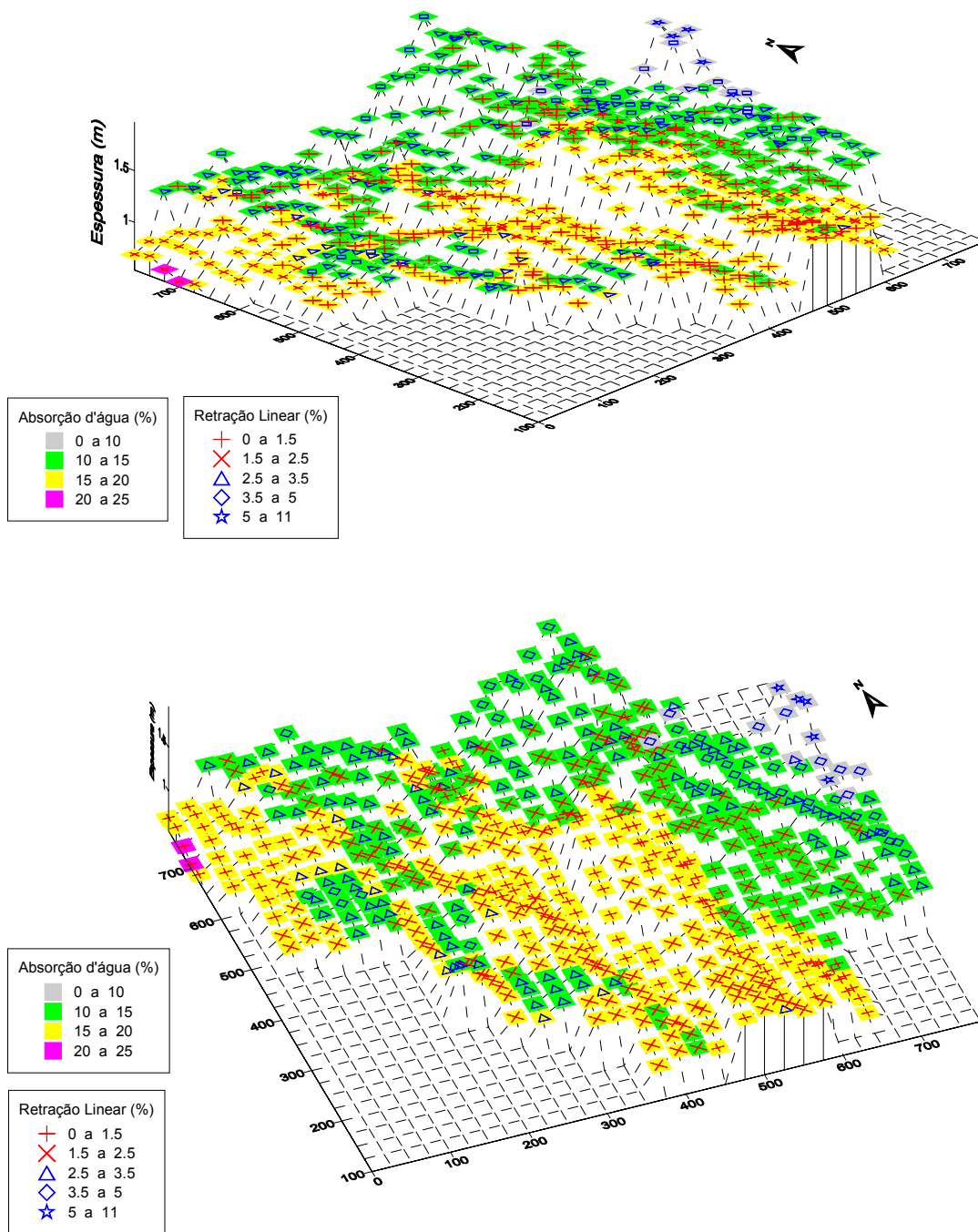


**Figura D.5 - Distribuição espacial de blocos estéreos e de minérios.**



**Figura D.6 - Combinação da espessura estimada da camada de argila, em relevo, com os blocos classificados como "estéril", "argila biqueima" e "argila monoporosa", em diferentes visadas.**





**Figura D.7 - Combinação em diferentes visadas da espessura estimada da camada de argila, em relevo, com os atributos de qualidade (parâmetros industriais) estimados em blocos.**

## Quadro de Recursos Geológicos

A Tabela D.1 apresenta um quadro-resumo dos recursos geológicos globais, estimados e classificados nos diferentes tipos cerâmicos, para cada subdomínio. Em função do critério adotado de restringir ao máximo as extrapolações, todos os recursos serão considerados medidos.

Tabela D.1 - Quadro-resumo de recursos geológicos de argila medidos (t).

Subdomínio	Totais	Tipo Monoporosa	Tipo Biqueima	Argila Cerâmica Total	Fora dos Padrões
Planície	299.743	16.133	242.000	258.133	41.607
Transição	179.975	14.140	126.239	140.379	39.596
Tálus	314.614	10.556	114.409	124.965	189.649
<b>Depósito Total</b>	<b>794.331</b>	<b>40.829</b>	<b>482.648</b>	<b>523.476</b>	<b>270.855</b>

A Figura D.8 apresenta o percentual de toneladas classificado para cada tipo cerâmico, mostrando que a maior parte é enquadrável como “minério”. É possível observar também a pouca representatividade de blocos de argila mais nobre tipo monoporosa.

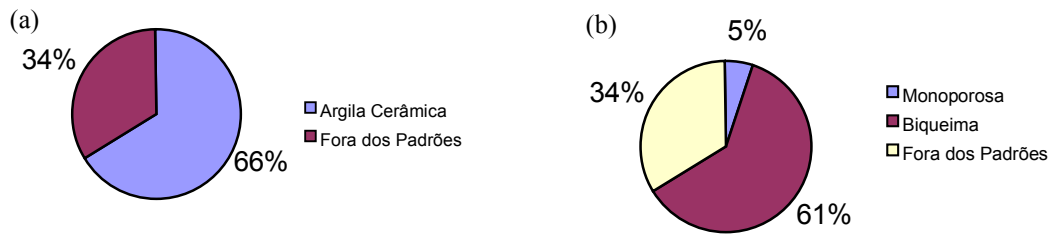
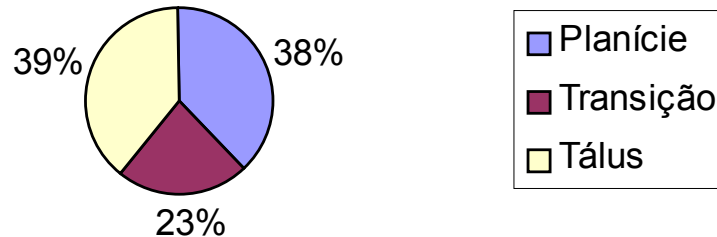


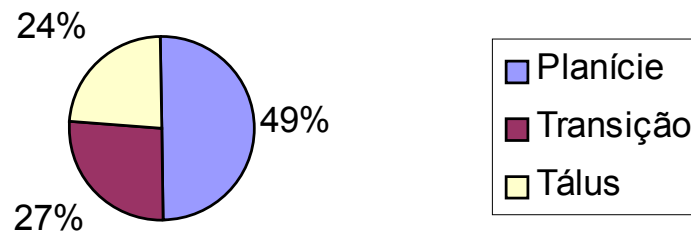
Figura D.8 - Percentuais estimados de toneladas de argila classificada como cerâmica e fora dos padrões (a), com discriminação dos tipos cerâmicos em (b), depósito total.

A Figura D.9 mostra os totais de argila estimada, independente de classificação cerâmica, indicando uma equivalência entre toneladas estimadas para planície e para tálus.

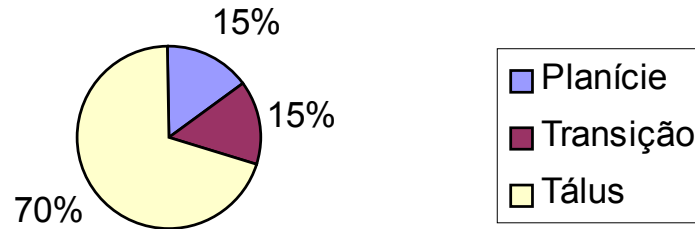


**Figura D.9 - Distribuição de percentuais dos recursos geológicos totais (independente de classificação) por subdomínio.**

A maior favorabilidade do subdomínio planície, largamente comentada nos itens anteriores, fica evidente na Figura D.10. Grosso modo metade da argila cerâmica classificada encontra-se na planície. A transição, mesmo ocupando uma área bem menor, apresenta uma tonelagem maior de argila cerâmica estimada do que no tálus, indubitavelmente o pior domínio do ponto de vista de qualidade cerâmica do material ocorrente. A situação se inverte para os totais da argila fora dos padrões (Figura D.11), corroborando a observação acima.

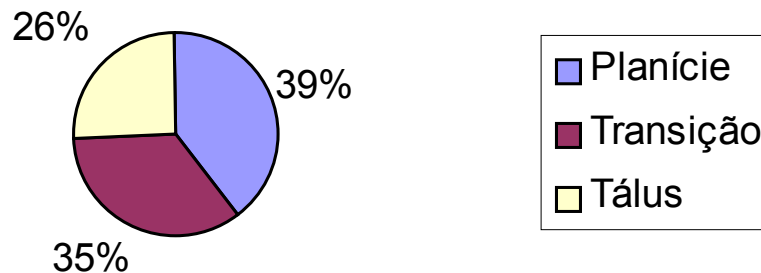


**Figura D.10 - Distribuição de percentuais da argila classificada como cerâmica (total dos dois tipos) por subdomínio.**

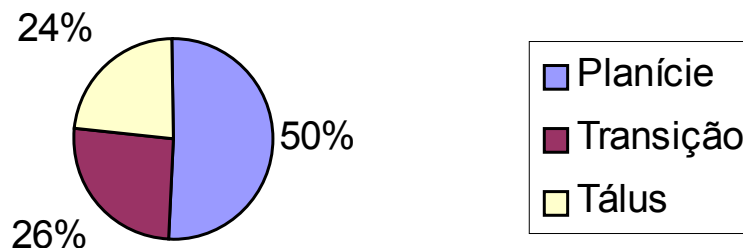


**Figura D.11 - Distribuição de percentuais da argila classificada como fora dos padrões, por subdomínio.**

Quando considera-se individualmente os blocos classificados nos dois tipos cerâmicos diferentes situações são observadas. A argila tipo Monoporosa, talvez por sua baixa incidência de ocorrência, distribui-se quase que regularmente nos três subdomínios, com uma leve predominância na planície (Figura D.12). Enquanto isso, a argila Biqueima (Figura D.13) praticamente repete o quadro da Figura D.10, uma vez que praticamente toda argila classificada como cerâmica é do tipo Biqueima.



**Figura D.12 - Distribuição de percentuais da argila classificada como Monoporosa, por subdomínio.**



**Figura D.13 - Distribuição de percentuais da argila classificada como Biqueima, por subdomínio.**

## Apêndice E – Considerações sobre o Método de ssG

Nos parágrafos a seguir será sumarizada a detalhada explanação de Goovaerts (1997), onde através de avaliações de incertezas locais com a obtenção de distribuições condicionais locais de probabilidade cumulativa (Cap.7), se constrói a base da análise das incertezas globais (Cap.8). Será focado o algoritmo da simulação seqüencial Gaussiana (ssG), aplicado no presente estudo de caso.

Duas possíveis alternativas de modelamento de incerteza local sobre um atributo em um local não amostrado são apresentadas abaixo, considerando diferentes valores como realizações de variáveis aleatórias espacialmente dependentes em um modelo de função aleatória:

- (i) tomar a variância de estimativa como assumidamente Gaussiana e atribuí-la a intervalos de confiança (95%) acima e abaixo do valor krigado (centrado neste);
- (ii) modelar a distribuição de probabilidade local.

Algumas restrições são evidentes para a primeira hipótese: (i.1) valores gerados em intervalos de confiança podem ser negativos e/ou espúrios fisicamente; (i.2) há a necessidade de se assumir um modelo de variável aleatória Gaussiana para o erro, cuja simetria do histograma gerado na maior parte dos casos não é realística, especialmente para os casos onde há super ou subestimativa; (i.3) a variância do erro é independente dos valores amostrais.

Para a segunda hipótese, os intervalos de dispersão de possíveis valores dependem diretamente da informação disponível ( $n$ ). Cada função de distribuição de probabilidade condicional  $F[u; z|(n)]$  provê uma medida de incerteza local que é relacionada a uma locação específica  $u$ .

Funções de distribuições cumulativas condicionais são obtidas mais facilmente assumindo um modelo para toda a lei espacial (distribuição multivariada) da função aleatória  $Z(u)$ . Esta lei precisa ser ampla o suficiente

para que todas as funções de distribuições cumulativas condicionais locais tenham a mesma expressão analítica e sejam completamente especificadas através de poucos parâmetros: a média e a variância (abordagem « paramétrica »). O modelo de função aleatória Gaussiana multivariada, ou multiGaussiana, tem sido o mais largamente utilizado em função de suas propriedades extremamente convenientes (simplicidade analítica, conforme Deutsch & Journel, 1998 p.139), o que torna a inferência dos parâmetros dessas distribuições de probabilidade local bastante acessível.

Outra maneira de se obter essas distribuições de probabilidades cumulativas locais é através da abordagem por indicadores. Tal tipo de metodologia, entretanto, não é aplicada nessa dissertação.

