

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e
Meteorologia

Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

GEOPROCESSAMENTO APLICADO À IDENTIFICAÇÃO DE
ÁREAS PARA REJEITOS E ESTIMATIVA DE RECURSO DE
CARVÃO NA REGIÃO DA MINA LEÃO II

Jorge Luiz Barbosa da Silva

Geólogo

Orientador: Dr. Ricardo Norberto Ayup Zouain
Co-orientador: Dr. Nelson Amoretti Lisboa

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto com ênfase em Geoprocessamento, área de concentração em Geologia.

Porto Alegre, RS
Novembro de 2000.

Aos meus filhos e esposa, e

Ao Badi (in memoriam).

Agradecimentos

Aos meus familiares, privados financeiramente que foram, desde quando decidi enfrentar este mestrado e abandonar as atividades na empresa privada. À Dona Irma, minha mãe, por tudo e principalmente pelas preces.

Ao colega, professor e doutor Ricardo Norberto Ayup Zouain, orientador deste trabalho, pelo fundamental apoio no momento da tomada de decisão e nas várias etapas deste trabalho.

Ao colega, professor e doutor Nelson Amoreti Lisboa, co-orientador, pelo apoio em assuntos de cunho geológico e outros.

Aos professores do CEPSRM: Lisboa, Madruga, Clark, Ducati, Vítor, Denise, Dirce, Steffen e Hasenack pelos ensinamentos e experiências transmitidas.

Ao professor Vítor Haertel, por permitir frequentar a disciplina de SIG da graduação de Geografia, meu primeiro contato com geoprocessamento.

Ao professor Madruga pelos ensinamentos e pela oportunidade de trabalhar com dados de um SIG através da disciplina SR e Geoprocessamento Aplicados ao Manejo de Unidades de Planejamento.

Ao professor Hasenack pelos ensinamentos de Sistemas de Informação Geográfica.

Ao professor João Felipe L. Costa do PPGEM-UFRGS, pelos ensinamentos de Geoestatística.

Aos membros da banca examinadora, professores Dr. Pedro Roberto Azambuja Madruga, Dr. Jair Carlos Koppe e Dr. Farid Chemale Junior, pelas críticas, correções e sugestões.

Aos colegas da turma 97, Eleandro, Cláudia, Luciane e Adriano, pelos estudos em grupo, pela troca de conhecimentos, pela contribuição de cada um em resolver tantas questões de Sensores, Estatística, Análise Visual, disciplina do Prof. Vítor e etc..

Ao colega Eleandro, companheiro de grupo em diversos trabalhos, pelo apoio, por ter levado o grupo nas costas, principalmente com seus conhecimentos de informática.

Ao pessoal de apoio do CEPSRM, Madalena, Mônica, Laurindo, Luciane, Fausta e Adriano.

À CRM nas pessoas do engenheiro de minas Jorge Gravonski e geólogo Rui Osório, pelas informações cedidas.

À FEPAM nas pessoas da geógrafa Rejane Valdameri e Tânia pelas imagens cedidas.

À CPRM pelo empréstimo das fotografias aéreas, mapa geológico e material bibliográfico.

Ao colega de departamento, compadre, professor e doutor Norberto Dani, pelo apoio e interesse em ajudar a resolver diversos tipos de problemas.

Ao Carlos Antônio Kalicheski, meu cunhado, por ter me ajudado a deixar de andar no T6 e no T8.

À colega, professora e mestre Andrea Ieschek pelo auxílio no acabamento dos arquivos dxf e dwg.

Ao colega, professor e doutor Francisco Humberto Simões Magro pelos esclarecimentos em estatística.

Ao colega, professor e mestre Sérgio Florêncio pelo auxílio na conversão dos arquivos dxf em arquivos dat.

Ao colega, mestre Regis Lahm, pelo apoio e troca de informações sobre o software Idrisi.

Aos colegas da turma 96, principalmente ao Farinha, que nos legou aquele manancial de questões e respostas de Sensores I e II. Este material foi transmitido à turma 98 (pasta vermelha).

GEOPROCESSAMENTO APLICADO À IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA REJEITOS E ESTIMATIVA DE RECURSO DE CARVÃO NA REGIÃO DA MINA LEÃO II¹

Jorge Luiz Barbosa da Silva

SINÓPSE

Imagens georreferenciadas LANDSAT 5 TM da região da Mina Leão II, situada na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, foram processadas e classificadas digitalmente com objetivo de gerar o mapa de uso e cobertura do solo. Destas imagens, a drenagem foi extraída na forma vetorial, com o objetivo de determinar a faixa de proteção em torno dela. Dados topográficos plani-altimétricos analógicos foram tratados gerando o modelo digital do terreno e mapas de declividades. Foram definidos critérios para selecionar sítios adequados à colocação de rejeitos de carvão. Imagens de uso e cobertura do solo, declividades, rede de drenagem, litologias, estruturas geológicas, e distância a partir da boca da mina foram transformadas em sete fatores. Três fatores são absolutos ou restrições: zona de proteção da drenagem, zona de restrição em torno dos falhamentos e declividades superiores a 8%. Os restantes, são fatores relativos: uso e cobertura do solo reclassificado, declividade inferior a 8%, substrato litológico e distância a partir da mina. Aos quatro fatores relativos foi atribuída uma ponderação pareada. Através das ferramentas computacionais de apoio à decisão, em um Sistema de Informação Geográfica, os oito diferentes fatores foram cruzados, resultando um mapa temático que localiza e classifica sítios para a locação de rejeitos de carvão. As classes identificadas foram: área de restrição, péssima, regular, boa e ótima. O mapa de uso e cobertura do solo foi reclassificado em função de ser elaborada uma imagem de superfície de atrito, a partir do local da boca da mina, com a finalidade de se projetar vias de menor custo, desde a mina até a BR290 e a um porto situado no rio Jacuí. Dados sobre a espessura da camada de carvão inferior, "I", de uma campanha de sondagem de 182 furos, foram tratados por metodologia de geoestatística. Estudos de estatística descritiva, análise de continuidade espacial e estimação foram realizados, culminando com a cubagem da camada na área de estudo. Foi escolhido o processo de interpolação através da krigagem ordinária. A tonelagem da camada de carvão "I" foi estimada na ordem de 274.917.234 a 288.046.829 t. com nível de confiança de 95%.

¹Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, novembro de 2000.

GEOPROCESSING APPLIED TO IDENTIFICATION OF WASTE DISPOSAL SITES AND ESTIMATION OF COAL RESOURCES IN MINA DO LEÃO II REGION ²

Jorge Luiz Barbosa da Silva

ABSTRACT

Georeferenced LANDSAT 5 TM images from Mina do Leão II, located in the area geographically called Depressão Central in Rio Grande do Sul State, were digitally processed and classified in order to obtain a map of land use and cover. The drainage system was extracted from those images, in vectorial way, to mark the limits of a protection zone around it. Topographic data were converted into digital type to obtain digital elevation model and slope maps. Criteria were elaborated to select suitable places to deposit coal wastes. Land use and cover, slopes, drainage system, lithologic, structural and distance from mine maps were transformed on seven factors: three were absolute factors or restrain: drainage protection zone map, lineaments protection zone map and slopes higher than 8% map. The four remaining are relative factors: reclassified land use and cover map, slope inferior to 8% map, lithologic map and distance from mine map. On the four relative factors were imposed a set of relative weights. Through the use of computer decision support tools, in a Geographic Information System, those seven different factors were combined, producing an image which identifies and classifies suitable places to locate coal refuses. This image identifies five classes: restrain area, very bad, regular, good and very good. The map of land use and cover was reclassified to generate a cost surface image, like a friction surface, to determine a least cost route from mine to BR290 road and from mine to small a port at Jacui river. Thickness data of a coal bed referred to as inferior "I" from 182 logs drilling were dealt with geoestatistic process. Descriptive statistical analyses, spacial continuity analyses and estimation were performed to carry out a coal bed cubage of the studied area. The ordinary kriging estimation method was chosen. The cubage of "I" coal bed was estimated at 274,917,234 to 288,046,829 tons with a 95% confidence level.

²Master of Science Thesis, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Graduate Course in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, November, 2000.

Sumário

Agradecimentos	iii
Sinópsse	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos	xvii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1- Considerações iniciais	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - A área de estudo	3
1.3.1 - Localização	3
1.3.2 - Uso do solo	3
1.3.3 - Clima regional	4
1.4 - A importância econômica do carvão	5
2 - METODOLOGIA	8
2.1 - Aquisição dos dados básicos	8
2.2 - Processamento e refinamento dos dados	10
2.3 - Tratamento geoestatístico das medidas de espessura da camada inferior I	23
3 - GEOLOGIA	27
3.1 - Síntese da evolução geológica: Brasiliano ao Recente	27
3.2 - Estratigrafia da Bacia do Paraná	26
3.2.1 – Estratigrafia da Bacia do Paraná no Estado do RS	31
3.3 - Estratigrafia na região de mina Leão II	37
3.4 - As bacias carboníferas no Estado do RS	43
3.5 - A bacia Leão-Butiá	44

3.6 - Estratigrafia das camadas de carvão na concessão da Mina Leão II	45
3.7 - A camada inferior I	45
3.8 - Geologia Estrutural – Bacia do Paraná	47
3.8.1 - Morfoestruturas lineares da Bacia do Paraná	47
3.8.2 - Geologia estrutural na região da concessão Leão II	49
3.8.2.1 - Falhamentos	48
3.8.2.2 - Dobramentos	51
3.9 – Geomorfologia	53
3.9.1 - A área de estudo no contexto da Depressão Periférica do RS	53
4 - SENSORIAMENTO REMOTO	56
4.1 - Características das imagens de sensores orbitais de varredura	58
4.2 - Resoluções de uma imagem LANDSAT 5 TM	58
4.2.1 - Resolução espacial	58
4.2.2 - Resolução espectral	58
4.2.3 - Resolução radiométrica	59
4.2.4 - Resolução temporal	59
4.3 - Comportamento espectral de alvos	59
4.4 - Pré - processamento da imagem	62
4.4.1 - Correções das distorções geométricas	62
4.5 - Processamento da imagem	63
4.5.1 - Histograma da imagem digital	63
4.5.2 - Realce da imagem	65
4.5.3 - Suavização da imagem	66
4.6 - Classificação digital da imagem	67
4.6.1 - Tipos de classificadores	68
4.6.2 - Tipos de classificação	68
5 - MODELO DIGITAL DO TERRENO	71
5.1 - MDT da região de estudo	73
5.2 - Importância do MDT na área de estudo	75
6 – GEOPROCESSAMENTO	77

6.1 - Sistemas de informação geográfica - SIG	77
6.1.1 - Estrutura dos dados em um SIG	81
6.1.1.1 - Formato vetorial	81
6.1.1.2 - Formato raster (varredura)	81
6.1.2 - A organização de um SIG	82
6.2 - Aplicações de SIG na área de estudo	82
6.2.1 - Determinação da áreas compatíveis para depósitos de de rejeitos de carvão	82
6.2.1.1 - A importância dos fatores	82
6.2.1.2 - Ponderação dos fatores relativos	90
6.2.1.3 - Mapa de classes de aptidões para o depósito de rejeitos	91
6.2.2 - Determinação de distâncias de menor custo para o traçado de estradas	93
7 - CUBAGEM DA CAMADA DE CARVÃO I USANDO METODOLOGIA DE GEOESTATÍSTICA	97
7.1 – Geoestatística	97
7.1.1 - Análise estatística descritiva básica dos dados	99
7.1.1.1 - Teste de normalidade do conjunto de dados da espessura da camada I	102
7.1.2 - Análise da continuidade espacial das medidas da espessura da camada I	104
7.1.2.1 - Análise dos variogramas	108
7.1.2.2 - A escolha dos parâmetros do variograma	110
7.1.2.3 - Os modelos dos variogramas	114
7.1.3 - Estimativas	116
7.1.3.1 - O conceito de função e variável aleatórias	117
7.1.3.2 - Processos de estimação de pontos	120
7.1.3.2.1 - Processo dos polígonos	120
7.1.3.2.2 - Processo da triangulação	121
7.1.3.2.3 - Processo do inverso da distância	122
7.1.3.2.4 - Processo da krigagem ordinária	122
7.2 - Cubagem da camada I	126