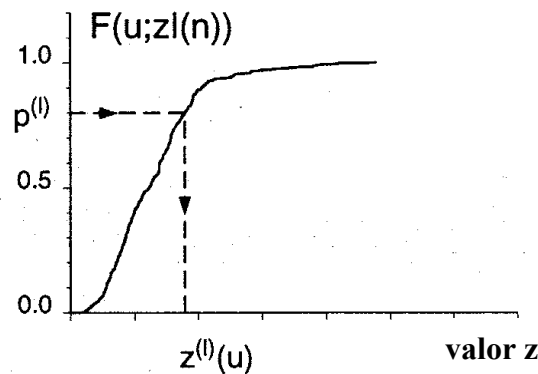
Sob o modelo multiGaussiano, a média e a variância da função de distribuição de probabilidade cumulativa condicional na locação  $u$  correspondem respectivamente à estimativa da krigagem simples e à variância de krigagem simples obtida dos  $n(u)$  dados  $y(u_\alpha)$ . Portanto, a inferência dessa distribuição de probabilidade local se reduz a resolver um sistema de krigagem simples na locação  $u$ , o que torna extremamente atraente a abordagem multiGaussiana. O ônus é ter que assumir que os dados seguem uma distribuição multiGaussiana, uma hipótese rigorosa e difícil de ser verificada na íntegra, apenas aproximada. Para tal, em primeiro lugar a distribuição univariada dos dados (histograma amostral) deve ser normal. Por isso, nos casos onde essa distribuição original não é Gaussiana, como é comum em geociências, deve-se transformar os dados de acordo, i.e., proceder à normalização dos dados. As etapas necessárias para este processo são explanadas em Goovaerts (1997, p.267-271), Deutsch & Journel (1998, p.141), e Olea (1999, Cap.3).

Uma vez adotado o modelo multiGaussiano, a inferência na função de probabilidade cumulativa condicional local normal se reduz a estimar seus dois parâmetros (média e variância) a cada locação não amostrada  $u$ . O formalismo multiGaussiano é rígido na exigência da estacionaridade de 2ª ordem.

Seja  $F[u; z | n]$  a função de probabilidade cumulativa local modelando a incerteza sobre o valor desconhecido  $z(u)$ . Ao invés de derivar um simples valor

estimado  $z(u)$  desta função local, pode-se construir a partir dela uma série de  $L$  valores simulados  $z^{(l)}(u)$ ,  $l = 1, \dots, L$ . Cada valor  $z^{(l)}(u)$  representa um possível resultado ou realização da função aleatória  $Z(u)$ , modelando a incerteza na locação  $u$ . Simulações do tipo Monte-Carlo, entre as quais se inclui o método aqui adotado (simulação seqüencial Gaussiana), são estruturadas em duas etapas:

- (i) geração de uma série de  $L$  números aleatórios independentes  $p^{(l)}$ ,  $l = 1, \dots, L$ , uniformemente distribuídos em  $[0, 1]$ ;
- (ii) o « elésimo » valor simulado  $z^{(l)}(u)$  é identificado com o quantil  $p^{(l)}$  da função de distribuição de freqüência cumulativa condicional local, de maneira que  $z^{(l)}(u) = F^{-1}[u; p^{(l)} | (n)]$ ,  $l = 1, \dots, L$ . A Figura E.1 ilustra essa associação, base dos algoritmos de simulação seqüencial.



**Figura E.1 - Simulação de Monte-Carlo gerada a partir de uma função de distribuição cumulativa  $F[u; z | (n)]$ . O "elésimo" valor simulado  $z^{(l)}(u)$  é obtido como o quantil  $p^{(l)}$  dessa distribuição condicional, onde  $p^{(l)}$  é um número aleatório uniformemente distribuído em  $[0, 1]$ . Extraído de Goovaerts (1997, p.352).**

Até aqui foi demonstrado o algoritmo de quantis para gerar uma série de  $L$  realizações  $z^{(l)}(u)$ ,  $l = 1, \dots, L$  a qualquer locação específica  $u$ . Isso foi feito amostrando a função de distribuição de freqüência cumulativa univariada naquela locação. O modelo de função aleatória multiGaussiana tem sua lei espacial totalmente determinada pela função covariância no ponto  $z$ . Esta é a

base de vários algoritmos de simulação, entre os quais a extensa classe de simulações sequenciais: ao invés de modelar diretamente uma função de distribuição de frequência cumulativa multivariada, uma função de distribuição de frequência cumulativa univariada é modelada e amostrada a cada um dos  $N$  nós visitados numa seqüência aleatória. Para assegurar a reprodução do modelo de covariância dos pontos, cada função de distribuição de frequência cumulativa univariada é feita condicional não apenas aos dados originais  $n$ , mas também a todos os valores previamente simulados.

Os métodos de simulação seqüencial compartilham basicamente as seguintes etapas (Dimitrakopoulos, 1998, em Pilger, 2000 p.36):

- seleção aleatória de um ponto/bloco a ser simulado (uma vez a cada realização);
- estimativa da distribuição local de probabilidade do ponto/bloco selecionado, e seleção aleatória de um valor desta distribuição, fornecendo o valor simulado pelo método de Monte-Carlo mencionado anteriormente;
- adição do valor simulado no banco de dados original;
- repetição das etapas anteriores até que todos os pontos/blocos tenham um valor;
- repetição do processo como um todo  $L$  vezes, gerando  $L$  modelos equiprováveis do depósito.

Duas classes maiores de algoritmos de simulação seqüencial podem ser distingüidos, dependendo se a série de distribuições locais de probabilidade condicionais é determinada usando os formalismos multiGaussianos ou de indicadores.

O algoritmo aplicado nas simulações no presente estudo de caso, a simulação seqüencial Gaussiana (ssG), está baseado no primeiro tipo de formalismo. Assim, a ssG compreende um método de geração de realizações parciais usando funções aleatórias normais multiGaussianas. A essência do método é a equivalência entre a construção de uma distribuição multivariada e a



construção de uma seqüência de distribuições univariadas condicionais a realizações univariadas (Johnson, 1987; Isaaks, 1990; Olea, 1999 p.143). Tal equivalência se embasa na quebra da função de distribuição bivariada de freqüência cumulativa no produto de duas funções de distribuição univariada de freqüência cumulativa, aplicando os princípios do teorema de Bayes. A implementação dessa idéia usando krigagem simples requer que seja assumida a multinormalidade da variável. Além disso, se na locação  $x_0$  o erro de krigagem para a estimativa de  $Z(x_0)$  segue uma distribuição Gaussiana em  $N[0, \sigma^2(x_0)]$ , então a distribuição de probabilidade para os verdadeiros valores é  $N[z^*(x_0), \sigma^2(x_0)]$ .

Na ssG, a hipótese de trabalho é que cada superfície simulada é uma realização de um processo multivariado normal. O número de diferentes realizações é infinito, uma vez que cada função de distribuição de freqüência é capaz de gerar um número infinito de diferentes valores, independente do seqüenciamento da visita aos nós a serem simulados. O condicionamento aos dados é automático, pois a variância de krigagem numa locação amostral é 0, assegurando que o único possível valor simulado coincida com o valor observado.

## Apêndice F – Normalização

Esp. = Espessura de Argila

A.A.A. = Acumulação de Absorção d'água

A.R.L. = Acumulação de Retração Linear

Orig. = Variável no espaço original

Gauss. = Variável no espaço normal (Gaussiano)

### Transformação dos Dados

Esp. Orig. (m)	Esp. Gauss. (m)	A.A.A. Orig. (%.m)	A.A.A. Gauss. (%.m)	A.A.A. Orig. (%.m)	A.R.L. Gauss (%.m)
0,40	-2,95115	3,84	-2,95395	0,01	-3,09372
0,40	-2,55138	4,93	-2,54017	0,02	-2,73104
0,40	-2,36467	5,68	-2,34821	0,03	-2,49743
0,40	-2,27952	5,79	-2,19691	0,07	-2,22883
0,40	-2,16567	6,04	-2,07904	0,07	-2,08725
0,40	-1,94388	6,09	-1,83722	0,12	-2,05334
0,40	-1,80905	6,14	-1,67210	0,16	-1,90179
0,40	-1,65172	6,32	-1,64201	0,16	-1,77944
0,40	-1,52716	6,33	-1,60763	0,16	-1,63165
0,40	-1,49718	6,56	-1,58043	0,17	-1,50501
0,40	-1,46690	6,75	-1,56083	0,19	-1,47852
0,40	-1,44349	7,09	-1,52967	0,25	-1,40879
0,50	-1,42384	7,12	-1,49947	0,27	-1,34544
0,50	-1,40341	7,14	-1,47847	0,27	-1,28353
0,50	-1,37961	7,17	-1,46142	0,30	-1,22751
0,50	-1,33590	7,31	-1,43087	0,30	-1,21174
0,50	-1,29863	7,46	-1,39729	0,32	-1,19244
0,50	-1,28710	7,50	-1,38081	0,32	-1,17188
0,50	-1,26415	7,64	-1,36303	0,32	-1,15331
0,50	-1,23382	7,73	-1,34105	0,34	-1,13920
0,50	-1,20933	7,80	-1,31756	0,35	-1,12296
0,50	-1,18869	7,89	-1,29669	0,35	-1,08390
0,50	-1,16737	8,08	-1,27514	0,36	-1,05117
0,50	-1,14726	8,08	-1,24689	0,37	-1,03943
0,50	-1,13390	8,11	-1,22055	0,38	-1,02521
0,50	-1,12131	8,21	-1,18625	0,38	-1,01485
0,60	-1,10381	8,29	-1,15586	0,39	-1,00420
0,60	-1,08254	8,30	-1,14136	0,40	-0,98447
0,60	-1,06741	8,44	-1,11183	0,41	-0,94855
0,60	-1,05338	8,60	-1,05400	0,42	-0,91049
0,60	-1,00785	8,80	-1,01430	0,42	-0,89033
0,60	-0,96536	8,88	-0,99834	0,43	-0,88258
0,60	-0,90001	9,15	-0,97821	0,44	-0,87556
0,60	-0,84144	9,24	-0,96215	0,45	-0,81797

<b>Esp. Orig. (m)</b>	<b>Esp. Gauss. (m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Gauss. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.R.L. Gauss (%.m)</b>
0,60	-0,83294	9,35	-0,94814	0,45	-0,76149
0,60	-0,82392	9,38	-0,93522	0,45	-0,75111
0,60	-0,80566	9,43	-0,92686	0,47	-0,74255
0,60	-0,78803	9,52	-0,91583	0,49	-0,70731
0,60	-0,78092	9,53	-0,90353	0,50	-0,67351
0,60	-0,77303	9,56	-0,89447	0,50	-0,66824
0,60	-0,76361	9,57	-0,87546	0,50	-0,65545
0,60	-0,74995	9,58	-0,85498	0,53	-0,63810
0,60	-0,73631	9,58	-0,84387	0,54	-0,62358
0,60	-0,72683	9,71	-0,83181	0,55	-0,61329
0,60	-0,71612	9,75	-0,82052	0,57	-0,60538
0,70	-0,70626	10,02	-0,81184	0,58	-0,59792
0,70	-0,69917	10,05	-0,80271	0,58	-0,59261
0,70	-0,69074	10,07	-0,79085	0,58	-0,58675
0,70	-0,68251	10,07	-0,78070	0,60	-0,57875
0,70	-0,67449	10,10	-0,72728	0,61	-0,56872
0,70	-0,66673	10,20	-0,67502	0,62	-0,55787
0,70	-0,65754	10,23	-0,66752	0,63	-0,54878
0,70	-0,61751	10,27	-0,66081	0,66	-0,53054
0,70	-0,55123	10,31	-0,65026	0,69	-0,48408
0,70	-0,51429	10,34	-0,63243	0,69	-0,44796
0,70	-0,50187	10,49	-0,61717	0,71	-0,44034
0,70	-0,48914	10,61	-0,60649	0,71	-0,43318
0,70	-0,46566	10,65	-0,58064	0,72	-0,42528
0,70	-0,44478	10,80	-0,55256	0,75	-0,41698
0,70	-0,43362	11,01	-0,54118	0,76	-0,39843
0,70	-0,41085	11,08	-0,52892	0,77	-0,37760
0,70	-0,39327	11,21	-0,51693	0,77	-0,36709
0,80	-0,38609	11,21	-0,50906	0,77	-0,35978
0,80	-0,37506	11,24	-0,49879	0,79	-0,34813
0,80	-0,36324	11,26	-0,46253	0,80	-0,33684
0,80	-0,34794	11,56	-0,42722	0,81	-0,32876
0,80	-0,32562	11,66	-0,41908	0,83	-0,32207
0,80	-0,31021	11,91	-0,41329	0,83	-0,31658
0,80	-0,29954	11,96	-0,40673	0,85	-0,30959
0,80	-0,28683	12,07	-0,39899	0,86	-0,30247
0,80	-0,26580	12,15	-0,38929	0,89	-0,29586
0,80	-0,24651	12,19	-0,37770	0,93	-0,28878
0,80	-0,22691	12,20	-0,36636	0,94	-0,28101
0,80	-0,20861	12,24	-0,35086	0,95	-0,27289
0,80	-0,20054	12,29	-0,32780	0,97	-0,26036
0,80	-0,19329	12,38	-0,31095	0,98	-0,24506
0,80	-0,17887	12,40	-0,30414	1,01	-0,23219
0,80	-0,16119	12,48	-0,29716	1,03	-0,22298
0,80	-0,14682	12,52	-0,28611	1,04	-0,21211
0,80	-0,13305	12,58	-0,27541	1,05	-0,19886
0,80	-0,12481	12,63	-0,25006	1,05	-0,18641
0,80	-0,11798	12,65	-0,21718	1,05	-0,17638
0,80	-0,11118	12,70	-0,19425	1,09	-0,17023
0,80	-0,10475	12,78	-0,17980	1,10	-0,16161

<b>Esp. Orig. (m)</b>	<b>Esp. Gauss. (m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Gauss. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.R.L. Gauss (%.m)</b>
0,80	-0,09891	13,06	-0,14893	1,10	-0,15066
0,80	-0,09350	13,19	-0,11566	1,13	-0,14006
0,80	-0,08611	13,30	-0,10547	1,13	-0,12251
0,80	-0,07253	13,30	-0,09734	1,13	-0,09568
0,90	-0,06026	13,34	-0,09122	1,15	-0,07709
0,90	-0,05377	13,35	-0,08159	1,17	-0,07051
0,90	-0,04271	13,43	-0,06776	1,18	-0,06339
0,90	-0,03174	13,55	-0,05693	1,18	-0,05561
0,90	-0,02544	13,66	-0,04957	1,18	-0,04981
0,90	-0,01866	13,80	-0,04227	1,18	-0,04477
0,90	-0,01167	13,81	-0,01773	1,19	-0,03811
0,90	0,01639	14,10	0,00667	1,20	-0,03214
0,90	0,04329	14,13	0,01302	1,21	-0,02682
0,90	0,05081	14,24	0,02213	1,22	-0,01992
0,90	0,06241	14,31	0,03117	1,27	-0,01348
0,90	0,07135	14,46	0,04469	1,29	-0,00821
0,90	0,07957	14,49	0,05863	1,30	-0,00234
0,90	0,08839	14,49	0,06449	1,31	0,01131
0,90	0,11471	14,70	0,06938	1,33	0,02475
0,90	0,14203	14,74	0,07522	1,35	0,03385
0,90	0,14955	14,74	0,08125	1,38	0,04186
0,90	0,15722	14,75	0,08663	1,38	0,04990
0,90	0,17359	14,81	0,09280	1,38	0,05799
0,90	0,19037	14,84	0,10705	1,39	0,06301
1,00	0,20216	14,87	0,12274	1,40	0,06961
1,00	0,21288	14,89	0,13140	1,41	0,09016
1,00	0,22389	14,90	0,13935	1,42	0,10959
1,00	0,23468	15,05	0,14786	1,45	0,11484
1,00	0,24672	15,09	0,15493	1,46	0,12618
1,00	0,25778	15,16	0,16035	1,47	0,13801
1,00	0,26342	15,21	0,17087	1,48	0,14895
1,00	0,27182	15,30	0,18250	1,51	0,15908
1,00	0,28202	15,31	0,18853	1,51	0,16382
1,00	0,29807	15,41	0,19458	1,51	0,16855
1,00	0,31274	15,48	0,20341	1,51	0,17676
1,00	0,31886	15,62	0,21339	1,53	0,19183
1,00	0,32361	15,66	0,22176	1,54	0,20390
1,00	0,33054	15,68	0,23398	1,54	0,20901
1,00	0,33730	15,80	0,24634	1,55	0,21320
1,00	0,34309	15,86	0,26492	1,55	0,21994
1,00	0,35044	15,86	0,28342	1,56	0,23086
1,00	0,35759	15,88	0,30243	1,58	0,23963
1,00	0,36735	15,98	0,32526	1,58	0,24648
1,00	0,39655	16,21	0,34264	1,58	0,25479
1,00	0,42483	16,21	0,35624	1,60	0,26455
1,00	0,43337	16,26	0,36469	1,61	0,27775
1,00	0,44344	16,28	0,37244	1,61	0,28887
1,00	0,45289	16,29	0,37941	1,62	0,29494
1,00	0,45953	16,34	0,39640	1,66	0,30250
1,00	0,46658	16,76	0,41236	1,67	0,31128

<b>Esp. Orig. (m)</b>	<b>Esp. Gauss. (m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Gauss. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.R.L. Gauss (%.m)</b>
1,10	0,47815	16,77	0,42127	1,69	0,33741
1,10	0,48912	16,91	0,43192	1,69	0,36380
1,10	0,49556	16,91	0,43921	1,69	0,36976
1,10	0,50355	16,98	0,44549	1,70	0,37772
1,10	0,51207	17,02	0,45299	1,71	0,38803
1,10	0,51977	17,03	0,46167	1,73	0,40155
1,10	0,52625	17,10	0,47783	1,73	0,41467
1,10	0,54046	17,11	0,49230	1,74	0,42459
1,10	0,55408	17,12	0,49997	1,75	0,43400
1,10	0,56004	17,30	0,50921	1,76	0,44069
1,10	0,57026	17,46	0,54041	1,76	0,45307
1,10	0,58233	17,60	0,57088	1,80	0,46642
1,10	0,59064	17,70	0,58085	1,81	0,47415
1,10	0,60644	17,83	0,59415	1,83	0,48145
1,10	0,62505	18,10	0,60798	1,83	0,48890
1,10	0,63606	18,16	0,61858	1,85	0,49553
1,10	0,64432	18,23	0,62497	1,86	0,50128
1,10	0,65182	18,29	0,63181	1,88	0,53601
1,20	0,66197	18,42	0,64299	1,88	0,57206
1,20	0,67163	18,42	0,65426	1,89	0,57916
1,20	0,68816	18,43	0,66138	1,90	0,58757
1,20	0,70406	18,43	0,66952	1,94	0,59652
1,20	0,71788	18,44	0,68418	1,98	0,60399
1,20	0,73554	18,48	0,69635	2,02	0,61522
1,20	0,74540	18,49	0,70690	2,03	0,62874
1,20	0,75135	18,63	0,71783	2,03	0,63842
1,20	0,75699	18,77	0,75335	2,05	0,64665
1,20	0,76715	18,88	0,78919	2,06	0,65654
1,20	0,78054	19,12	0,79632	2,06	0,66533
1,20	0,79100	19,16	0,80570	2,10	0,67109
1,30	0,79961	19,36	0,81383	2,11	0,67622
1,30	0,80771	19,45	0,81979	2,12	0,68527
1,30	0,81892	19,46	0,83420	2,15	0,69898
1,30	0,83053	19,84	0,85323	2,16	0,71118
1,30	0,84292	19,85	0,87512	2,20	0,72979
1,30	0,85875	19,86	0,89419	2,22	0,74855
1,30	0,88137	19,92	0,91260	2,24	0,75642
1,30	0,90445	20,07	0,93542	2,26	0,76539
1,30	0,91861	20,10	0,95199	2,29	0,77625
1,30	0,92992	20,11	0,97200	2,30	0,78833
1,30	0,94419	20,12	0,99108	2,35	0,80593
1,30	0,95784	20,14	1,00305	2,35	0,82516
1,30	0,97116	20,35	1,01726	2,36	0,83771
1,30	0,98701	20,41	1,02990	2,39	0,84949
1,40	1,02159	20,61	1,04159	2,41	0,86692
1,40	1,05422	20,70	1,05530	2,41	0,88691
1,40	1,06634	20,73	1,06492	2,42	0,90260
1,40	1,07826	20,78	1,07779	2,42	0,91439
1,40	1,08615	20,90	1,09148	2,42	0,93053
1,40	1,09323	21,11	1,10265	2,45	0,94481

<b>Esp. Orig. (m)</b>	<b>Esp. Gauss. (m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Gauss. (%.m)</b>	<b>A.A.A. Orig. (%.m)</b>	<b>A.R.L. Gauss (%.m)</b>
1,40	1,10968	21,26	1,11237	2,47	0,95476
1,40	1,13106	21,36	1,11968	2,50	0,97580
1,40	1,14581	21,80	1,12810	2,52	0,99850
1,40	1,15654	21,83	1,14335	2,58	1,01029
1,40	1,16632	21,90	1,15786	2,62	1,02165
1,40	1,18054	22,11	1,17419	2,68	1,03637
1,50	1,19637	22,25	1,19583	2,76	1,05157
1,50	1,20755	22,53	1,20954	2,77	1,06199
1,50	1,21675	23,22	1,22697	2,78	1,07402
1,50	1,22611	23,28	1,24567	2,79	1,08692
1,50	1,23450	23,31	1,25679	2,85	1,09679
1,50	1,25177	23,34	1,26981	2,85	1,11956
1,50	1,27104	23,34	1,28240	2,93	1,14572
1,50	1,28264	23,35	1,30397	2,94	1,16483
1,50	1,29284	23,39	1,32739	2,94	1,18586
1,50	1,30351	23,50	1,34285	3,04	1,20008
1,60	1,31475	24,30	1,35971	3,06	1,20914
1,60	1,32450	24,45	1,37741	3,08	1,21839
1,60	1,33438	24,75	1,39259	3,15	1,22873
1,60	1,34482	24,86	1,40350	3,22	1,24052
1,60	1,35976	25,14	1,42118	3,33	1,25037
1,60	1,38212	25,22	1,43880	3,34	1,27862
1,60	1,40310	25,30	1,46020	3,45	1,31643
1,60	1,42144	25,33	1,48280	3,52	1,33489
1,60	1,45474	25,35	1,50893	3,55	1,35580
1,60	1,49775	25,67	1,53863	3,60	1,37760
1,60	1,53373	25,82	1,55698	3,62	1,39626
1,60	1,58239	26,03	1,57489	3,65	1,41651
1,70	1,62990	26,18	1,59284	3,68	1,44159
1,70	1,65810	26,33	1,60989	3,76	1,46937
1,70	1,68309	26,35	1,64977	3,85	1,48766
1,70	1,70332	26,47	1,75506	3,87	1,52773
1,70	1,74129	27,11	1,85274	3,90	1,57387
1,70	1,78508	27,18	1,88270	3,93	1,59641
1,70	1,82787	27,40	1,91938	3,94	1,64051
1,70	1,87178	27,61	1,95548	3,98	1,68553
1,80	1,90285	28,73	1,98295	4,08	1,71329
1,80	1,93262	28,75	2,02570	4,18	1,78332
1,80	1,99759	30,00	2,08743	4,20	1,84884
1,90	2,07838	30,08	2,14740	4,51	1,89118
1,90	2,12055	30,88	2,19789	4,55	1,96144
1,90	2,16162	31,18	2,24701	4,59	2,06779
2,00	2,22663	32,05	2,36704	4,84	2,18150
2,00	2,30447	32,62	2,54137	5,06	2,32074
2,10	2,44930	33,70	2,66821	5,53	2,53581
2,20	2,73544	35,93	2,96735	5,95	2,87325
2,40	3,15292				

## Testes de Gaussianidade

A figura F.1 mostra as três variáveis regionalizadas no espaço Gaussiano, plotadas em gráficos de probabilidade normal. Nesse tipo de gráfico, a frequência cumulativa é apresentada em escala disposta de tal forma que uma distribuição normal aparece como uma linha reta (conforme Goovaerts, 1997 p.269-270). Portanto, é possível verificar que as variáveis transformadas efetivamente seguem uma distribuição Gaussiana. Pequenos desvios no caso da espessura são atribuíveis à repetição de vários valores amostrais, em especial o valor extremo mínimo 0,40 m.

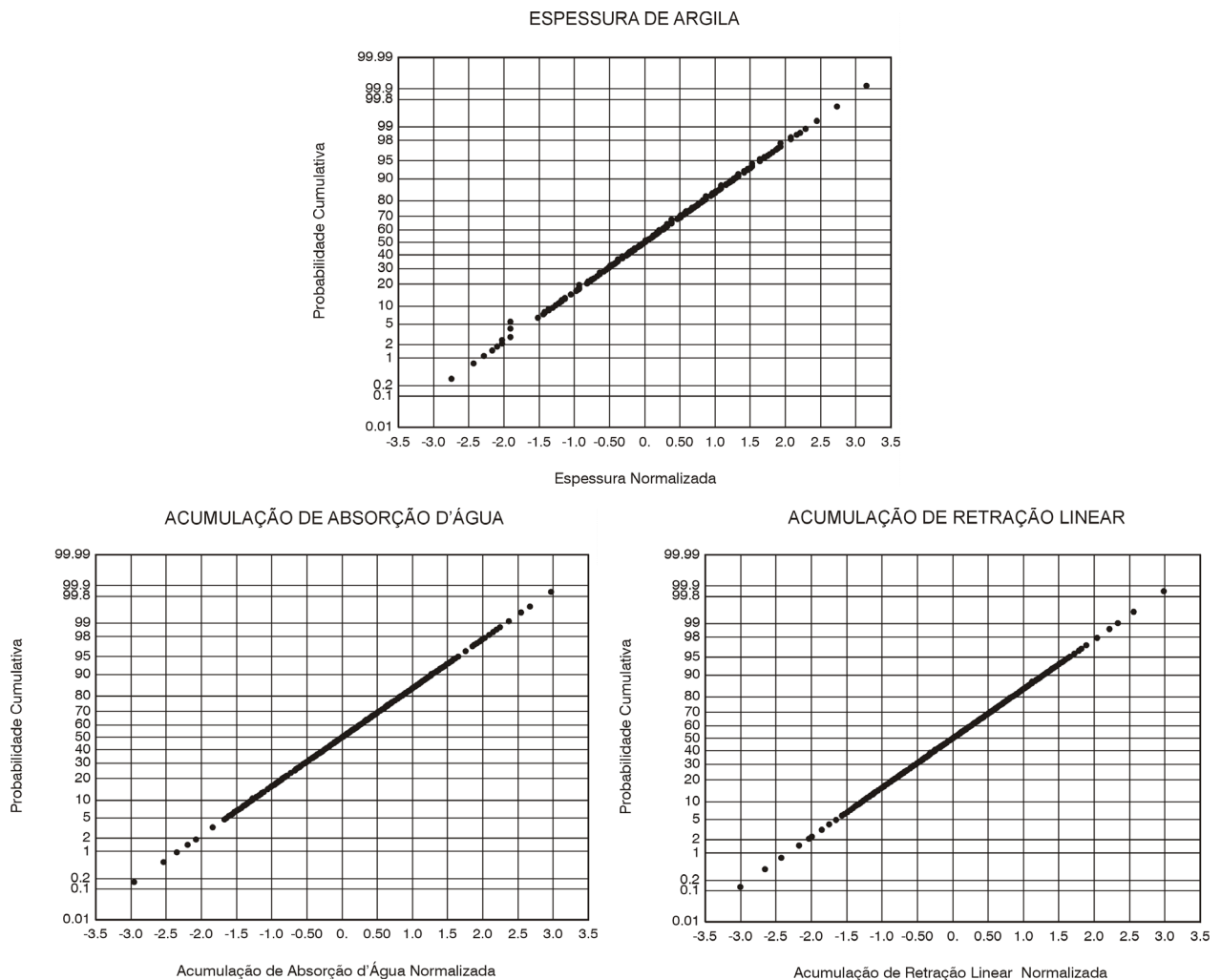


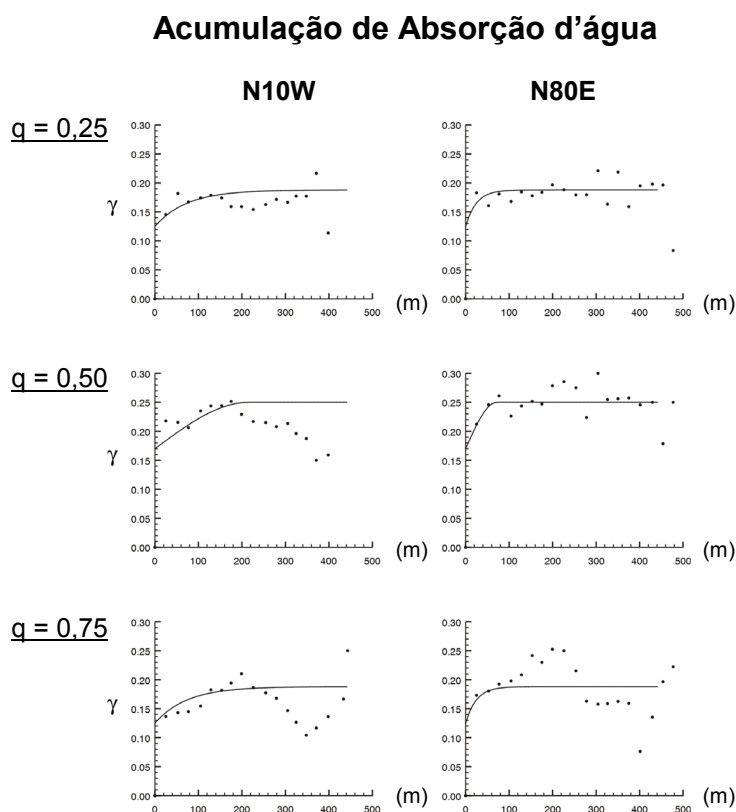
Figura F.1 – Testes de Gaussianidade para as três variáveis de trabalho no subdomínio planície.