8 - CONCLUSÕES	132
9 - RECOMENDAÇÕES	136
10 - BIBLIOGRAFIA	138
11 - ANEXO 1	146

Lista de Figuras

1.1	Localização da área de estudo	4
2.1	Técnica de reamostragem pelo vizinho mais próximo, os pixels em destaque terão o mesmo atributo (modificado de Crosta, 1993)	14
2.2	Avaliação por critérios múltiplos através de uma combinação linear ponderada no software Idrisi	20
2.3	Identificação do porto na carta do exército SH 22 H IV- 4	21
2.4	Ilustração dos parâmetros de h para a seleção dos pares de um variograma. Qualquer amostra que caia na faixa sombreada será pareada com o par (x, y), (modificada de Isaaks & Srivastava, 1989)	24
3.1	Disposição geográfica da Bacia do Paraná, modificada de Zalan et al. (1987)	30
3.2	Mapa de isópacas da Formação Rio Bonito, modificado de Zalan et al. (1987)	33
3.3	Mapa geológico e coluna estratigráfica da região, modificados de Lopes, (1986)	39
3.4	Seção geológica A-B, modificada de Lopes (1986)	40
3.5	Perfil de um testemunho de sondagem na região de estudo, modificado de CRM (1978)	46
3.6	Principais sistemas de falhamentos da Bacia do Paraná, modificado de Zalan et al. (1987)	47
3.7	Mapa parcial das isópacas sobre a camada I, salientando dois falhamentos, modificado de CRM, (1980)	50
3.8	Mapa de contorno estrutural (parte superior) e modelagem digital das curvas de contorno estrutural da capa da camada inferior "I"	52
3.9	Fotografia da região de estudo mostrando em primeiro plano a Depressão Periférica e no horizonte o Escudo Sulriograndense	54
3.10	Fotografia vista de sul para norte, mostrando a Depressão Periférica e ao fundo a Formação Serra Geral	55
4.1	Representação esquemática, sem escala, do campo de visada, campo de visada instantâneo e da cobertura do 'pixel' da imagem no terreno	59

4.2	Assinaturas espectrais dos principais objetos terrestres, modificada de Steffen et al. (1996)	60
4.3	Imagem georreferenciada da região na banda 3 com realce	64
4.4	Histograma de uma imagem mostrada na figura 4.3, banda 3 com realce	65
4.5	Manipulação linear do histograma de uma imagem. Os contadores digitais (C D) mínimo e máximo da imagem original são “espichados” de 0 a 255. A imagem realçada terá maior variância que a imagem original.	66
4.6	a) Imagem da banda 3 do LANDSAT 5 TM, b) mesma imagem após a aplicação da técnica de realce, c) histograma da imagem do item a e d) histograma da imagem do item b	67
4.7	Mapa da região através do processo classificação não supervisionada	69
4.8	Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo, derivado da imagem de classificação não supervisionada, verificações de campo e operações imagens	70
5.1	Mapa plani-altimétrico da região de estudo, com vista superior e projeção ortogonal	71
5.2	Modelo digital do terreno no formato vetorial observado do sul a 20° de direção com a linha norte-sul (S20°) e com um ângulo de inclinação de 30° com o horizonte	73
5.3	Modelagem digital do terreno no formato de imagem, observada do sul, com vista de 50° com norte-sul (S50°E) e inclinação de 50° com o horizonte	74
5.4	Imagem do relevo através dos níveis de cinza	74
5.5	Mapa de orientação das vertentes na área da concessão mineral. As setas indicam o sentido do fluxo da drenagem	75
6.1	Procedimentos de entrada de dados em um SIG	79
6.2	Formas de apresentação dos dados de saída de um SIG	79
6.3	a) Mapa da rede de drenagem, b) Mapa da distância a partir da rede de drenagem e c) Mapa com imagem booleana que mostra a faixa de preservação da drenagem e a área apta	84
6.4	Mapa das classes de declividades existentes na região da concessão	85
6.5	Mapa que mostra o fator restrição de declividade > 8% e as áreas com declividades menores que 8% (aptas)	85

6.6	a) Mapa dos planos de falhas, modificado de Lopes (1986), b) Mapa de distâncias a partir dos planos de falhas e c) Mapa com imagem booleana de restrição em torno dos falhamentos	86
6.7	Mapa do uso e cobertura do solo reclassificados para atender os critérios de escolha de local para depósitos de rejeitos	87
6.8	Mapa da declividade de 0 a 8% reclassificada pela função Fuzzy, sendo que os valores maiores indicam melhor adequação	88
6.9	Mapa litológico, com atributos reclassificados, das formações ocorrentes na região da concessão (modificado de Lopes, 1986)	89
6.10	a) Imagem de distâncias a partir da “boca da mina” e b) imagem a partir da “boca da mina” reclassificada por uma função fuzzy linear decrescente	90
6.11	Mapa das classes de aptidões do terreno para depósitos de rejeitos	92
6.12	Mapa de localização do sítio para depósito de rejeitos	94
6.13	a) Mapa do uso e cobertura reclassificado em função de superfície de atrito. b) Mapa de custo a partir da Mina Leão II	95
6.14	Traçado rotas de menor custo a partir da mina Leão II para BR290 e para um porto no Rio Jacuí	96
7.1	Locação pontual dos furos de sondagens da camada I	98
7.2	Locação das sondagens associada à magnitude da espessura da camada I	99
7.3	Histograma dos dados da espessura da camada I	101
7.4	Plotagem “Q-Q” dos dados da camada	103
7.5	Diagrama de dispersão (“h-scatterplot”) de uma variável e a mesma variável a 4 posições diferentes, modificado de Isaaks & Srivastava (1989)	107

7.6	Modificada de Issacs & Srivastava op. cit., (a) - Gráfico do teor de minério em um testemunho de sondagem e três formas de representar a continuidade espacial, (b) - Função covariância, (c) - Correlograma e (d) - Variograma	108
7.7	Formato tradicional de um variograma com os principais componentes, segundo Isaaks & Srivastava, op. cit.	109
7.8	Variograma onidirecional	111
7.9	Variograma com direção de 45°, mostrando menor continuidade espacial	111
7.10	Variograma com direção azimutal de 135°, alcance (range) de 2888,27 m, a maior continuidade espacial nas medidas da espessura da camada I	113
7.11	Elipse dos alcances (ranges). Uma forma gráfica de se identificar as direções de maior e menor continuidade espacial da variável em estudo	113
7.12	Formato dos variogramas esféricos, gaussiano e exponencial, modificado de Andriotti (1988)	115
7.13	Interpolação por triangulação	121
7.14	Histograma do erro de estimativa da krigagem ordinária (erro residual). A figura é uma das formas da validação do processo, pois mostra que a média do erro é zero	127
7.15	Validação do modelo através de um “scatterplot” do valor estimado e o valor medido (real). A proximidade dos pontos em torno da reta de 45° valida o processo	126
7.16	Imagem do resultado da krigagem ordinária tipo bloco da camada de carvão I. A escala de cores se refere a espessura da camada. Cada bloco mede 62.500 m ² . Área total de 106.875 .000 m ²	127
7.17	Imagem da variância de estimativa pelo processo de krigagem por blocos para os dados da espessura da camada I	128

Lista de Tabelas

1.1	Principais estatísticas do carvão no Brasil nos anos de 1998 e 1999, segundo César (2000).....	6
1.2	Produção e tipo de carvão proveniente da mina Leão I, conforme DNPM (1996).....	7
1.3	Análise do carvão beneficiado na mina Leão I, segundo DNPM (1996).....	7
2.1	Material básico utilizado na pesquisa.....	9
2.2	Classes de declividades e potencial de erosão, modificada de Barros (1956) e Marques (1971).....	17
2.3	Ponderação dos fatores relativos.....	19
2.4	Classes de uso e cobertura do solo modificados para superfície de atrito.....	22
3.1	Principais unidades estratigráficas na região da concessão Leão.....	38
4.1	Órbita e cobertura do satélite Landsat 5.....	57
4.2	Bandas e resoluções espectrais e espaciais do sensor TM	57
7.1	Tabela parcial dos dados da camada I, preparados para a plotagem “QQ”	102
7.2	Modificada de Johnson & Wichern (1982) - Tabela para teste de normalidade - Método de FILLIBEN.....	104
7.3	Principais parâmetros identificados nos variogramas experimentais. Em destaque (azul) as direções de maior e menor continuidade espacial da camada I.....	112
7.4	Estimativa da tonelagem para espessura mínima e máxima com intervalo intervalo de confiança de 95%.....	131
7.5	Estimativa da tonelagem para espessura mínima e máxima com intervalo intervalo de confiança de 68,26 %.....	131

Lista de Abreviaturas

ASCII	American Standars Code for Information Intercharge
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
BIT	Binary Digit
BMP	Microsoft Windows Bitmapped Image Format
BP	Bacia do Paraná
BYTE	Conjunto de 8 Bits
CC	Carvão Contido na Camada
CT	Camada Total de Carvão
CE	Carvão Energético
CE-5200	Carvão Energético com poder calorífico de 5200 Kcal/Kg
CE-4700	Carvão Energético com poder calorífico de 4700 Kcal/Kg
CE-4200	Carvão Energético com poder calorífico de 4200 Kcal/Kg
CD	Contador Digital
CIF	Cost, Insurance and Freight (Custo, Seguro e Frete)
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
DAT	Gonden Software Data File
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DXF	Drawing Exchange Format
E	Este
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FA	Função Aleatória
Fm	Formação
FOB	Free on Board (Mercadoria Livre a Bordo)
FOV	Field of View
FSI	Free Swelling Index (índice de inchamento)
GRD	Golden Software Grid File
GSLIB	Geoostatistical Software Library
HP	Hewlett Packard

HRIS	High Resolution Interferometer sounder
HVR	High Resolution Visible
IFOV	Instantaneous Field of View
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
LAPROM	Laboratório de Produção Mineral
Ma	Milhões de anos
MCE	Multi Criteria Evaluation
MEC	Massa Equatorial Continental
MDE	Modelo Digital da Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MPA	Massa Polar Atlântica
MTC	Massa Tropical Continental
N	Norte
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
NE	Nordeste
NW	Noroeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
O	Oeste
PI	Plano de Informação
PIXEL	Picture Element
REM	Radiação Eletromagnética
ROM	Run of Mine (Carvão Bruto)
RS	Estado do Rio Grande do Sul
S	Sul
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SPOT	Système Probatoire d' Observation de la Terre
SR	Sensoriamento Remoto
TIFF	Tagged Image Format
TM	Thematic Mapper
UTM	Universal Transversal de Mercator
VA	Variável Aleatória

Lista de Símbolos

a	Alcance
A	Erro médio de estimativa
B	Matriz das coordenadas da imagem
C	Matriz da função variograma dos pontos amostrais entre si
$C(h)$	Função covariância
Co	Efeito pepita
$C1$	Sill – Efeito pepita
CV	Coefficiente de variação
CS	Coefficiente de assimetria
$E\{V\}$	Valor esperado
$E\{A(x_0)\}$	Valor esperado do erro médio de estimativa
\hat{e}	Valor estimado
D	Vetor da função variograma dos pontos amostrais e o ponto estimado
Di	Distância entre o ponto a ser interpolado e os pontos amostrais
f	Função relaciona os pares de coordenadas de carta e imagem
f	Vetor das coordenadas do terreno
m	Média amostral
Md	Mediana
Mo	Moda
MSS	Multispectral Scanner
h	Parâmetro de distância para função variograma
k	Curtose
MI	Momento de Inércia
n, N	Número de dados amostrais
p	Vetor dos coeficientes ou parâmetros
r	Coefficiente de correlação
R	Ponto em que a tangente à origem intercepta a linha do patamar
$p(i)$	Probabilidade da realização
$q(i)$	Variável reduzida

$Q(1)$	Primeiro quartil
$Q(3)$	Terceiro quartil
$x(i)$	Valor do dado amostral
$X(x_i)$	Valor amostral na posição x_i
$X(x_i+h)$	Valor amostral na posição $x_i + h$
X	Coordenada x da carta topográfica
x	Coordenada x da imagem
Y	Coordenada y da carta topográfica
y	Coordenada y da imagem
$\gamma(h)$	Função variograma
ϕ_i	Fluxo incidente
ϕ_r	Fluxo refletido
ϕ_t	Fluxo transmitido
μ	Média da população
σ	Desvio padrão
$\delta(x_0)$	Erro de estimativa
σ^2	Variância
σ_r^2	Variância minimizada do erro
ρ	Reflectância
ρ	Covariância
$\rho(h)$	Função Correlograma
α	Absortância
α	Nível de significância
τ	Transmitância
$v(x_0)$	Valor real
v	Valor do resíduo no geoprocessamento
$v(i)$	Valores dos dados amostrais
$w(i)$	Pesos assinalados aos dados amostrais
W	Vetor dos pesos da ponderação da krigagem
λ	Comprimento de onda
$Z(x)$	Variável regionalizada

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações iniciais

É crescente a tendência de uso de procedimentos matemáticos e computacionais para o tratamento de informações geográficas, quando há um aumento considerável na quantidade e densidade de dados espaciais a serem manuseados, principalmente nas áreas profissionais que dependem de informações georreferenciadas para a execução de suas atividades.

Com a sensibilização dos problemas ecológicos, ambientais e urbanos, aumenta o número de projetos que procuram acompanhar os processos de utilização do espaço físico com alto grau de detalhamento. Desta forma, a elaboração de projetos com uma base de dados e informações consistentes do meio físico torna-se cada vez mais necessária.

Utilizando as ferramentas computacionais, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o geoprocessamento tem como função principal armazenar, recuperar e analisar mapas em computador. Por tal motivo é utilizado como um importante instrumento de apoio, para abordagem na questão gerencial, quando implica na tomada de decisão sobre questões ligadas a utilização adequada do espaço físico.

Produtos do Sensoriamento Remoto, como as imagens digitais de satélite e as fotografias aéreas, capturam importantes informações do contexto espacial envolvente do local foco de estudo. Constituem-se, junto com os dados cartográficos, como as principais fontes para visualização regional. As imagens digitais, tratadas por métodos computacionais em programas especiais, fornecem informações para a elaboração de mapas temáticos como o de uso e cobertura do solo. Feições geológicas

como lineamentos são, da mesma forma, acentuadas através de meios de manipulação de imagens.

A geoestatística vem se desenvolvendo nas últimas décadas e apresenta-se como uma ferramenta confiável para a estimativa de dados na grande maioria dos fenômenos naturais. O seu embasamento matemático garante a confiabilidade do método e sua utilização racional aliada ao entendimento físico do problema possibilitam bons resultados.

Neste trabalho aplicou-se técnicas de sensoriamento remoto, de geoprocessamento e de geoestatística na região da Mina Leão II, situada no município de Minas do Leão, RS.

1.2 - Objetivos

O objetivo específico deste trabalho é identificar e classificar sítios adequados para a deposição dos rejeitos da mineração do carvão, através de geoprocessamento. Para isso, foram aplicadas técnicas de classificação e operação com as imagens de sensores remoto para se obter o mapa de uso e cobertura do solo da região de estudo e mapa de preservação da drenagem. Utilizaram-se os dados de altimetria do terreno para determinar o modelo digital do terreno e o mapa de declividades. E foram processados os dados litológicos, estruturais e o mapa de distâncias a partir da boca da mina.

A integração dos dados processados: mapa de uso e cobertura, drenagem, declividades, litologias, estruturas geológicas e distâncias a partir da boca da mina, se realizou em sistemas de informação geográfica, com ponderação dos fatores e uso de ferramentas de apoio à decisão.

A partir do mapa de uso e cobertura do solo, elaborou-se um mapa de superfície de atrito, para a escolha do traçado de vias de menor custo, a partir da boca da mina em direção a outras duas vias de transporte.

Como objetivo secundário, estabeleceu-se um estudo geostatístico da variável espessura da camada de carvão inferior (I), com informações referentes a 182 furos de sondagem (anexo 1), através de análise de estatística descritiva, análise de continuidade espacial e processos de estimativa e validação, com a finalidade de cubagem do carvão “in situ” da referida camada na área da concessão mineral da mina Leão II. O conhecimento da tonelagem da jazida é fator importante para a definição da extensão da área para colocação dos rejeitos.

1.3 - A área de estudo

1.3.1 - Localização

A área de estudo está centrada na região da Mina Leão II, situada a norte do município de Minas do Leão, RS, que dista 92 quilômetros de Porto Alegre, conforme figura 1.1. Esta figura também permite observar e localizar a extensão da jazida carbonífera Leão-Butiá, a área estudada através de imagens e a área da concessão mineral Leão II. A área geográfica em consideração é conhecida como “região carbonífera do Estado do Rio Grande do Sul” e tem como cidades principais: Butiá, Minas do Leão, Arroio dos Ratos e São Jerônimo. As imagens estudadas encontram-se limitadas por um polígono retangular cujos vértices estão definidos pelas seguintes coordenadas: $-29^{\circ} 54' 22''$ a $-30^{\circ} 12' 43''$ de latitude e $-52^{\circ} 11' 46''$ a $-51^{\circ} 52' 49''$ de longitude, ou na forma de coordenadas UTM: 384.918 a 415.007 E e 6.657.106 a 6.691.278 N. A área da concessão de lavra de carvão da Mina Leão II é uma poligonal irregular com 20 lados. Foram considerados os limites extremos desta poligonal e tratada como se fosse de formato retangular com as coordenadas: $-30^{\circ} 07' 48''$ a $-30^{\circ} 06' 08''$ de latitude e $-52^{\circ} 03' 15''$ a $-52^{\circ} 02' 52''$ de longitude.

1.3.2 - Uso do Solo

Segundo IBGE (1986), a área em consideração se enquadra dentro da microrregião Vale do Jacuí. Face à interação dos fatores clima-relevo-solo, apresenta 78,1% das terras com uso preferencial para as lavouras temporárias, enquanto que o uso atual ocupa apenas 16,5%. Estas representam 69,6% do valor total da produção

agrária, sobressaindo por ordem de valor, a soja, o arroz (irrigado), o milho e o trigo. A utilização de parcela maior de seu espaço atual para pecuária em pastagens naturais (46,4%) caracteriza subuso acentuado. A silvicultura também se destaca nesta região, sendo que as espécies florestais predominantes são: eucalipto (58,1%) e acácia negra (39,4%).

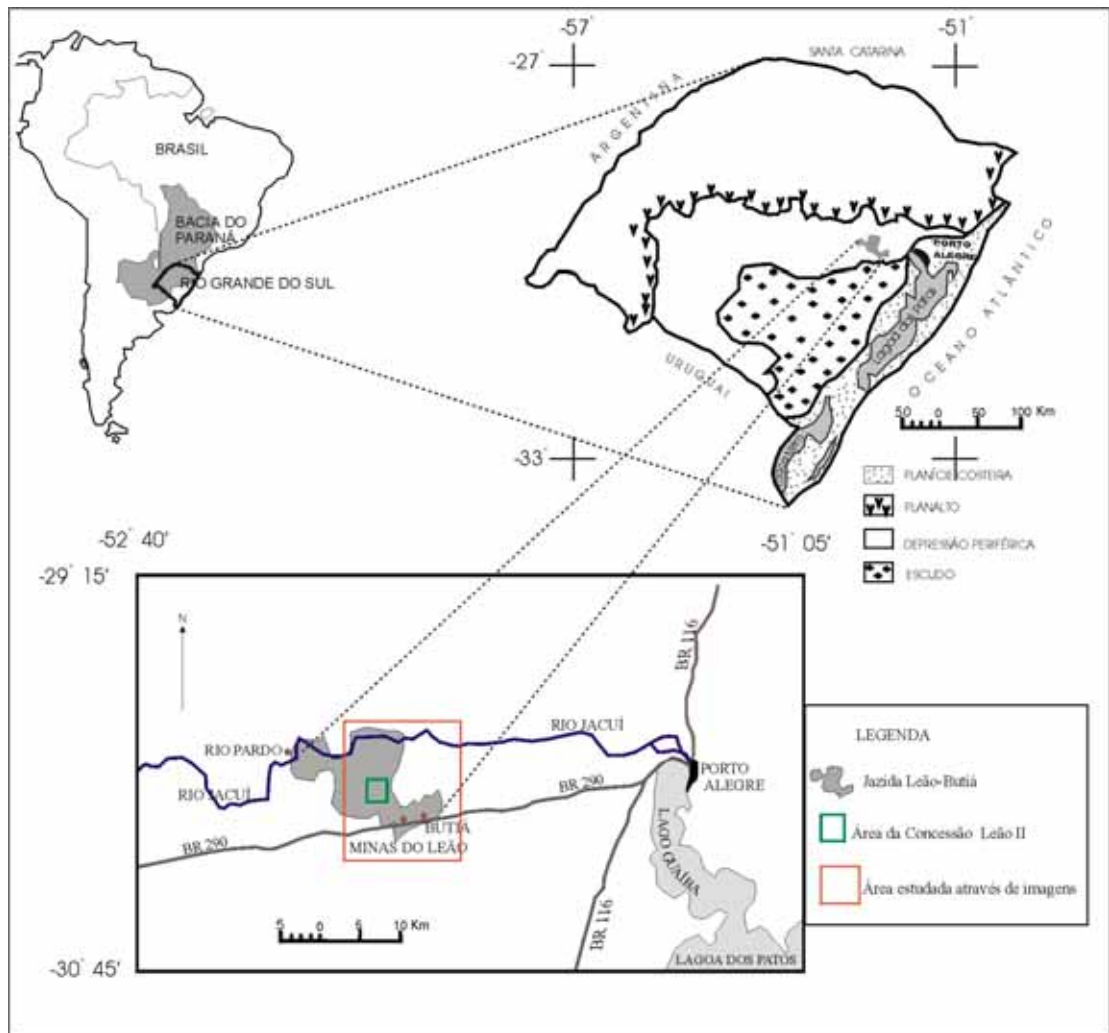


FIGURA 1.1 - Localização da área de estudo.