## Apêndice G – Testes de BiGaussianidade

A utilização do método de simulação seqüencial Gaussiana (ssG), empregado nessa dissertação na análise de reservas recuperáveis de argila (Capítulo 4), exige que os dados normalizados sigam uma distribuição multiGaussiana. Para tal, testes de biGaussianidade são necessários, conforme explanado no item 4.2.2.

Entre os diversos métodos existentes para tal verificação, adotou-se a comparação entre variogramas da indicatriz experimentais, calculados para quartis inferior (0,25), mediano (0,50) e superior (0,75), e modelos variográficos teóricos obtidos para os mesmos quartis. Aspectos teóricos e computacionais desse teste são apresentados em Deutsch & Journel (1998, p.140-142 e p.227-228).

As Figuras G.1, G.2 e G.3 demonstram uma boa justaposição entre os variogramas experimentais (pontos) e os modelos contínuos (linhas contínuas), para as três variáveis regionalizadas em estudo. Isso permitiu a aceitabilidade da bigaussianidade das distribuições das três variáveis normalizadas, e por conseguinte a aplicação do método de simulação utilizado.



**Figura G.1 – Testes de biGaussianidade para absorção d'água normalizada.  
Explicações no texto.**



## Acumulação de Retração Linear

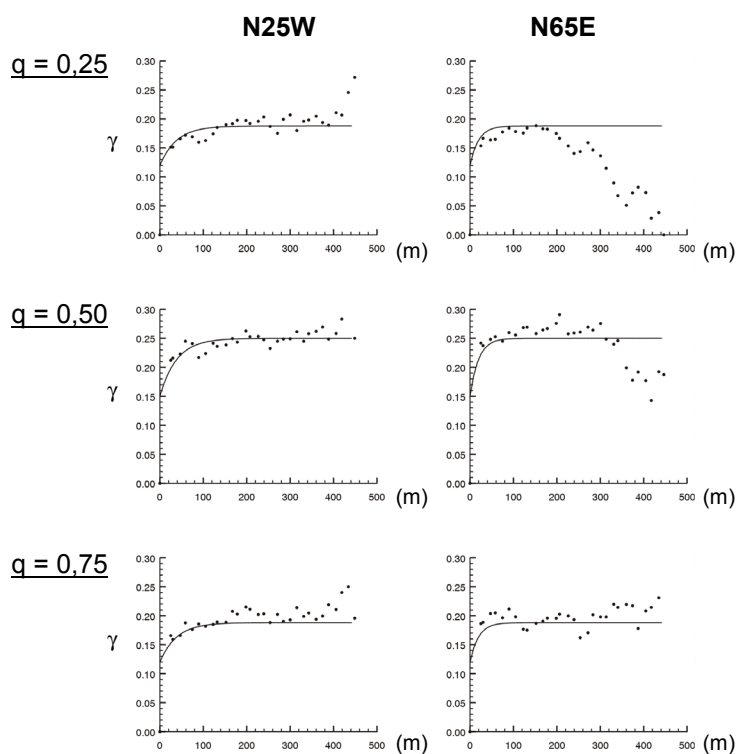


Figura G.2 – Testes de biGaussianidade para retração linear normalizada.  
Explicações no texto.

## Espessura de Argila

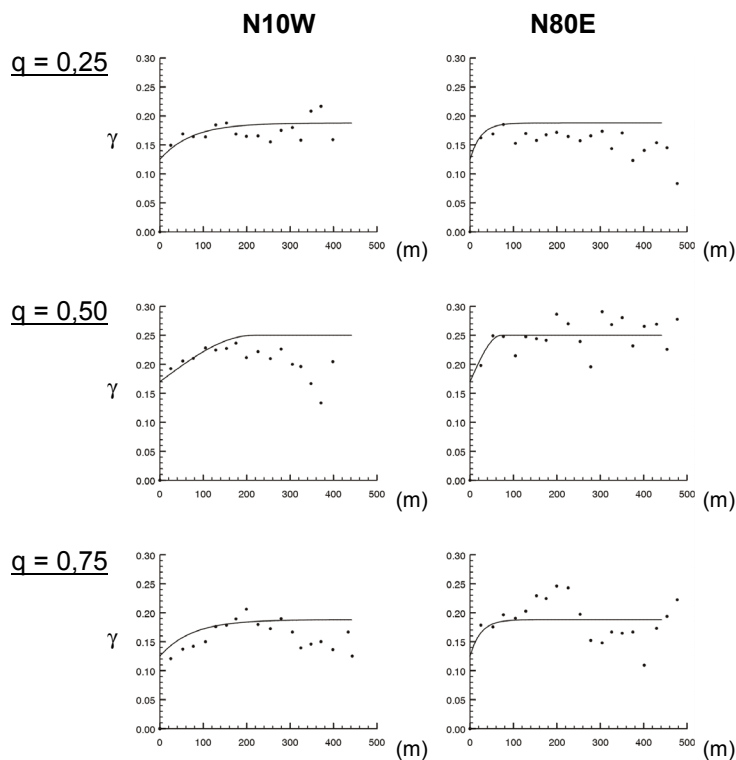


Figura G.3 – Testes de biGaussianidade para espessura de argila normalizada.  
Explicações no texto.

## Apêndice H – Número de Realizações

Os diagramas de correlação e mapas apresentados a seguir fundamentam a opção de limitar em cinquenta o número de realizações (ou de combinação de realizações, no caso das variáveis de qualidade), nas análises advindas das simulações realizadas, conforme discutido no item 4.2.3.2.

Os resultados são apresentadas para as três variáveis finais de interesse, mostrando a grande convergência global que existe entre resultados oriundos de vinte e de cinquenta realizações, justificando esse último número empregado.

Os valores médios simulados indicados nas figuras abaixo correspondem às médias aritméticas (*E-type*) de dez, vinte ou cinquenta valores simulados para um mesmo bloco. A variância condicional compreende à variância calculada para as séries de valores em cada bloco.

A.A. = Absorção d'água (%)

R.L. = Retração Linear (%)

Esp. = Espessura de Argila (m)

# Absorção d'Água

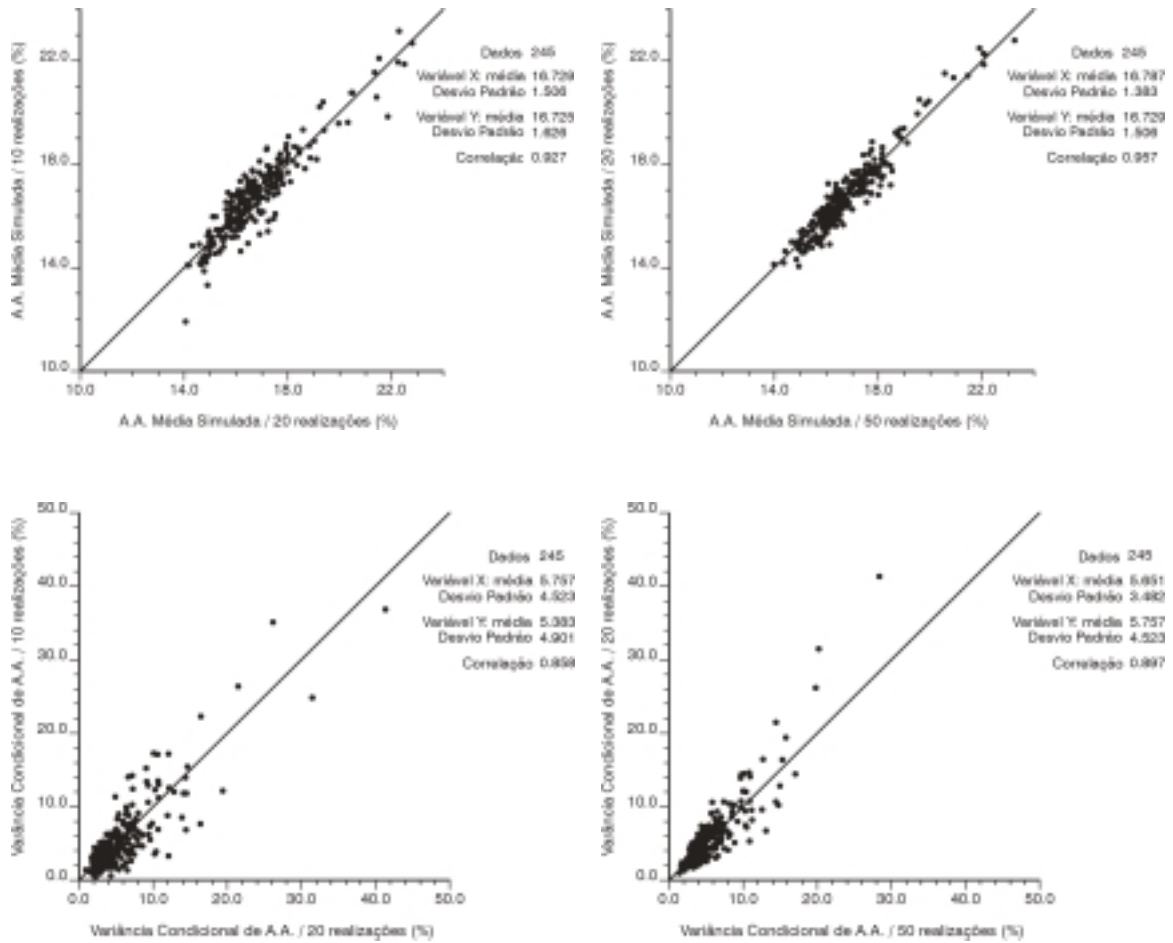
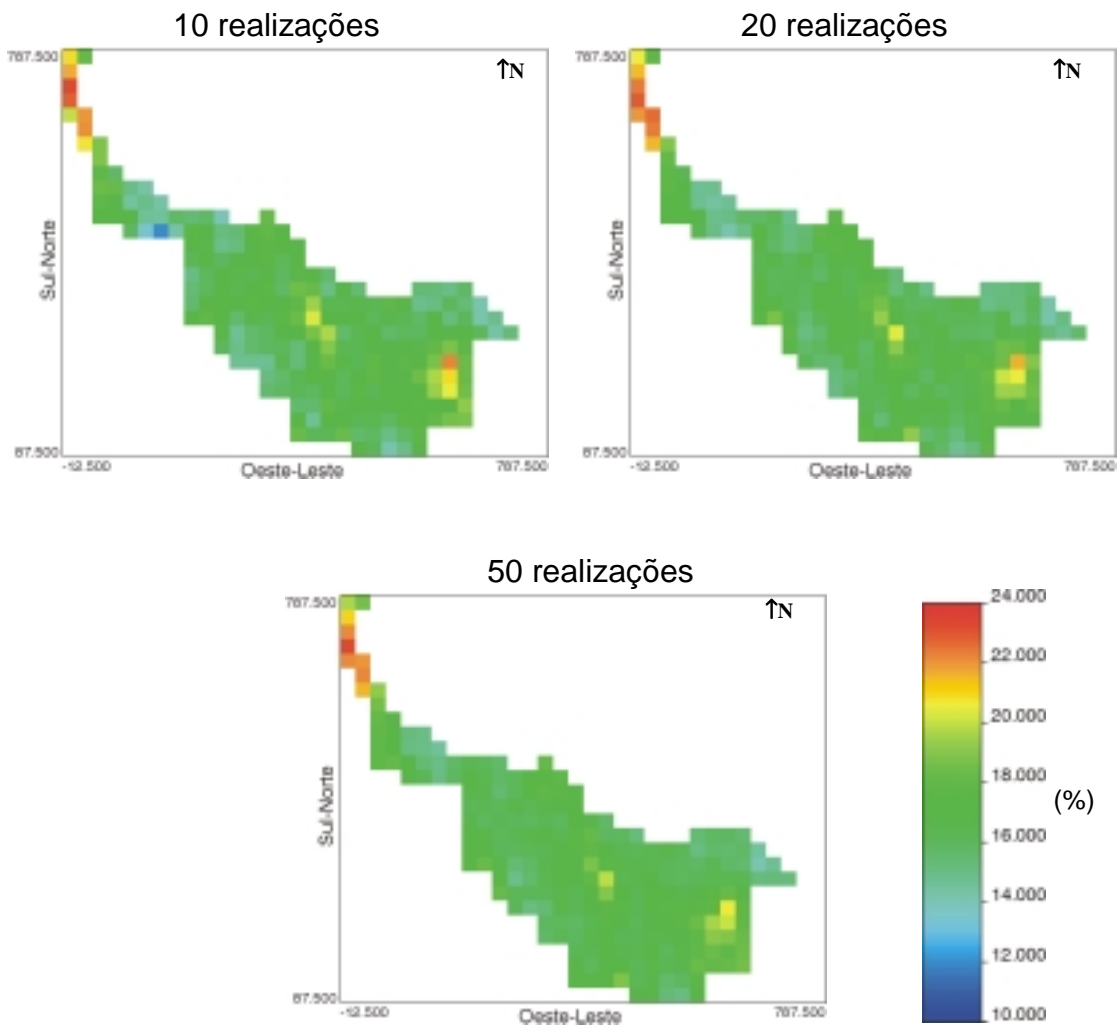