1.3.3 - Clima regional

A localização e as características climáticas regionais da Depressão Central enquadram-na entre os climas subtropicais úmidos, e segundo a classificação

correntemente usada, de Köpen, na categoria dos Mesotérmicos Brando Superúmidos, segundo Nimer (1990).

A temperatura média anual situa-se no intervalo de 18 a 20° C. Os verões são muito quentes, tendo o mês de janeiro uma média entre 24 e 26° C. Os invernos são amenos com temperatura média entre e 13 e 15° C. As temperaturas extremas absolutas são -4° e 40° C, conclui o mesmo autor.

As massas de ar que afetam a Depressão Central são Massa Tropical Atlântica (MTA), a Massa Equatorial Continental (MEC), a Massa Polar Atlântica (MPA) e a Massa Tropical Continental (MTC). É no verão, entretanto, que se dá o encontro da MTC com a MTA, provocando fortes chuvas. Nesta ocasião, a MPA fica estacionária nas águas subantárticas do Atlântico e, somente no fim dessa estação, sobe ao longo do Paraguai e Uruguai e do bordo atlântico do Planalto; a MPA, a MTC ou a MEC provocam chuvas frontais com maior frequência no fim do outono (Gusmão et al., 1990).

1.4 - Importância econômica do carvão

O consumo total do carvão no Brasil , em 1999, foi de 16,2 milhões de toneladas, sendo que deste total, 65% corresponde a carvão metalúrgico importado, destinado à siderurgia e 30% refere-se ao consumo de carvão energético para uso em usinas termoelétricas e o restante para uso industrial. Quanto ao consumo de carvão energético nacional , tem-se uma distribuição por setor de consumo de 85% para a termoeletrecidade, 6% para indústria petroquímica, 4% para indústria de papel e celulose e o restante para as indústrias cimenteira, alimentícia e cerâmica. A produção nacional de carvão tipo energético, em 1999, teve um acréscimo de 13% em relação ao ano anterior , devido principalmente a estiagem do últimos meses do ano, que ocorreu na região sul do Brasil, o que provocou a redução nos reservatórios das usinas hidrelétricas, e a conseqüente demanda por carvão. Em vista disso, empresas como a CRM (Companhia Riograndense de Mineração) tiveram que aumentar a produção 32 % em relação ao ano de 98. Em Santa Catarina, a Carbonífera Metropolitana aumentou

em 40% a sua produção para abastecer o complexo termoeletrico Jorge Lacerda (César, 2000).

A tabela 1.1 mostra as principais estatísticas econômicas do carvão no Brasil no biênio 98/99.

TABELA 1.1 - Principais estatísticas do carvão no Brasil nos anos de 1998 e 1999, segundo César (2000).

DISCRIMINAÇÃO		1998	1999
Produção	Energético (10 ³ t)	5.485	5.618
	Metalúrgico p/fundição (10 ³ t)	86	102
Importação	(10 ³ t)	10.697	13.430
	(10 ³ US\$-CIF)	608.827	529.108
Exportação	(10 ³ t)	65	242
	(10 ³ US\$-FOB)	29	100
Consumo	Metalúrgico para siderurgia (10 ³ t)	11.000	10.600
	Metalúrgico para fundição (10 ³ t)	86	102
	Energético (10 ³ t)	5.525	5.645
Preço Médio	Carvão importado (US\$/t)	52.50	39.40

Com relação as importações, o Brasil importou 25% a mais em quantidade e reduziu o valor em 16% em relação ao ano de 98. Cita ainda o autor, que em março de 2000 foi criado o Programa Nacional de Incentivo ao Uso do Carvão Mineral para Fins Energéticos através de decreto presidencial. Uma comissão interministerial foi encarregada de estudar os meios necessários para viabilizar a construção de termoeletricas a carvão mineral.

Embora a mina Leão II não tenha entrado em atividade, podemos ter referência aproximada das características do seu carvão, observando dados da mina subterrânea Leão I, (Tabelas 1.2 e 1.3), cuja proprietária é também a CRM, Companhia Riograndense de Mineração, empresa estatal gaúcha. Nesta duas minas a jazida

carbonífera é a mesma. O que as diferencia é a profundidade das camadas carboníferas, que na Leão II é mais profunda, e também as obras mineiras nesta são dimensionadas para uma maior produtividade

TABELA 1.2 - Produção e tipo de carvão beneficiado proveniente da mina Leão I, conforme DNPM (1996).

TIPOS	Tonelagem
CE -3100	282.52
CE-4200	13.533.03
CE-4700	21.685.03
CE-5200	336.13
TOTAL	
BENEFICIADO	35.836.76
RECUPERAÇÃO	41,09%

O carvão extraído da Leão I após ser britado é beneficiado no lavador Eurico Rômulo Machado, que tem capacidade para 150t/ROM/hora. A produção ROM da Mina Leão I, no ano de 1995 foi de 86.931,40 t.

TABELA 1.3 - Análise do carvão beneficiado na mina Leão I, segundo DNPM (1996).

COMPONENTE	ROM	CE-4200	CE-4700	CE5200
CINZAS %	53,3	39,2	34,1	29,3
VOLÁTEIS %	18,7	29,2	31,1	30,9
CARBONO %	23,0	31,6	34,8	39,8
ENXOFRE %	0,9	0,7	0,65	0,57
FSI %	0	0	0	0
K cal/Kg %	2.800	4.250	4750	5.305

2 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo pode ser dividida em três diferentes etapas fundamentais: aquisição e preparo dos dados básicos, processamento e refinamento dos dados básicos, e tratamento geoestatístico das medidas da espessura da camada de carvão inferior “I”.

2.1 - Aquisição dos dados básicos

Esta etapa iniciou-se logo após a escolha do tema e do local, com a revisão bibliográfica do arcabouço geológico existente sobre a região de estudo. Esta revisão foi ampliada incluindo informações sobre sensoriamento remoto, geoprocessamento e geoestatística, principalmente com o objetivos de aplicar técnicas destas áreas do conhecimento na região pesquisada.

As informações de caráter geológico foram obtidas de várias fontes: Schneider et al. (1974), Zalan et al. (1987 e 1990), Milani et al. (1994), Holz (1997), Lopes (1990) e relatório interno da CRM (1980). O mapa geológico foi elaborado originalmente por Lopes (1986), e incluído no projeto Borda Leste da Bacia do Paraná. Os trabalhos de campo foram realizados para verificações geomorfológicas e para averiguação e amostragem das classes da classificação digital não supervisionada.

A relação dos dados básicos utilizados neste trabalho estão expostos na tabela 2.1.

A base cartográfica plani-altimétrica foi elaborada a partir de uma carta topográfico da CRM (1978) - Companhia Riograndense do Carvão, com curvas de nível de 2 em 2 metros, na escala de 1/10.000. Esta carta cobre a área da poligonal envolvente da concessão da mineração, que é aproximadamente retangular, mas principalmente nos

bordos do retângulo não existe informação topográfica, o que dificultou o processo de interpolação. As atividades desenvolvidas que usaram informações de altitude do terreno, como modelagem digital do terreno e declividades ficaram restritas aos limites desta carta.

As imagens orbitais digitais da região são da plataforma LANDSAT 5, sensor TM, nas bandas 3, 4 e 5. O período de aquisição foi na data de 15 de outubro de 1997. Estas imagens foram cedidas pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM.

TABELA 2.1 - Material básico utilizado na pesquisa.

DADOS	TIPO	DATA	FONTE
Mapa geológico e perfil	Escala 1/100.000	1986	Lopes (1986)
Carta Topográfica	Escala 1/50.000 (SH.22-Y-B-1-2) Plani-altimétrica	1976	ME - DSG
Carta topográfica	Escala 1/10.000	1978	CRM
Imagens Landsat TM5	Bandas 3, 4 e 5 Órbita 237, ponto 81	1997	FEPAM
Aerofotos	Escala 1/25.000	1977	CPRM
Sondagens	Planilha	1978	CRM
Relatório Geológico	Textos	1980	CRM
Mapas sobre a Camada Inferior (I)	Contorno estrutural da lapa, capa e isópacas. Escala 1/60.000	1980	CRM

As fotografias aéreas utilizadas são de um levantamento executado pela empresa Cruzeiro do Sul, no ano de 1977, e foram cedidas pela Companhia de Pesquisa e Recurso Minerais - CPRM. Por possuírem uma escala mais apropriada que as imagens orbitais, as fotos aéreas foram úteis no traçado da drenagem, assim como para a compreensão do relevo e permitirem a visão estereoscópica do local.

A CRM cedeu dados, na forma de planilha, sobre 182 furos de sondagem,

informando a espessura da camada de carvão denominada camada inferior “I” com a posição absoluta dos furos por coordenadas do sistema UTM, (anexo 1). A mesma empresa também disponibilizou na forma de mapas, as informações sobre o contorno estrutural da capa e da lapa da camada “I” e das isópacas da mesma camada.

2.2 - Processamento e refinamento dos dados

Todos os mapas analógicos foram transformados para dados digitais, pelo uso do scanner Scan Jet 4c da HP com resolução de 9600 dpi, do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da UFRGS. O resultado foi a geração de vários arquivos **bitmap** (imagem) que foram armazenados em disco.

O modelo digital do terreno (MDT) na região de estudo foi elaborado a partir de uma carta topográfica, já referida anteriormente, restrita à área da concessão, com equidistância vertical de 2 metros e na escala 1/10.000. Esta carta foi escaneada por setores e a imagem arquivada em disquetes. As curvas de nível da imagem foram vetorizadas no software AutoCad e arquivadas no formato **.dxf**. Através de um software específico os arquivos **.dxf** foram transformados em arquivos **.dat**, resultando um arquivo com informações de coordenadas X, Y e Z (coordenadas E, N e altitudes). A geração final do MDT foi efetivada pelos softwares Idrisi e Surfer.

Os dados analógicos que continham isocurvas como o topográfico, o de isópacas e os de contornos estruturais foram processados no software Autocad. Inicialmente cada imagem escaneada foi alinhada, através de georreferenciamento. Cada isocurva foi vetorizada na forma de polilinha, e o seu atributo foi armazenado. Terminado o processo, os dados foram gravados em arquivos tipo **ASCII**, no formato **.dxf**. Um software especial transformou os arquivos **.dxf**, os quais contêm muitas informações, em arquivos formato **.dat** contendo somente as informações necessárias, quais sejam: coluna 1, coluna 2 e coluna 3, respectivamente as coordenada UTM, E, N e o correspondente atributo que pode ser, altitude, isópaca, etc.

Estes dados tabelados foram utilizados na interpolação, processo a partir do qual são calculados novos atributos espaciais em função dos dados espaciais já

existentes. Para isso elaborou-se uma grade (“grid”) onde em cada cruzamento ou nó foi interpolado um novo atributo. Usou-se o interpolador por Krigagem e o processo detalhado encontra-se junto ao capítulo de cubagem da camada inferior I.

Com os dados interpolados gerou-se um Modelo Digital do Terreno (MDT) que é a forma digital de representar o relevo do terreno, o qual poderá ser visualizado em três dimensões a partir de diferentes direções de visualização e de diferentes ângulos de inclinação. O MDT permite que se obtenham duas ferramentas importantes utilizadas nesta pesquisa que são o mapa de declividades do terreno e o mapa de vertentes (direções de maior declividades das encostas).

Os dados das isópacas da camada inferior I, ao gerarem um novo mapa digital, permitem, pela comparação com o mapa topográfico digital de superfície, tendo-se o conhecimento da superfícies abrangidas, que se calcule o volume do material de cobertura sobre a camada de carvão em estudo. Os dados sobre o contorno estrutural da lapa e da capa da camada I são utilizados principalmente para a identificação das feições estruturais.

As imagens orbitais Landsat 5 TM das 3 bandas utilizadas sofreram um pré-processamento digital, no qual foram corrigidos os erros geométricos existentes nas mesmas. Neste processo conhecido como “georreferenciamento”, inicialmente, escolheu-se 10 pontos de controle na carta topográfica, escala 1/50.000, onde se coleta as coordenadas de carta (X , Y), e 10 pontos homólogos na imagem onde são coletados as coordenadas da imagem (x , y). Por experiência, afirma-se que os pontos ideais para controle são pontos que marcam cruzamentos de rodovias, preferencialmente se forem ortogonais entre si.

O passo seguinte foi encontrar uma função que relacione os pares de coordenadas da carta e imagem.

$$X = f(x,y) \tag{2:1}$$

$$Y = f(x,y) \tag{2:2}$$

Para estas equações, usou-se na ocasião um polinômio do primeiro grau. Se tivermos n pontos de controle teremos $2n$ equações. A demonstração realizada a seguir é para 3 pontos de controle.

$$X1 = ax1 + by1 + Cx$$

$$Y1 = cx1 + dy1 + Cy$$

$$X2 = ax2 + by2 + Cx$$

$$Y2 = ax2 + by2 + Cy$$

$$X3 = ax3 + by3 + Cx$$

$$Y3 = ax3 + by3 + Cy$$

O sistema não terá solução única para todas as equações. Não se conhece onde estão os erros ou quais são os erros. Então estabelece-se o método dos mínimos quadrados, onde o somatório dos resíduos ao quadrado ($v1^2 + v2^2 + \dots + v6^2$) é mínimo.

$$V1 = X1 - ax1 + by1 + Cx$$

$$V2 = Y1 - cx1 + dy1 + Cy$$

$$V3 = X2 - ax2 + by2 + Cx$$

$$V4 = Y2 - cx2 + dy2 + Cy$$

$$V5 = X3 - ax3 + by3 + Cx$$

$$V6 = Y3 - bx3 + cy3 + Cy$$

Este sistema de equações pode ser representado na forma de matrizes:

$$\begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \\ v6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \\ X2 \\ Y2 \\ X3 \\ Y3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x1 & y1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x1 & y1 & 0 & 1 \\ x2 & y2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x2 & y2 & 0 & 1 \\ x3 & y3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x3 & y3 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ Cx \\ Cy \end{bmatrix}$$

Resumidamente:

$$v = f - B * p \quad (2:3)$$

onde v é o vetor dos resíduos, f é o vetor das coordenadas do terreno, B é a matriz das coordenadas da imagem e p é o vetor dos coeficientes ou parâmetros. Pelo desenvolvimento da equação chega-se a:

$$v = f^T * f - 2f^T * B * p + p^T (B^T * B) p \quad (2:4)$$

O expoente T representa transposição de matriz. Sabendo-se que uma função será mínima quando suas derivadas parciais forem nulas, e como somente o vetor p não é constante, derivamos v em relação a p e igualamos a zero.

$$\delta v / \delta p = -2f^T * B + 2 p^T (B^T * B) = 0$$

$$2 f^T * B = p^T (B^T * B)$$

$$p = (B^T * B)^{-1} * B^T * f \quad (2:5)$$

Os valores de p foram calculados pela fórmula acima, os quais minimizarão os resíduos. A próxima etapa foi verificar a confiabilidade do modelo pela análise dos resíduos. O erro médio quadrático final obtido em nosso trabalho foi de 14,86 metros, que é aceitável, uma vez que é menor que o tamanho do pixel (30 m).

No georreferenciamento os dados são registrados em um sistema de grid orientado segundo o norte da quadrícula e diferente daquele em que a imagem é inicialmente configurada. O processo usa equações polinomiais para estabelecer a transformação, como se um dos grids fosse colocado rotacionado sobre o outro.

O novo grid é então preenchido com os valores dos dados pela reamostragem do velho grid e estimativas, se necessário, dos novos valores. Para se realizar a reamostragem, optou-se pelo método do vizinho mais próximo, no qual o valor do pixel no novo grid é o mesmo daquele da célula que lhe é mais próxima no velho grid, (figura 2.1).

Outra técnica aplicada às imagens foi o processo de realce do contraste, que tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens, sob os critérios subjetivos do olho humano. Nesta etapa utilizou-se um aumento linear do contraste das imagens digitais.

Para a classificação digital foi utilizada a imagem resultante de uma foto composição colorida falsa cor, com as bandas 3, 4 e 5 da data de outubro de 1997. Preliminarmente escolheu-se 8 clusters espectrais através de uma classificação não supervisionada. Reconheceu-se estas oito classe como sendo: campos 1 e 2, mata nativa e plantada, solo exposto, solo exposto úmido, cultura agrícola, represa (barragens) e corpos de água com sedimento .

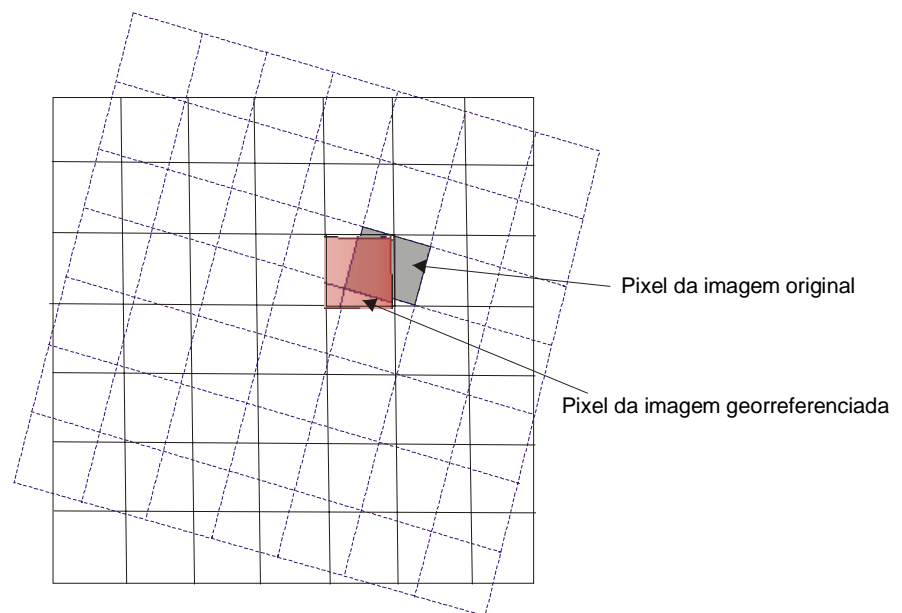


FIGURA 2.1 - Técnica de reamostragem pelo vizinho mais próximo, onde os pixels em destaque terão o mesmo atributo, ou seja, mesmo contador digital (modificada de Crosta, 1993).

Posteriormente, com a contribuição do reconhecimento de campo e as análises do contexto, foram introduzidas técnicas modificação de atributos e operações com a imagens, para alterar-se a imagem original. Gerou-se então uma nova imagem, a qual foi usada como mapa de uso e cobertura do solo. Esta imagem tem as seguintes classes: campos, mata nativa, floresta plantada, solo arado/exposto, corpos de água, rejeito de carvão/solo exposto e sítio urbano.

Para as atividades de geoprocessamento, inicialmente foi necessário organizar a estrutura do projeto em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A qual é feita pelo agrupamento de dados e informações não espaciais de uma área de estudo, referenciada geograficamente, com escala definida de acordo com o objetivo do trabalho.

O projeto é composto por planos de informações (PI's), ou layers (camadas), que referem-se a uma mesma grandeza e que contém elementos geográficos, que são instâncias desta mesma grandeza. Assim, litologias, altimetria, uso do solo, drenagem, rede viária são exemplos de planos de informações.

O ponto fundamental de um SIG é a possibilidade de criar **cruzamentos**, através de regras estabelecidas pelos usuários, entre os PI's, gerando **mapas derivativos**, denominados de **mapas de oportunidades ou de restrições**.

Então, preliminarmente foram estabelecidos nossos objetivos: 1°) identificar e classificar locais adequados para depósitos de rejeitos de carvão e 2°) localizar o traçado de vias de menor custo a partir da mineração. Estas atividades propostas, não necessariamente, representam necessidades reais para a mineração. O fundamental propósito, na elaboração deste estudo, é desenvolver e demonstrar a metodologia de geoprocessamento para se obter os objetivos. A área da primeira atividade coincide com área da concessão mineral Leão II.

Para alcançar o primeiro objetivo, inicialmente elaborou-se um conjunto de critérios. Desta forma, os locais mais adequados para depositar os rejeitos de carvão, devem contemplar os seguintes aspectos:

- ✓ Não ocupar locais de preservação permanente (rede de drenagem),
- ✓ Não ocupar local urbanizado,
- ✓ Ter compatibilidade com o uso e cobertura atual do solo,
- ✓ Ser compatível com o limite de declividade ($\leq 8\%$),
- ✓ Ter uma relação adequada de proximidade com “boca da mina” e
- ✓ Ter características litológicas e estruturais favoráveis.

Os critérios acima mencionados atendem os interesses dos empreendedores (administradores da empresa). Da mesma forma serão contemplados fatores técnicos e itens que premiam a conservação do meio ambiente.

Diversos problemas ambientais são associados à deposição inadequada de rejeitos de carvão, destacando-se: escorregamentos, ravinamentos, acidificação das águas superficiais e subterrânea (Schubert, 1979 apud Binotto, 1997).

O próximo passo foi transformar os dados disponíveis para atender os critérios citados. Em geoprocessamento, quando um dado digital é transformado para atender um critério, ele é denominado de **FATOR** (Eastman, 1998). Um fator pode ser absoluto ou relativo. **Fatores absolutos** são considerados verdadeiras barreiras ou restrições, pois rigorosamente têm que ser atendidos. Normalmente as imagens de restrições são obtidas por lógica booleana, de forma que a resultante é uma imagem que contém dois atributos, 0 e 1. No caso, o zero indica restrição e o um indica aptidão. Já os **Fatores Relativos** são fatores que realçam ou amenizam a aptidão relativa de uma alternativa específica para o propósito em consideração. Os fatores elaborados para atender o primeiro objetivo são os seguintes:

- ◆ *Fator absoluto preservação da drenagem* (RESTRICÇÃO) – a faixa de 200 metros envolvente da drenagem, Fepam (1992), visa, obviamente preservar a drenagem, impedindo o decapamento do solo e o desmatamento, se dentro desta faixa também houver mata. Principalmente tende a evitar a erosão das margens e o conseqüente assoreamento do canal. Machado (1985) afirma que os trabalhos de extração e beneficiamento de carvão, na região sul do país, provocaram em certas áreas grandes prejuízos decorrentes da contaminação das águas superficiais através de rejeitos deixados pelas mencionadas atividades. Para obter tal fator, primeiramente foi vetorizada toda a drenagem. A seguir transformou-se os vetores da drenagem em imagem (rasterização). Nesta imagem aplicou-se o comando DISTANCE, que calcula uma nova imagem, na qual o valor armazenado em cada pixel (atributo) é a menor distância euclidiana entre o pixel e a feição mais próxima, que no caso é a drenagem. Para concluir, a imagem de distâncias foi reclassificada para os atributos 0 (distância até 100 metros) e 1 (distância > 100 metros).