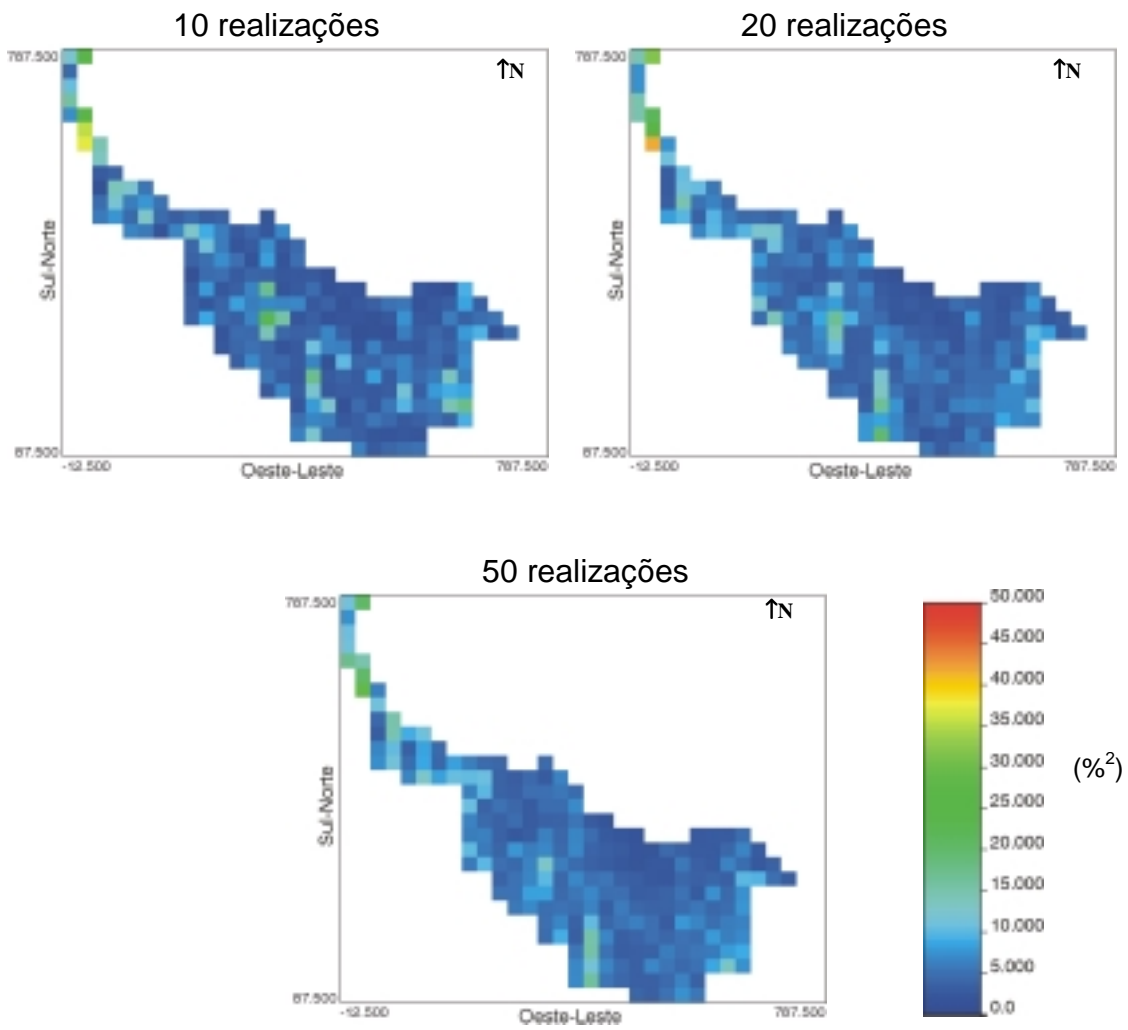
Figura H.1 – Diagramas de correlação entre resultados oriundos, para absorção d'água, de 10,20 e 50 realizações, para médias simuladas acima, e variâncias condicionais abaixo.

MÉDIAS SIMULADAS (A.A.):



**Figura H.2 – Médias simuladas bloco-a-bloco para absorção d'água, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**

VARIÂNCIAS CONDICIONAIS (A.A.):



**Figura H.3 – Variâncias condicionais bloco-a-bloco para simulações de absorção d’água, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**

## Retração Linear

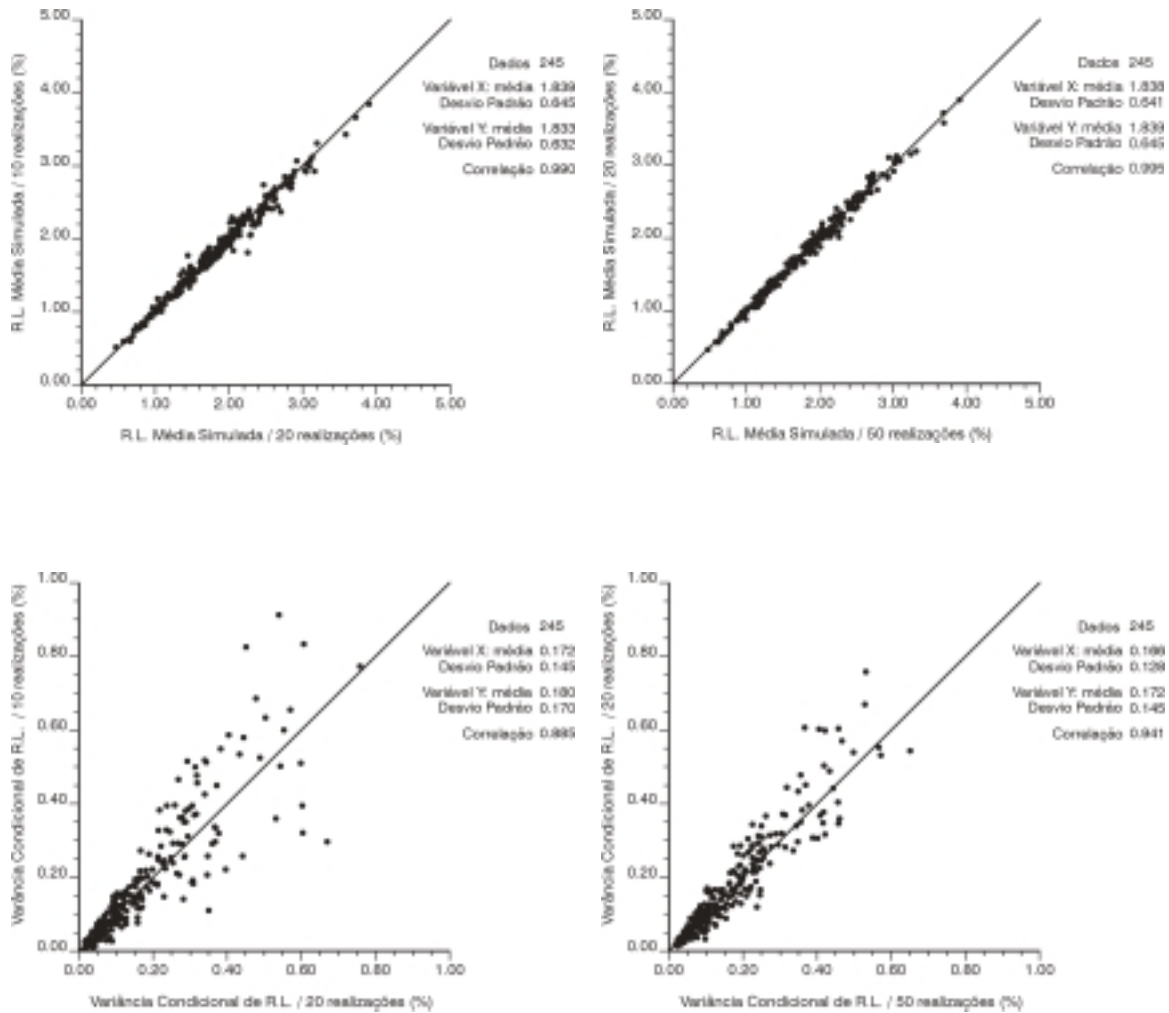
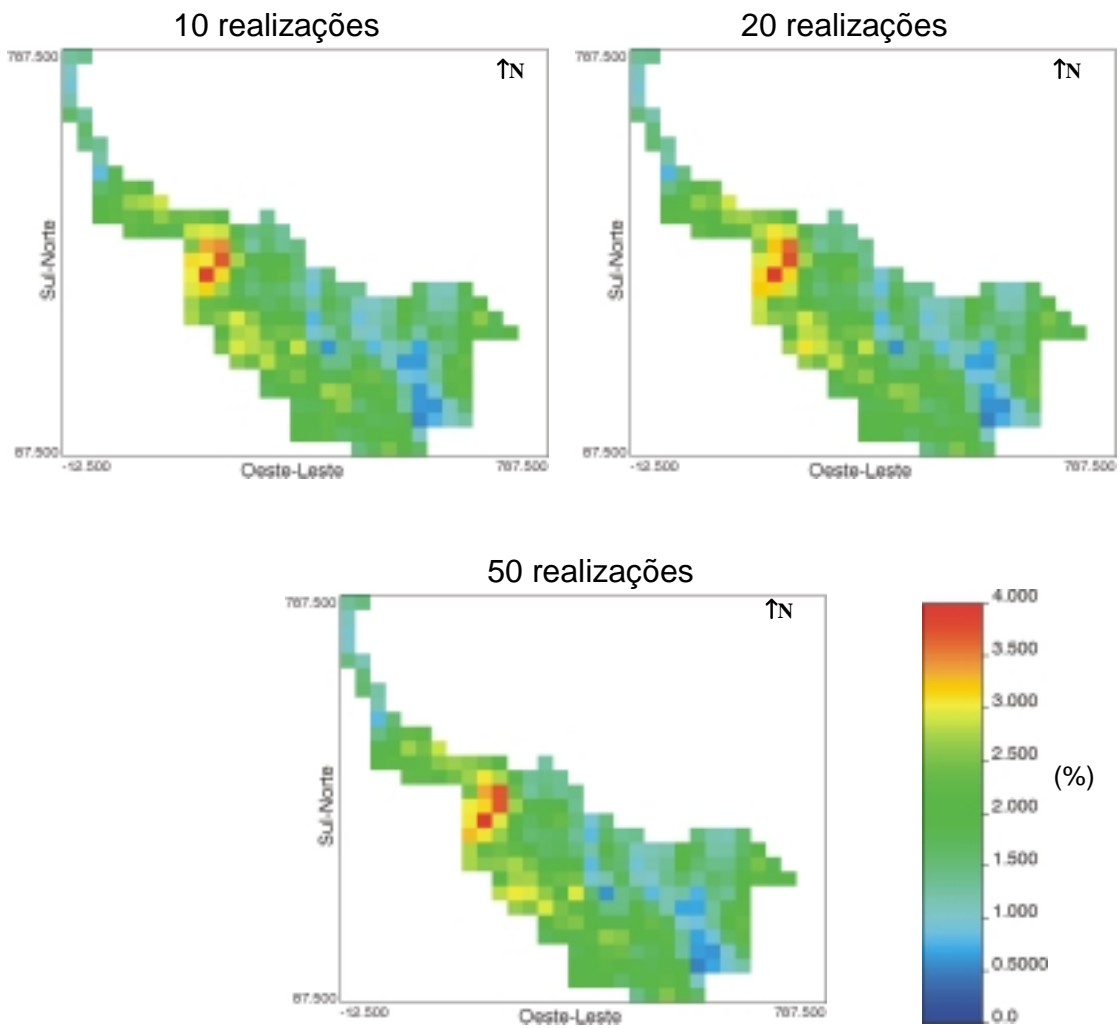


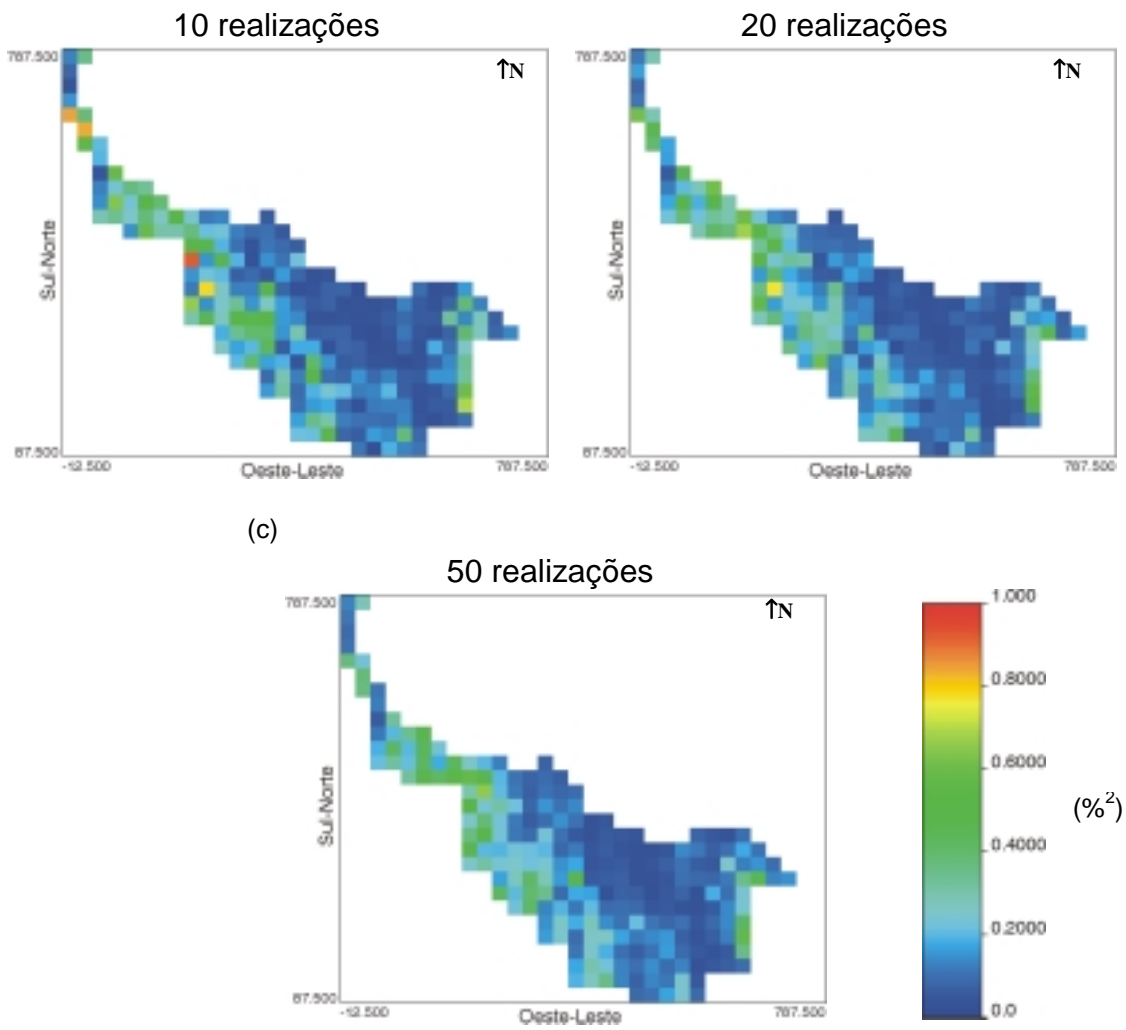
Figura H.4 - Diagramas de correlação entre resultados oriundos, para retração linear, de 10,20 e 50 realizações, para médias simuladas acima, e variâncias condicionais abaixo.

MÉDIAS SIMULADAS (R.L.):



**Figura H.5 - Médias simuladas bloco-a-bloco para retração linear, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**

VARIÂNCIAS CONDICIONAIS (R.L.):



**Figura H.6 - Variâncias condicionais bloco-a-bloco para simulações de retração linear, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**



## Espessura de Argila

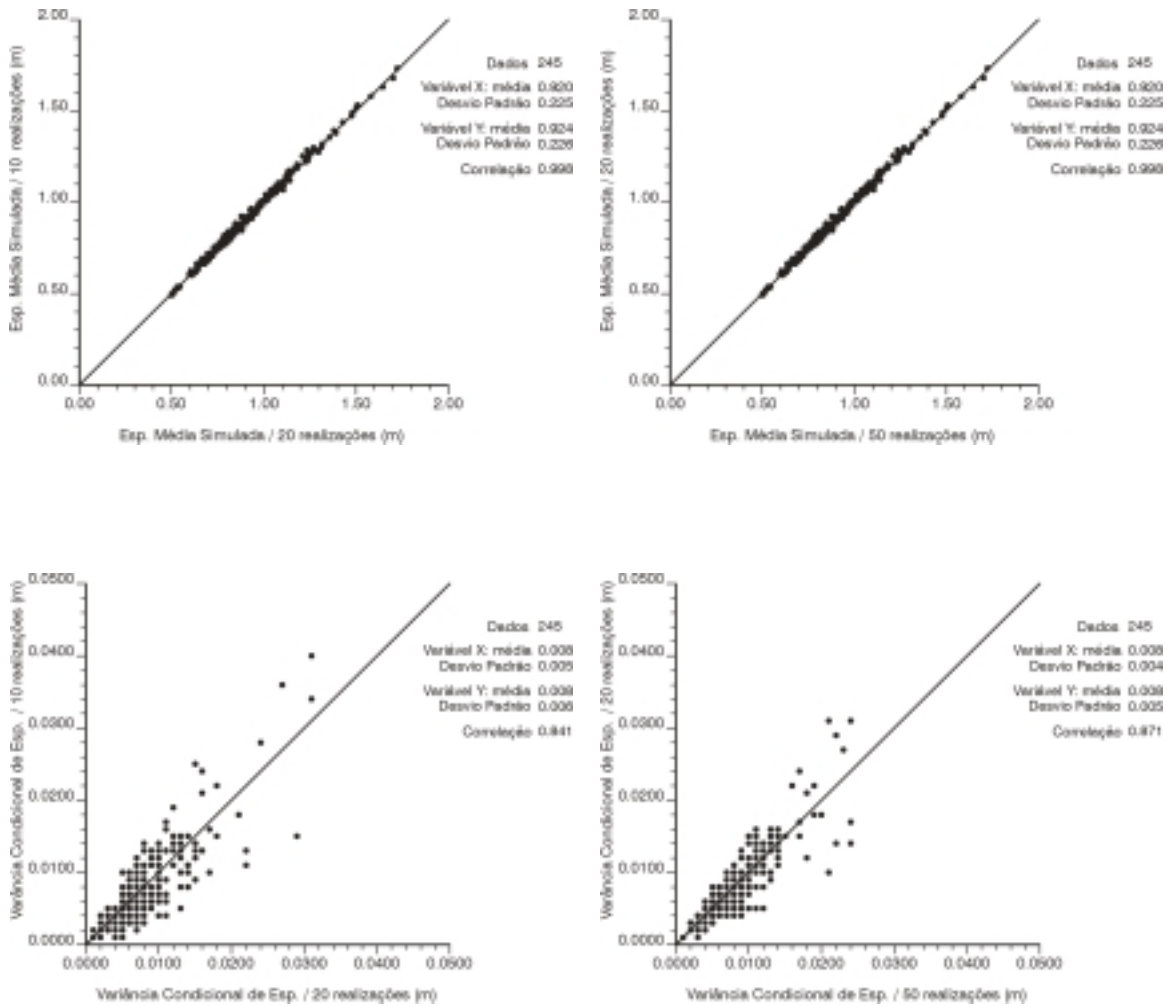
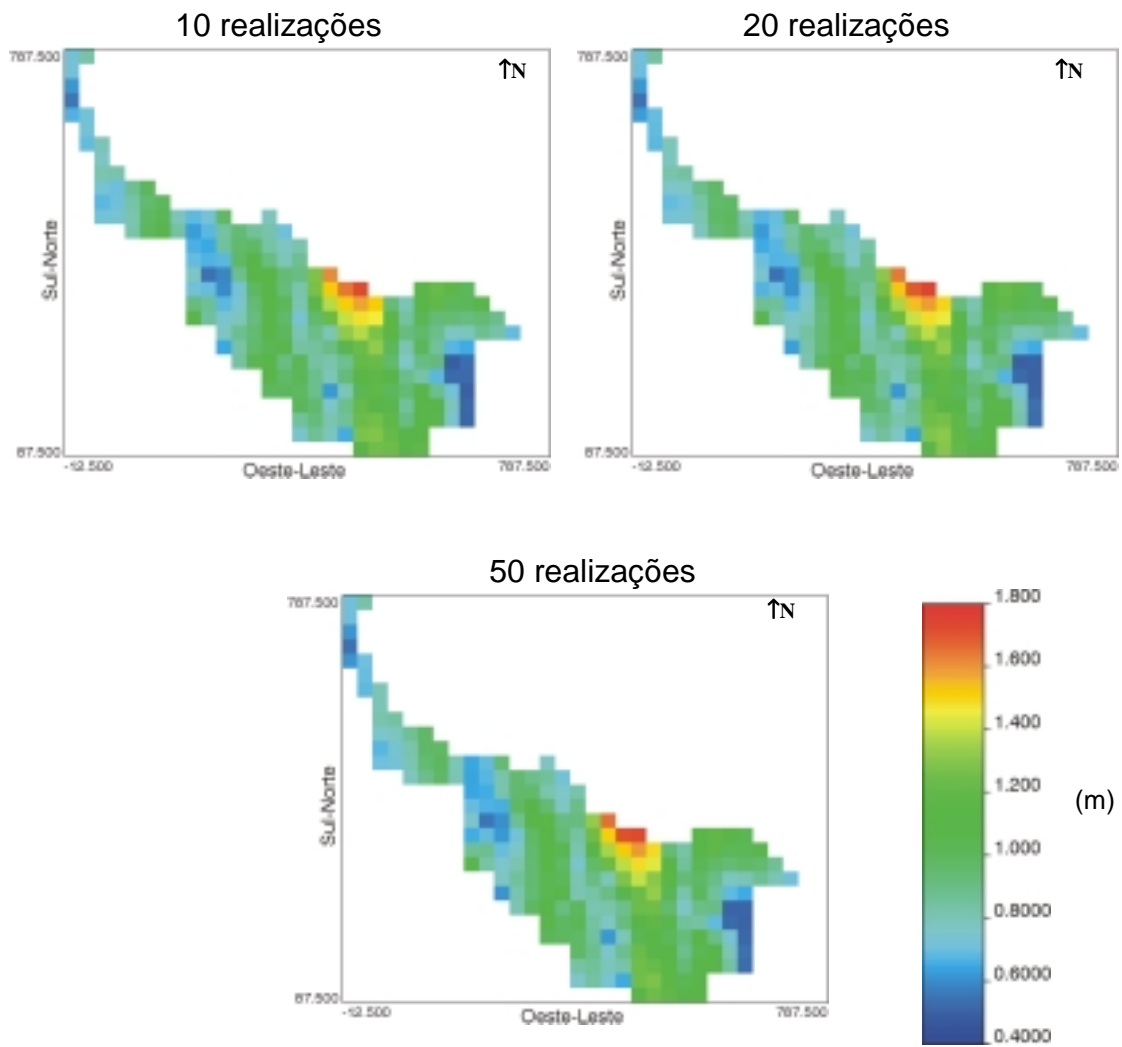


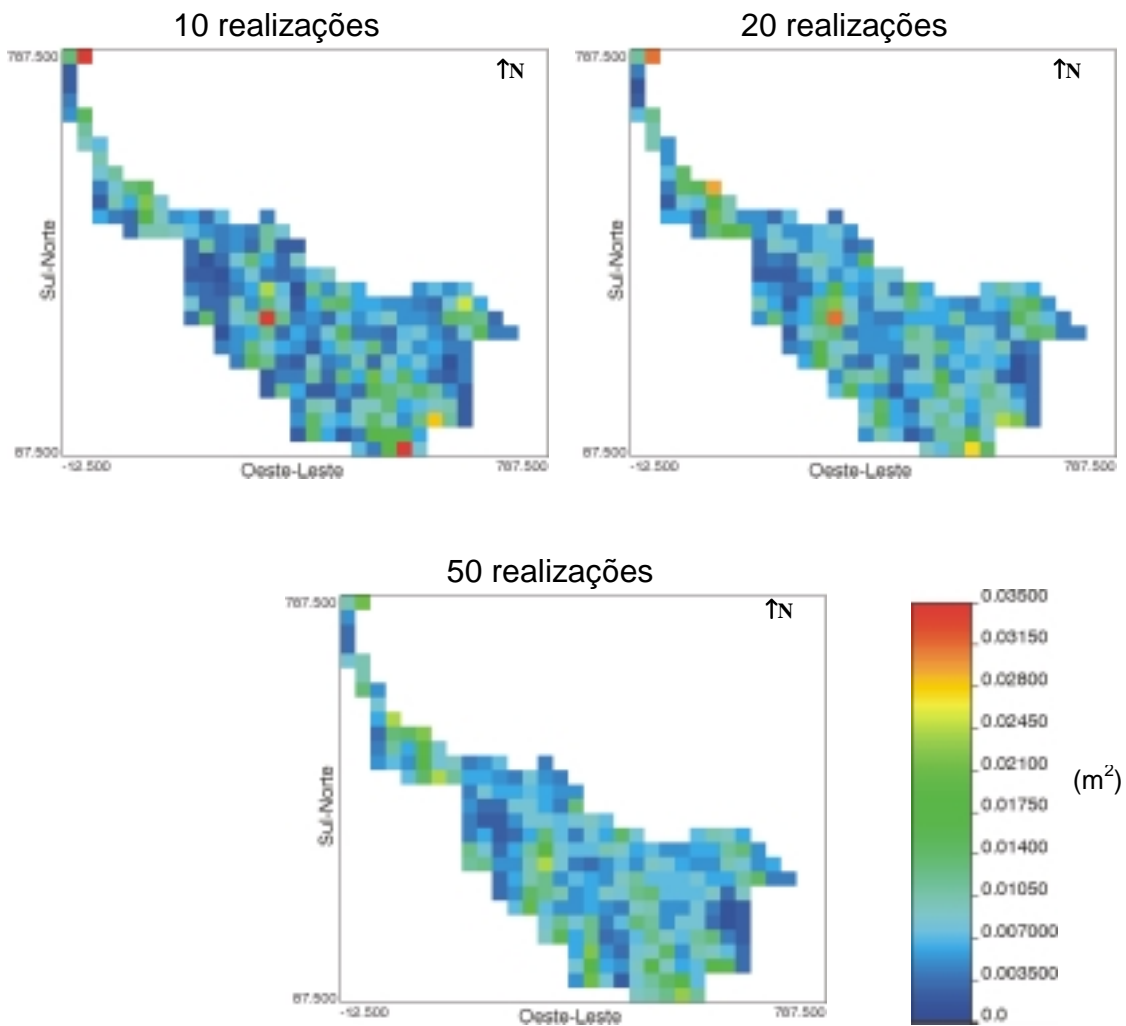
Figura H.7 - Diagramas de correlação entre resultados oriundos, para espessura de argila, de 10,20 e 50 realizações, para médias simuladas acima, e variâncias condicionais abaixo.

MÉDIAS SIMULADAS (Esp.):



**Figura H.8 - Médias simuladas bloco-a-bloco para espessura de argila, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**

VARIÂNCIAS CONDICIONAIS (Esp.):



**Figura H.9 - Variâncias condicionais bloco-a-bloco para simulações de espessura de argila, a partir de número variável de realizações conforme indicado.**

## Apêndice I – Validações das Simulações

Conforme discussão no Capítulo 4, para usufruir dos resultados advindos de simulações estocásticas efetuadas, tomando-as efetivamente como possíveis realizações do depósito em estudo, são necessários procedimentos de validação. Essas validações buscam verificar se os dois momentos estatísticos (histograma e função variograma/covariância) foram ergodicamente reproduzidos nas simulações (Goovaerts, 1997 p.370-373 e p.426-427; Deutsch & Journel, 1998 p.126-131).

As figuras apresentadas a seguir mostram as validações efetuadas para as três variáveis regionalizadas em estudo, no espaço original. Os histogramas de quatro realizações – escolhidas aleatoriamente de um total de cinquenta – são confrontados com o histograma desagrupado de referência, para cada uma das variáveis. Similarmente, variogramas experimentais (representados por pontos) de dez realizações aleatoriamente escolhidas são confrontados com o respectivo modelo variográfico de referência (representados por linhas contínuas), para cada uma das variáveis. Os variogramas experimentais dos dados amostrais e os modelos ajustados são apresentados junto às validações de cada variável.