- ♦ *Fator absoluto declividade maior que 8%* (RESTRICÇÃO) – o mapa de declividades do terreno associado a outras informações, é uma ferramenta muito importante para análises sobre estabilidade do mesmo. Tanto a capacidade do uso da terra (Garcia e Piedade, 1978), quanto a avaliação do potencial erosivo, dependem estreitamente do clima e do fator declividade. Barros (1956), Marques (1971) apud Dani et al. (1996) definiram valores de intervalos de declividade, que são consagrados para as condições de clima e de solo do Brasil. (Tabela 2.2).

TABELA 2.2 - Classes de declividades e potencial de erosão, modificada de Barros (1956) e Marques (1971).

Classes de Declividade	-	Erosão
< 3% (< 1° 21')		Pouca Erosão
3 – 8% (1° 21' a 3° 36')		Erosão Moderada
8 – 12% (3° 36' a 5° 24')		Erosão Severa
> 12% (> 5° 24')		Erosão Forte

Inicialmente gerou-se um arquivo GRD no software Surfer a partir das informações topográficas (coordenadas E, N e altitude). Este arquivo foi importado para o software Idrisi e gerou-se uma imagem do modelo digital do terreno (MDT). Executou-se o comando SURFACE criando-se a imagem das classes de declividades. Reclassificou-se a imagem de declividades em uma imagem booleana, de modo que o atributo zero se refere a zonas com declividades maiores que 8% e o atributo um refere-se a zonas com declividade de zero até 8%.

- ♦ *Fator absoluto zonas de planos de falhas* (RESTRICÇÃO) - Moore & Waltz (1983) afirmam que as falhas e juntas comumente fornecem indícios de ocorrências de água subterrânea, minerais e petróleo, sendo suas localizações, padrões e densidades importantes para vários estudos, inclusive a suscetibilidade à poluição. Os falhamentos foram extraídos do mapa geológico através de linhas vetoriais, as quais devem ser transformados em imagens através do processo de rasterização. Com a imagem dos falhamentos aplicou-se o comando DISTANCE criando uma

imagem de distâncias a partir das falhas. A imagem foi reclassificada criando uma faixa tampão de 50 metros em torno dos planos de falhas.

- ◆ Fator relativo uso e cobertura do solo - As sete classes da imagem de uso e cobertura do solo apresentam diferentes aptidões para serem portadoras do material do rejeito. Usando o conhecimento empírico, lógico e até mesmo técnico, reescalou-se os atributos das classes existentes entre o intervalo de 0 a 255 de acordo com suas aptidões relativas. Neste sentido, reclassificou-se a imagem alterando-se os atributo da seguinte forma: **campos: 255; mata nativa: 30; solo exposto/arado: 150; corpos de água: 0 ; rejeito/solo exposto: 180; zona urbana: 0 e floresta plantada: 60.**

- ◆ Fator relativo declividade de 0 a 8% - A faixa de declividade do terreno que vai de 0 a 8% é considerada adequada para receber os rejeitos. Mas deseja-se fazer um gradiente entre um limite e outro. Neste sentido foi feito um reescalonamento usando o módulo de apoio à decisão do Idrisi pela função FUZZY, através de uma função sigmoidal decrescente, sendo para a declividade 0% atribuído um valor de 255 e para a declividade de 8% um valor 1. Entre estes valores extremos foi criado um gradiente sigmoidal decrescente.

- ◆ Fator relativo substrato litológico - As litologias superficiais que ocorrem na área de estudo são: aluviões, Formação Rosário, Formação Rio do Rastro e Formações Estrada Nova e Irati (indivisas) segundo Lopes (1986). O mapa litológico digital será reclassificado. Para as formação Irati e Estrada Nova atribuiu-se um valor de 255. A razão deste valor elevado, deve-se ao fato que estas formações são constituídas predominantemente de sedimentos finos, e portanto mais impermeáveis. Foi atribuído o valor 200 para a Fm Rio do Rastro (pela ocorrência de pelitos de origem lagunar), 75 para a Formação Rosário (a base da formação tem dunas eólicas) e 10 para os aluviões.

- ◆ Fator relativo distância a partir da “boca da mina” (proximidade) – Criou-se uma imagem de distância a partir das coordenadas do ponto boca da mina. Verificou-se as distâncias máxima e mínima. Aplicou-se na imagem de distâncias a função

FUZZY por uma função linear decrescente. Sendo para distância mínima (0,1 m) atribuído o valor de 255 e para a distância máxima (8014,1 m) o valor 0.

Uma vez estruturados as imagens dos fatores foi necessário desenvolver uma regra de decisão para contemplar o objetivo proposto. Uma regra de decisão é um procedimento para combinar os critérios que serão utilizados para definir o grau de adequabilidade de cada pixel da imagem resultante (Hasenack et al., 1998). Com o auxílio de métodos estatísticos é possível atribuir pesos aos fatores envolvidos de modo a ponderar a participação de cada variável na análise desejada (Eastman et al., 1993). Nesse contexto, o geoprocessamento constitui-se num instrumento útil para diminuir a subjetividade no processo de decisão (Hasenack, 1995).

O próximo passo foi definir a importância relativa de cada um dos fatores em relação aos outros. Elegeu-se o fator declividade como fator mais importante; aos fatores uso e cobertura do solo e substrato litológico creditou-se a metade do peso da declividade e ao fator distância a partir da boca da mina (proximidade) um sexto do valor da declividade.

Para gerar um conjunto de pesos a aplicar aos fatores, utiliza-se a técnica de comparação pareada, disponível no Idrisi pelo comando WEIGT. Nesta técnica cada fator é combinado com os demais através de uma matriz de comparação pareada (Hasenack et al., 1998), como mostra a tabela 2.3. Indica-se qual o fator mais importante e quanto este fator (coluna da esquerda) é mais importante que cada um dos fatores (linha superior) ao qual está sendo comparado. Quando a matriz é elaborada, é possível calcular os pesos de cada fator resultante da comparação pareada, bem como efetuar uma avaliação de consistência da mesma.

TABELA 2.3 - Ponderação dos fatores relativos.

	Decliv. 0 a 8%	Uso e Cobertura	Litologia	Proximidade
Decliv. 0 a 8%	1			
Uso e Cobertura	1/2	1		
Litologia	1/2	1	1	
Proximidade	1/6	1/3	1/3	1

Na tabela 2.3, por exemplo, verifica-se que as imagens de uso e cobertura e litologia têm a metade do peso da declividade e que o peso da imagem da proximidade da boca da mina é um sexto do peso da declividade. O comando WEIGHT do Idrisi determinou a seguinte ponderação:

Fator Relativo	Peso
Declividade de 0 a 8 %	= 0,4706
Uso e cobertura	= 0,2353
Litologia	= 0,2353
Proximidade	= 0,0588
Consistência da ponderação = 0 (aceitável)	

Para determinar as áreas favoráveis para depósito de rejeitos utilizou-se a ferramenta MCE (Multi Criteria Evaluation), figura 2.2, de suporte à decisão do Idrisi. Esta ferramenta, trabalha com os fatores relativos, através de uma combinação linear ponderada, de forma que cada fator relativo é multiplicado pelo seu peso correspondente e somados entre si (overlay).

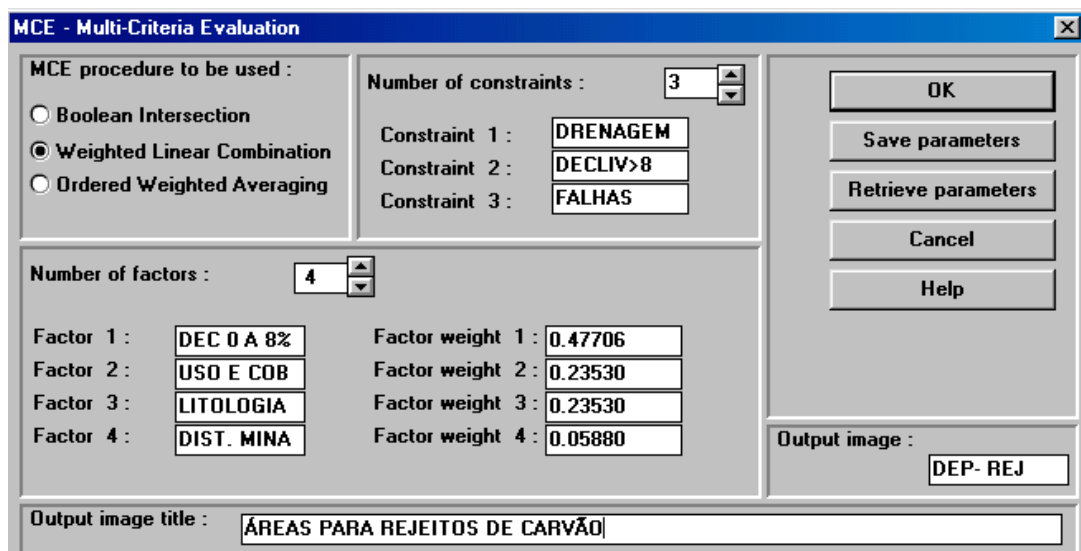


FIGURA 2.2 - Avaliação por critérios múltiplos através de uma combinação linear ponderada no software Idrisi.

A imagem resultante da soma (união) dos fatores relativos sofre uma operação de interseção (multiplicação) com as imagens das restrições, gerando uma imagem final, que é uma composição de acordo com nossos critérios e que contempla os objetivos propostos. Com a finalidade de aprimorar a qualidade visual da imagem resultante, aplicou-se o comando STRETCH, na opção de equalização com cinco classes.

Ao encaminhar a resolução do segundo objetivo, que é a escolha de vias de menor custo a partir da mineração, como no objetivo primeiro, trabalhou-se hipoteticamente. Tentando tornar a situação mais próxima da realidade, foram estudadas duas propostas:

- 1) determinar o traçado de menor custo a partir da mineração até a BR 290 e,
- 2) determinar o traçado de menor custo a partir da mineração até um porto existente no Rio Jacuí. (a carta topográfica do exército folha SH 22 H IV-4 identifica um porto de pequeno porte nas coordenadas: E=386.490 e N= 6.682.350, (figura 2.3)).

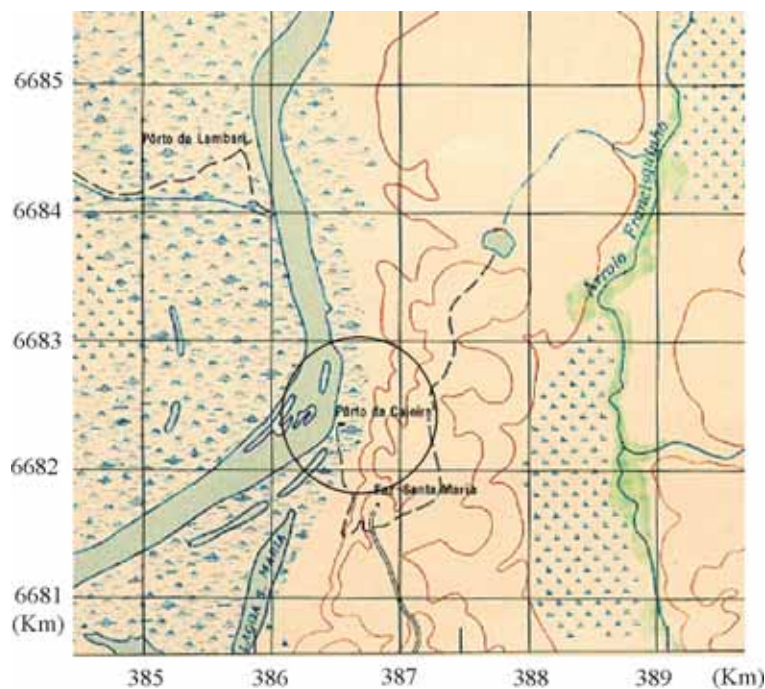


FIGURA 2.3 - Identificação do porto na carta do exército SH 22 H IV-4.