Para todos os casos, pode-se verificar que as simulações reproduziram ergodicamente os histogramas desagrupados e modelos variográficos de referência. Isso permitiu a utilização dos resultados nas subseqüentes análises de reservas recuperáveis de argila.

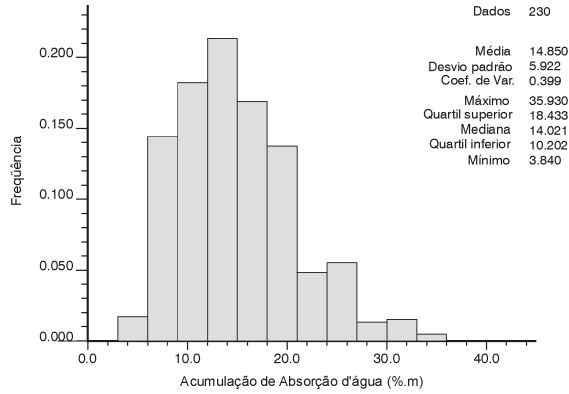
A.A.A. = Acumulação de Absorção d'água

A.R.L. = Acumulação de Retração Linear

Esp. = Espessura de Argila

# Acumulação de Absorção d'água

## HISTOGRAMA AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (DESAGRUPADO):



## HISTOGRAMAS DE REALIZAÇÕES:

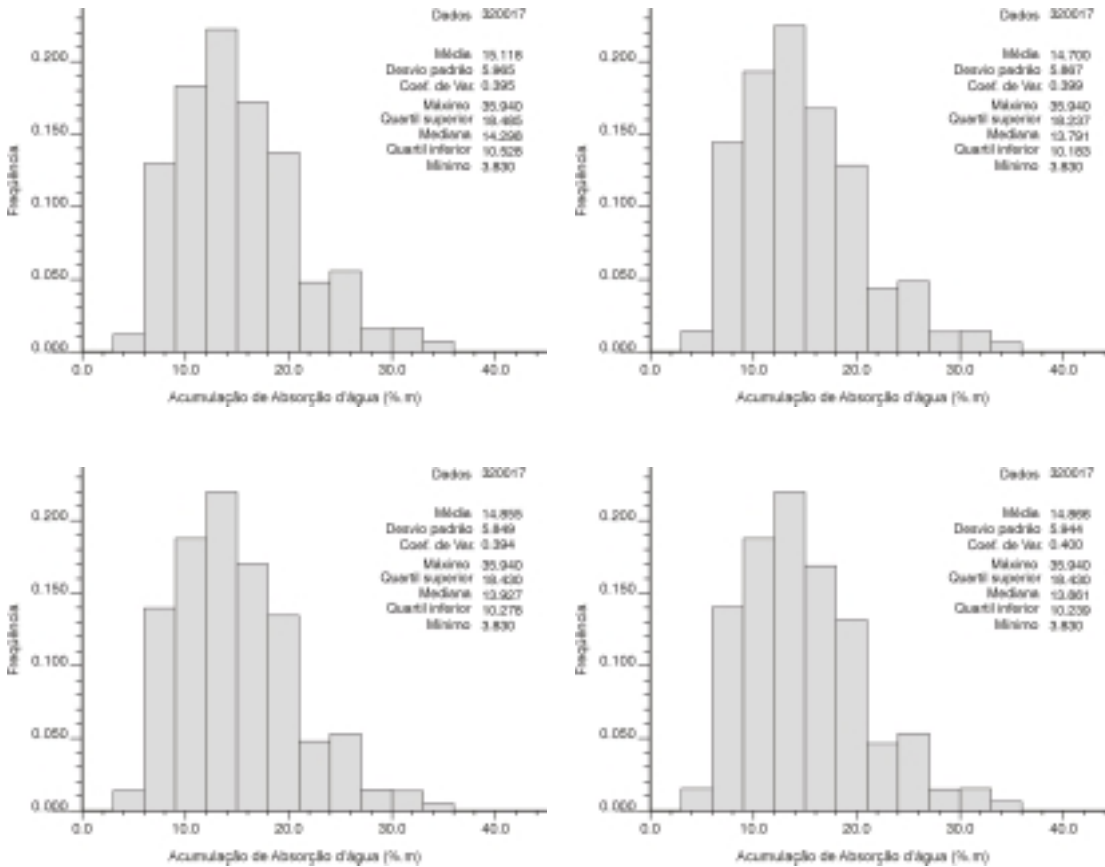
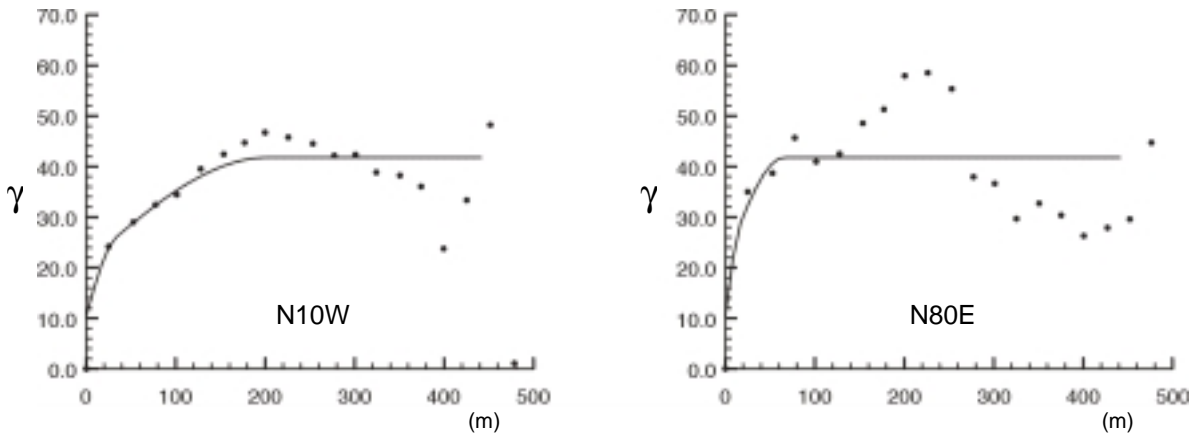


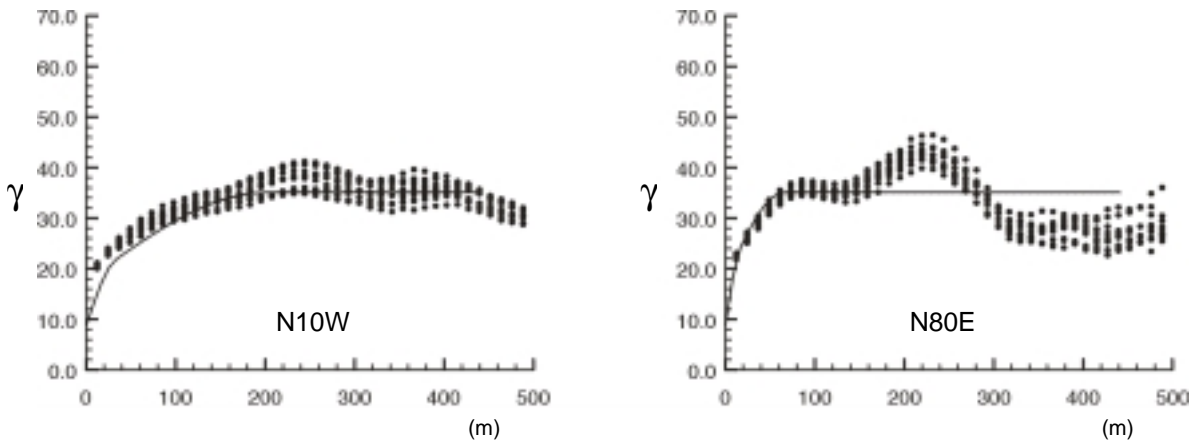
Figura I.1 - Comparativo entre histograma amostral (pontual) de referência e histogramas de quatro simulações no suporte 1m x 1m (de um total de cinquenta): variável acumulação de absorção d'água.

MODELO VARIOGRÁFICO AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (A.A.A.):



VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DE DEZ REALIZAÇÕES

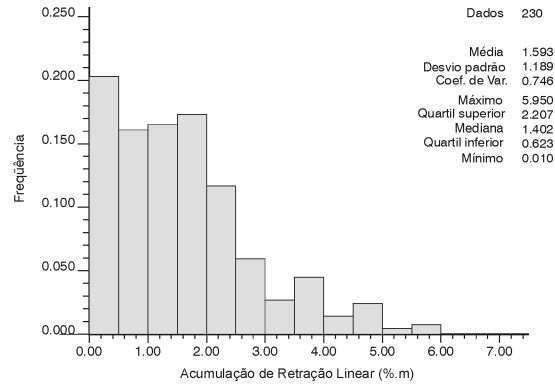
MODELO VARIOGRÁFICO DE REFERÊNCIA  
(A.A.A.):



**Figura I.2 – Para a variável acumulação de absorção d’água, modelo variográfico de referência acima nas direções de maior (à esquerda) e menor continuidade (à direita), com os pontos representando variogramas experimentais e linhas contínuas correspondendo ao modelo ajustado; abaixo justaposição entre variogramas experimentais de realizações (pontos) e o modelo de referência (linhas contínuas).**

# Acumulação de Retração Linear

## HISTOGRAMA AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (DESAGRUPADO):



## HISTOGRAMAS DE REALIZAÇÕES:

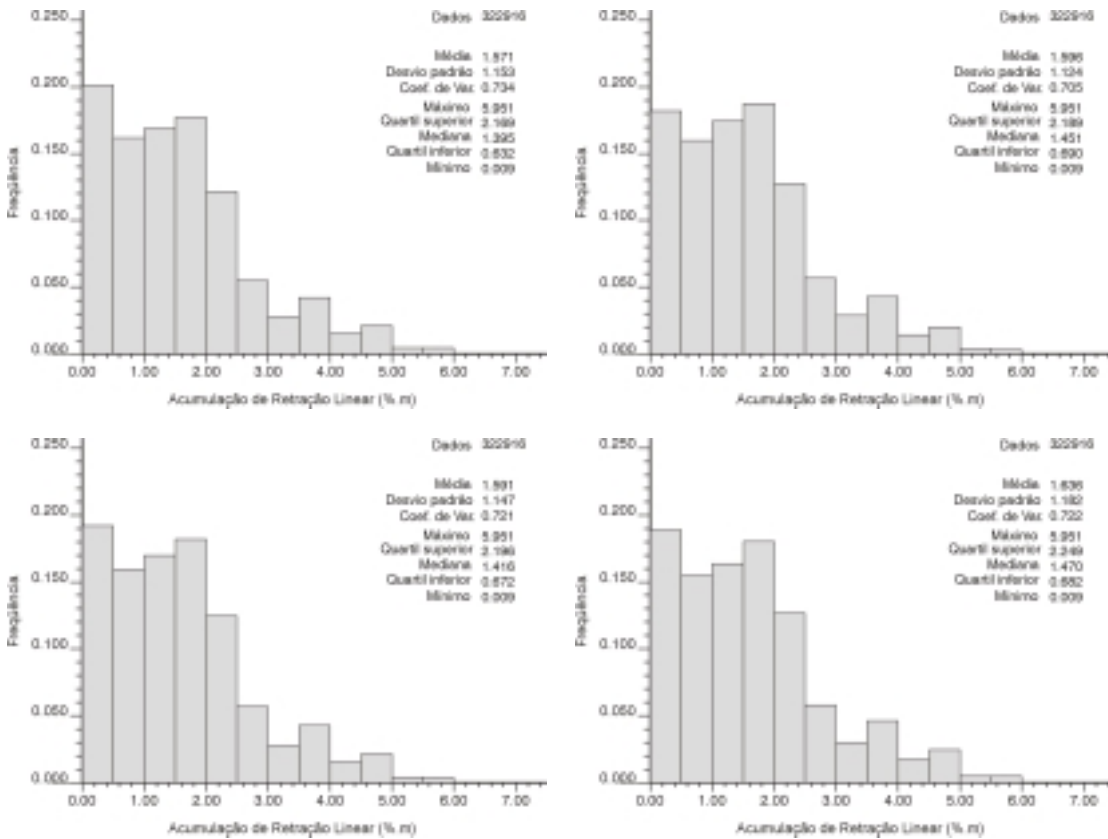
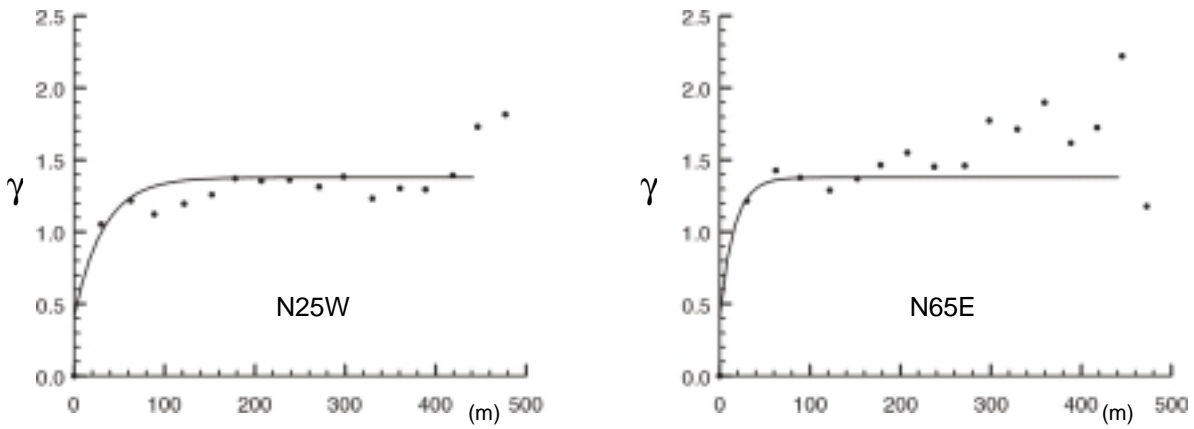


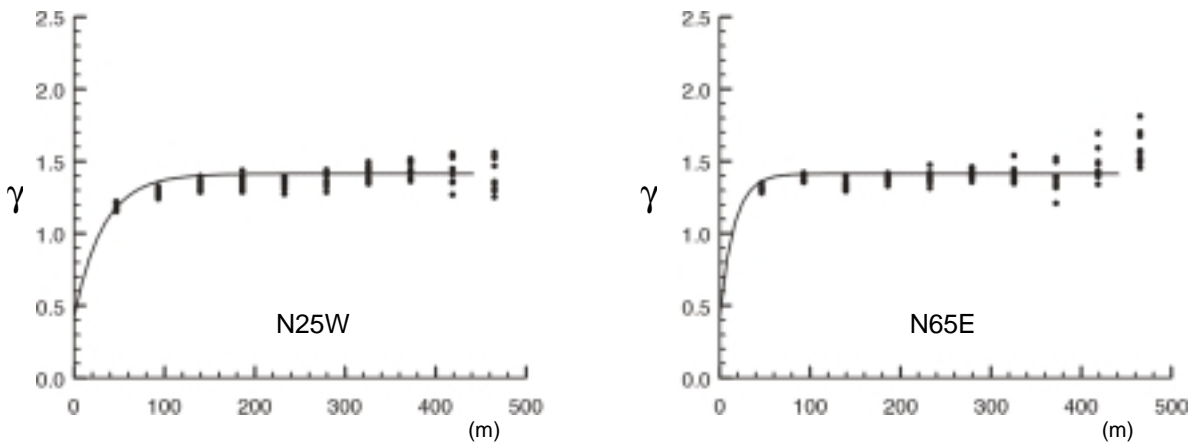
Figura I.3 - Comparativo entre histograma amostral (pontual) de referência e histogramas de quatro simulações no suporte 1m x 1m (de um total de cinquenta): variável acumulação de retração linear.

MODELO VARIOGRÁFICO AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (A.R.L.):



VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DE DEZ REALIZAÇÕES

$\bar{x}$   
MODELO VARIOGRÁFICO DE REFERÊNCIA  
(A.R.L.):

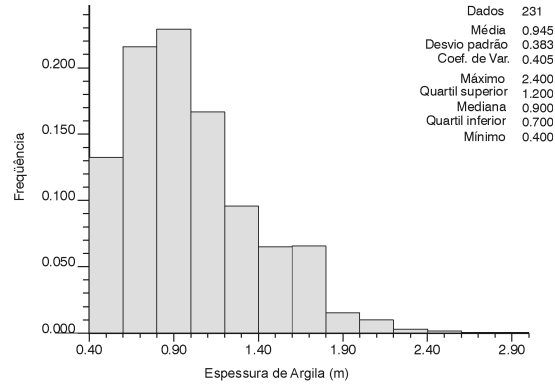


**Figura I.4 – Para a variável acumulação de retração linear, modelo variográfico de referência acima nas direções de maior (à esquerda) e menor continuidade (à direita), com os pontos representando variogramas experimentais e linhas contínuas correspondendo ao modelo ajustado; abaixo justaposição entre variogramas experimentais de realizações (pontos) e o modelo de referência (linhas contínuas).**



# Espessura de Argila

## HISTOGRAMA AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (DESAGRUPADO):



## HISTOGRAMAS DE REALIZAÇÕES:

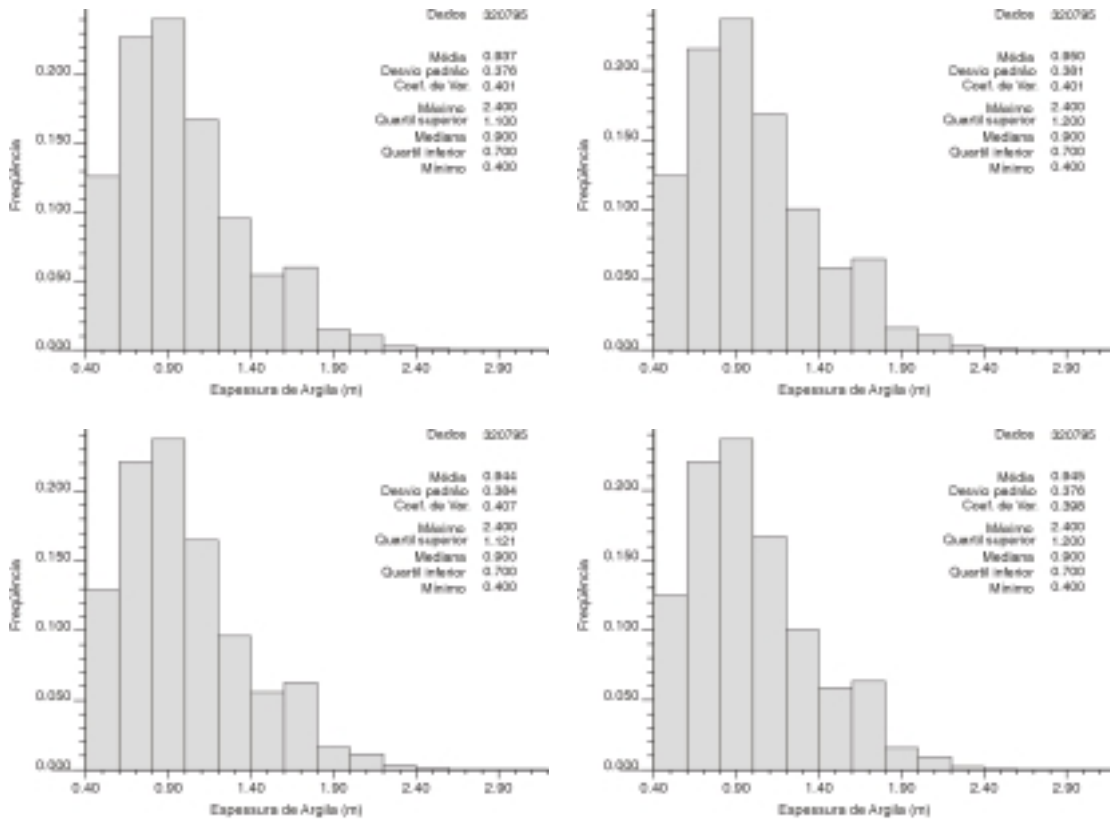
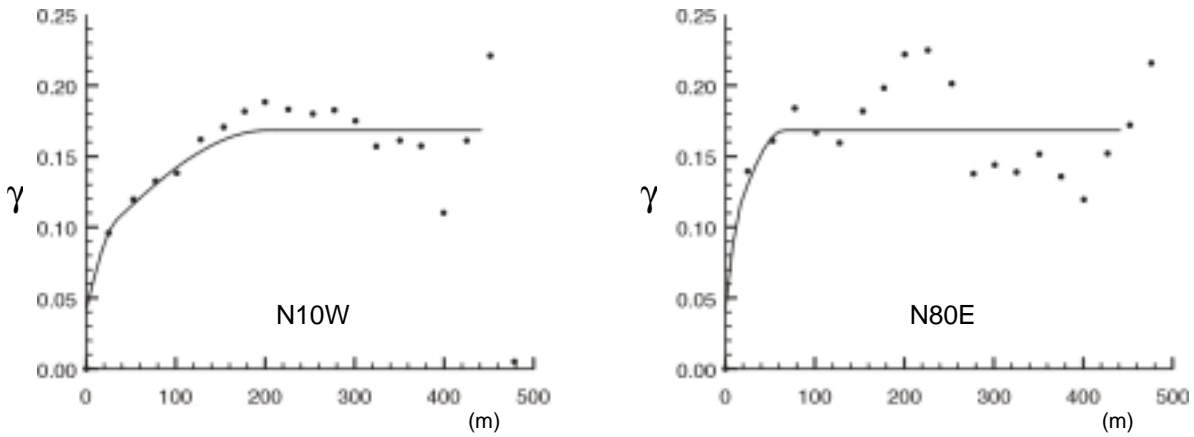


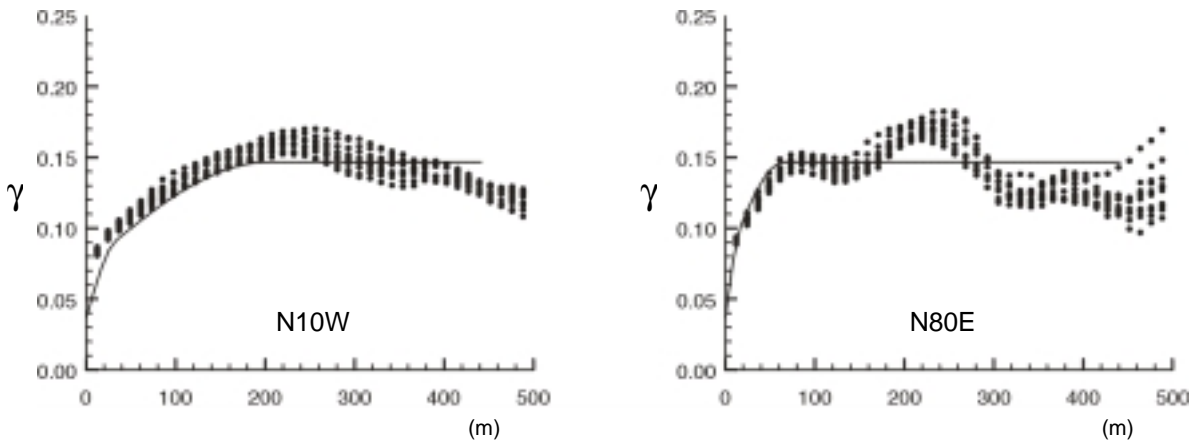
Figura I.5 - Comparativo entre histograma amostral (pontual) de referência e histogramas de quatro simulações no suporte 1m x 1m (de um total de cinquenta): variável espessura de argila.

MODELO VARIOGRÁFICO AMOSTRAL DE REFERÊNCIA (Esp.):



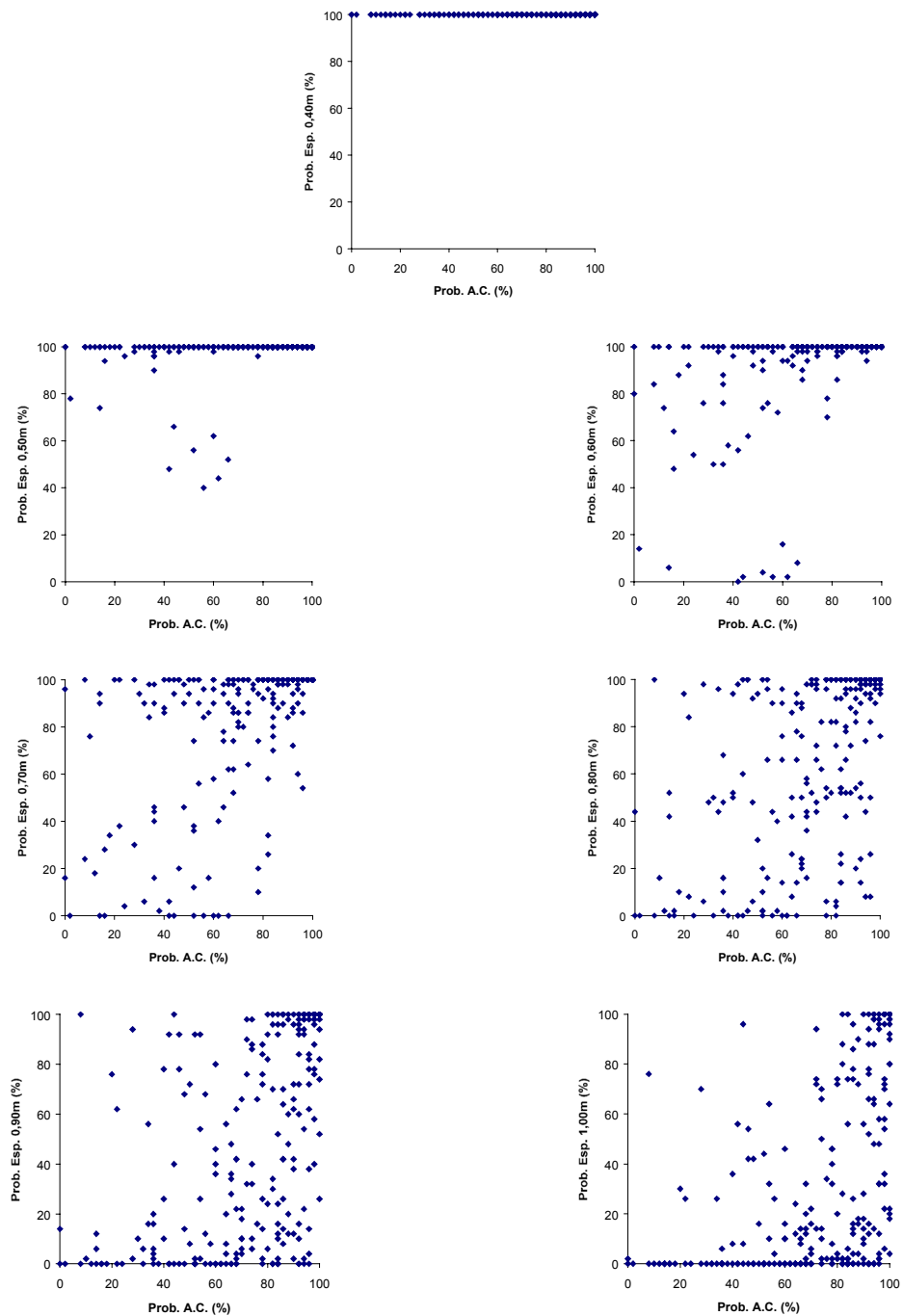
VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS DE DEZ REALIZAÇÕES

MODELO VARIOGRÁFICO DE REFERÊNCIA  
(Esp.):



**Figura I.6 – Para a variável espessura de argila, modelo variográfico de referência acima nas direções de maior (à esquerda) e menor continuidade (à direita), com os pontos representando variogramas experimentais e linhas contínuas correspondendo ao modelo ajustado; abaixo justaposição entre variogramas experimentais de realizações (pontos) e o modelo de referência (linhas contínuas).**

## Apêndice J – Independência de Probabilidades



**Figura J.1 - Diagramas de dispersão mostrando independência estatística entre probabilidades de ocorrência bloco-a-bloco de argila cerâmica (Prob. A.C.) e de espessuras excederem determinados valores de referência (e.g., Prob. Esp. 0,80m = probabilidade de espessura ser  $\geq 0,80$  m).**