O fundamento do desenvolvimento deste estudo é baseado no mapa de uso e cobertura do solo. Esta análise requer dois planos de informações. Um plano contém as feições a partir das quais as distâncias serão calculadas (imagem pontual da boca da

mina). O outro plano descreve uma superfície de atrito (imagem criada a partir do mapa de uso e cobertura do solo). Primeiramente cria-se a imagem de superfície de atrito a partir da imagem de uso e cobertura do solo.

Gera-se a imagem que representa uma superfície de atrito e que defina os custos associados ao deslocamento através de diferentes tipos de uso e cobertura do solo existentes na área. Para este propósito, supõem-se que exista um custo básico para construir uma via atravessando terrenos cobertos por campos. Portanto, a classe campos foi adotada como nosso referencial. Dado esse custo básico, a tabela 2.4 mostra os outros custos relativos de construção da via de transporte.

TABELA 2.4 - Uso e cobertura do solo modificada como superfície de atrito.

Uso e Cobertura	Atrito	Descrição
Campos	1	Custo básico
Mata nativa	300	Proteção ambiental, assoreamento
Solo arado/exposto	100	Culturas agrícolas
Corpos de água	700	Difícil construção
Rej. de carv/solo exposto.	1	Custo básico
Urbano	800	Barreira. Evitar a cidade.
Floresta plantada	200	Importância comercial

Valores altos de atrito representam barreiras, mas a via não está proibida a passar por estes locais, apenas haverá uma tendência de evitar estas regiões, porque seu “custo” é elevado. Definidos os valores de atrito conforme a tabela 2.3, passou-se para a reclassificação da imagem de uso e cobertura do solo através do comando RECLASS do Idrisi. Atribuiu-se os novos valores de atrito para as sete classes existentes. O segundo plano é a imagem de um círculo que identifica a área da mineração e mostra o local e a feição a partir da qual as distâncias de custo serão calculadas.

Executou-se o comando COST do Idrisi para gerar a imagem da superfície de atrito. E para estabelecer os caminhos de menor custo desde a mineração até a

BR290 e até o porto usou-se o comando PATHWAY. Preliminarmente transformou-se os vetores que representam a BR e o porto em imagens.

2.3 - Tratamento geoestatístico das medidas de espessura da camada inferior “I”

O tratamento geoestatístico a ser abordado neste trabalho visa a cubagem do carvão “in situ” da camada inferior I. Envolve quatro etapas diferentes: análise estatística básica, análise da continuidade espacial, estimativa e validação da estimativa. Face ao espaçamento da amostragem dos furos de sondagens ser praticamente regular, optou-se pela não aplicação de técnicas de declusterização dos dados.

A etapa de análise estatística básica se caracteriza pelo estudo da estatística descritiva dos dados. Nela determina-se os parâmetros estatísticos básicos, como: média, mediana, quartis, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Por meio de histograma se identifica a presença de valores erráticos, se há mais de uma população e também qual o tipo de distribuição de frequência.

Faz-se necessário estabelecer nessa etapa, a diferenciação entre valores erráticos e “outliers”, sendo os primeiros, valores erráticos que pertencem à população e que têm impacto significativo na estimativa. Os segundos se referem a dados possivelmente altos que não pertencem à população e que são criados por erros, por exemplo, analíticos ou de digitação. A distinção entre estes valores necessariamente envolve informações qualitativas, normalmente não contidas nas amostras propriamente ditas.

Realizou-se também, nesta etapa, o teste de normalidade para o conjunto dos dados. Utilizou-se dois testes para esta finalidade. O primeiro foi a plotagem “Q-Q”, a qual segundo Jonhson & Wichern (1982), é um gráfico dos quantis das amostras versus os quantis que se esperaria observar se a amostragem fosse distribuída normalmente. O segundo teste foi o teste formal de Filliben, descrito pelos mesmos autores, que calcula o coeficiente de correlação “r” entre os quantis acima mencionados e verifica seu valor com valores tabelados para níveis de significância de 1 e 5 %.

O estudo da continuidade espacial da camada I é realizado pela análise variográfica, a qual detecta a principal característica estrutural do fenômeno, através de variogramas experimentais. Estes medem a continuidade dos dados dois a dois, separados de uma distância “h” e em uma direção determinada (figura 2.4). Para o conjunto de dados da amostragem da espessura da camada I, obtida pela campanha de 182 furos de sondagem, foi necessário verificar a continuidade dos dados ao longo de diversas direções. Nos variogramas da camada I de carvão os parâmetros foram os seguintes:

Número de “lags” (numero de pares) : 20.

Separação dos “lags” : 500 metros (porque a distância média entre os furos de sondagem é de 500 metros).

Tolerância: 300 metros (500 metros +/- 300 metros).

Número de direções: 16 (de 15 em 15 graus: 0° , 15° , 30° ...até 150° e ainda 57° , 147° e onidirecional).

Tolerância angular: 40 graus, (abertura angular) e

Banda do ângulo de direção: 1000 metros, (limite da abertura angular).

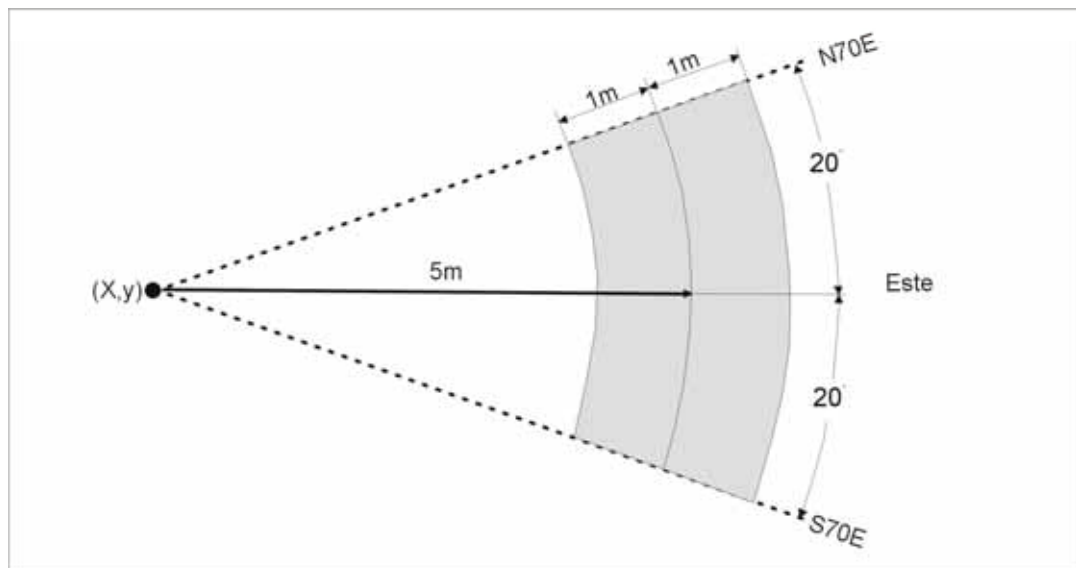


FIGURA 2.4 - Ilustração dos parâmetros de h para a seleção dos pares de um variograma. No exemplo, $h = 5\text{ m} \pm 1\text{ m}$, com abertura de campo de $\pm 20^{\circ}$ na

direção Este. Qualquer amostra que caia na faixa sombreada será pareada com amostra de localização (x,y), (modificada de Isaaks & Srivastava, 1989).

Com a execução dos diferentes variogramas consegue-se determinar as direções de maior e menor continuidade, e assim, encontrar os parâmetros para definir o padrão de continuidade, que foi escolhido como modelo esférico.

O processo de estimativa é de fundamental importância, pois geralmente, as informações quantitativas disponíveis sobre os dados espacialmente distribuídos são reduzidas, face a diversos fatores, como por exemplo, o alto custo das amostragens.

A avaliação dos locais não amostrados se torna crítica, na medida que, desconhecemos muitos processos naturais geradores das condições existentes, bem como outros fatores condicionantes. Utilizou-se neste trabalho o método de estimativa por krigagem ordinária. É um método de interpolação conhecido pelo acrônimo B.L.U.E., que representa “best linear unbiased estimator”. É linear porque suas estimativas são uma combinação linear ponderada, é ‘unbiased’ pois que tenta ter média do erro residual igual a zero, e é ‘best’ porque almeja minimizar a variância do erro residual. Esta última característica é que distingue a krigagem ordinária dos outros métodos de interpolação.

Uma vez realizados os processos de estimativa por krigagem ordinária, é necessário fazer a validação do processo. Uma maneira de visualizar-se a validação é verificar através da plotagem do histograma dos erros de estimativa. A média do erro de estimação deve ser zero. A segunda maneira é realizada computacionalmente, por uma rotina denominada de validação cruzada. Esta rotina executa o seguinte procedimento: um ponto amostral é retirado do conjunto e usando as demais amostras, estima-se este mesmo ponto por krigagem ordinária usando o mesmo modelo variográfico. O procedimento é executado para todos os demais pontos amostrais. O valor esperado deverá ser o mais próximo possível do valor verdadeiro. Uma maneira de se visualizar a comparação entre o valor estimado e o valor verdadeiro é através de um diagrama de dispersão ou escaterograma. A disposição próxima a linha de 45° indica que o modelo variográfico reproduz adequadamente a continuidade espacial.

Para obter a estimativa do volume e posteriormente a cubagem da camada I, é necessário inicialmente a determinação da área pesquisada. Para o cálculo da área da camada de carvão I no local pesquisado, utilizou-se o modelo de variograma anterior e realizou-se uma krigagem ordinária por blocos, com cada bloco medindo 250 por 250 metros com 16 pontos por bloco. O volume foi obtido multiplicando-se a área pela média da espessura. Considerando o peso específico médio do carvão da região multiplicado pelo volume, chegou-se ao resultado da tonelagem de carvão “in situ” da camada I.

3 - GEOLOGIA

3.1 - Síntese da evolução geológica: Brasileiro-Recente

Granitos e rochas de alto grau de metamorfismo de idade pré-cambriana foram submetidas a uma colisão continental orientada no sentido leste-oeste, seguido de extenso período de soerguimento e erosão. O evento orogênico, referido como ciclo tectônico Brasileiro, gerou um padrão de fraturas e falhas que também pode ser visto na maioria dos depósitos mais recentes da área. Esta colisão continental foi um dos eventos que contribuiu para a formação do antigo super-continente Pangea.

Com o decorrer do tempo geológico, o movimento crustal das placas resultou na fragmentação do Pangea formando dois continentes, no hemisfério norte referido como Laurásia e no sul como Gondwana. No período Permiano e em tempos anteriores extensas partes do Gondwana experimentaram subsidência com a formação de bacias sedimentares, onde finas camadas de clásticos e outros sedimentos se acumularam. Rios principais, com cabeceiras em áreas altas formaram grandes deltas e lagos onde a turfa se acumulou em vários ambientes adjacentes a eles. Mais tarde sedimentos depositados encobriram a turfa provendo condições adequadas para a transformação da mesma em carvão.

A medida que o tempo prosseguia, mudanças no padrão do movimento crustal ocorreram. Em muitas áreas do Gondwana, por esforços de distensão, alguns blocos se separaram. Localmente fraturas das rochas do embasamento foram reativadas e as falhas se propagaram em direção aos sedimentos mais jovens ou ainda, novas falhas se formaram. Sob estas condições de relativa tensão, a principal característica da deformação ocorrida foi por movimentação vertical. O magma formado em profundidade foi capaz, sob estas condições, de migrar para a superfície ao longo das

falhas e fraturas, algumas vezes formando rochas intrusivas, tais como diques e sills e, mais freqüentemente, extensas lavas basálticas onde o magma atingiu a superfície.

Coletivamente, esta seqüência de eventos tectono-magmáticos ocorreu como resposta às mudanças de condições na crosta e no manto da terra. Uma nova série de movimentos da crosta levaram à separação do Gondwana. O resultado foi a formação de continentes menores e massas de terra que nós conhecemos hoje como América do Sul, África do Sul, Índia, Austrália e Antártida. Apesar da localização desses continentes ser largamente afastada no presente, as condições comuns que afetaram os mesmos durante e depois dos eventos de formação do carvão no Permiano produziram depósitos carboníferos que têm características geológicas muito similares. Por esta razão, estes depósitos são coletivamente denominados seqüências gondwânicas carboníferas. Em todas estas áreas, a vegetação que formou a turfa se constitui de mesmas espécies com uma influência apropriada na característica da qualidade do carvão. Os depósitos de carvões do Gondwana experimentaram, mais tarde, eventos tectônicos que produziram resultados similares. Diques e sills são feições comuns na geologia das seqüências carboníferas de todas estas áreas, com uma tendência a mostrar falhamento e movimento vertical relativo entre os blocos adjacentes.

A seqüência carbonífera da Bacia do Paraná na Mina Leão II mostra muitas destas características típicas do Gondwana. Depois que foi iniciada a subsidência das rochas graníticas e metamórficas do embasamento Precambriano, uma bacia intracratônica do tipo interior foi formada. No início ainda alguns sedimentos glaciais foram depositados, mas após, a principal seqüência sedimentar portadora de carvão, a Formação Rio Bonito, começou a se acumular no Permiano Inferior.

A turfa foi acumulada principalmente em áreas de bacias interdistributárias de cursos d'água que alimentavam deltas nas áreas, formando muitas camadas de carvão. A mais importante delas na Leão II, é referida como camada I e sotoposta a ela, ocorrem as camadas I2 e I3. Três outras camadas mais jovens são referidas como S1, S2 e S3. Um evento marinho transgressivo seguiu-se e os sedimentos da Formação Palermo foram então depositados. Subseqüentemente, sedimentos concordantes do Permiano superior das formações marinhas Irati e Estrada Nova foram depositados. Sedimentos não marinhos Triássicos foram então depositados sobre a maior parte da

bacia, em contato discordante com a seqüência Permiana. A mais recente formação, de idade triássica, é a Formação Rosário do Sul.

Um evento tectônico ocorreu nos primórdios do Cretáceo, que levou à ruptura do Gondwana e à abertura do Atlântico Sul. Em consequência, houve o soerguimento dos sedimentos na bacia, que foi acompanhado de reativação dos falhamentos do embasamento e criação de novos com a tendência de basculamento e separação de blocos do embasamento. Durante este tempo ou mesmo antes dele, as seqüências sedimentares que cobriam o embasamento foram dobradas tenuamente sobre as margens dos blocos das rochas mais rígidas do embasamento cristalino, em resposta ao movimento diferencial dos blocos. Isto levou ao dobramento “drape” e a falhamentos próximos aos limites dos blocos. Ao mesmo tempo o magma introduziu-se ao longo dos falhamentos ou planos de fraturas, formando diques.

3.2 - Estratigrafia da Bacia do Paraná

Segundo Zalan et al. (1990) a Bacia do Paraná (BP) é uma vasta bacia intracratônica sul-americana, desenvolvida completamente sobre crosta continental, e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, cujas idades variam entre o Siluriano e o Cretáceo. Abrange uma área de cerca de 1.700.000 Km², estendendo-se pelo Brasil (1.100.000 km²), Paraguai (100.000 km²), Uruguai (100.000 km²) e Argentina (400.000 km²), (Figura 3.1).

Os limites atuais da bacia são de natureza erosional ou de origem tectônica (grandes arcos ou soerguimentos). No primeiro caso os sedimentos simplesmente afinam ou são suavemente afinados por erosão. Isto é o que acontece na borda NE da bacia. O limite NO da bacia é o cinturão de dobramentos do Paraguai/Araguaia, de idade Pré-Cambriana Superior/Ordoviciano, o qual provavelmente agiu como barreira topográfica para a sedimentação.

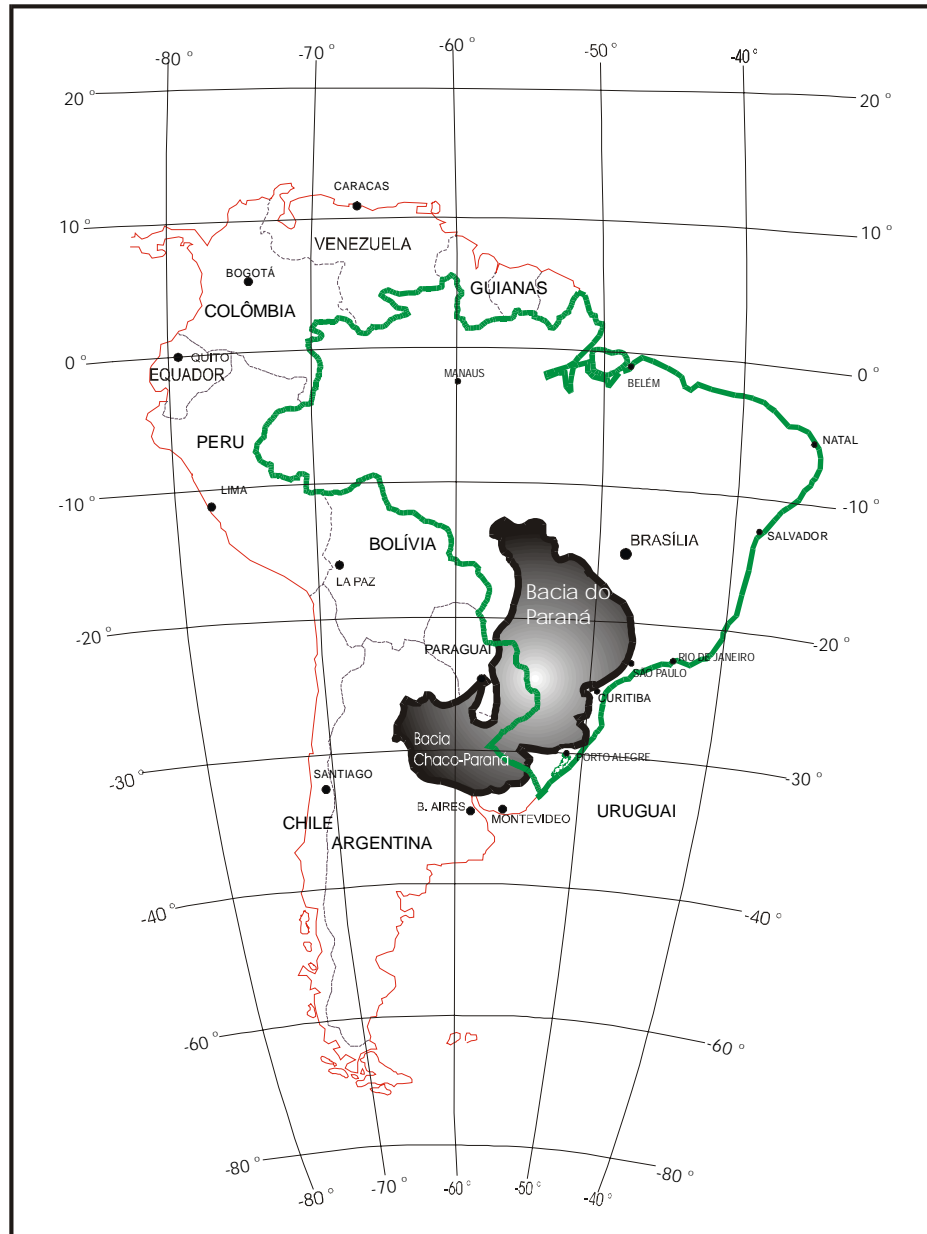


FIGURA 3.1 - Disposição geográfica da Bacia do Paraná, modificada de Zalan et al. (1987).

As rochas sedimentares da BP foram depositadas sobre uma vasta área do escudo do então recém-constituído continente do Gondwana, composto de vários núcleos cratônicos (terrenos granulíticos e de granitos-greenstones), rodeados por vários cinturões móveis orogênicos (rochas metassedimentares dobradas e empurradas, granitos e faixas de crátons remobilizados) e dispersamente cobertas por remanescentes de bacias de antepaís de natureza molássica, todos formados durante o ciclo Brasileiro (Proterozóico Superior a Ordoviciano). Este ciclo foi importante evento tectônico e

magmático, durante o qual a colisão de diversos núcleos cratônicos, juntamente com seus prismas sedimentares adjacentes, levou à formação do Gondwana. A deformação decorrente deste ciclo teve início a 700-650 Ma (Proterozóico Superior), sendo que a maior parte da granitogênese situou-se no limite entre o Proterozóico e o Fanerozóico (610-580 Ma).

3.2.1 - Estratigrafia da Bacia do Paraná no Estado do RS

Supergrupo Tubarão.

O Supergrupo Tubarão constitui-se dos grupos Itararé e Guatá segundo Schneider et al. (1974).

Grupo Itararé

Compreende a seqüência sedimentar de idade permo-carbonífera cujos depósitos, caracterizados por diamictitos, refletem influências glaciais em seus diferentes ambientes deposicionais.

Formação Rio do Sul.

É constituída de sedimentos essencialmente argilosos que ocorrem na parte superior do grupo Itararé. A parte basal da Formação (Fm) apresenta folhelhos e argilitos cinza escuro, localmente com aspecto varvítico; e a parte superior da formação constitui-se de argilitos, folhelhos várnicos, ritmitos, arenitos finos e diamictitos. Esta formação assenta diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino e o contato superior com a Fm Rio Bonito é concordante. Os depósitos desta Fm são relacionados a ambiente essencialmente marinho com influência de ambiente glacial. Dados palinológicos situam a deposição dos sedimentos da Fm Rio do Sul no Permiano Médio (Kunguriano) (Daemon & Quadros, 1969).

Grupo Guatá

O Grupo Guatá constitui-se de siltitos cinza, esverdeados e de arenitos com intercalações de camadas de carvão e folhelhos carbonosos que se distribuem verticalmente desde o topo do Grupo Itararé até a base da Fm Irati.

Formação Rio Bonito.

Compreende o pacote sedimentar depositado sobre o Grupo Itararé constituído de uma seção arenosa basal, uma média essencialmente argilosa e uma superior, areno-argilosa, contendo os principais leitos de carvão explorados na BP (Schneider, op. cit.). As espessuras maiores ocorrem na porção noroeste da bacia (Figura 3.2).

São encontrados no RS três conjuntos litológicos distintos, que ocorrem tanto em associação vertical quanto interdigitados localmente ou mesmo isolados.

O primeiro conjunto litológico é formado predominantemente por arenitos médios e grossos, cinza-claros, arcoseanos, localmente conglomeráticos com grânulos e seixos de rochas sedimentares, ígneas e metamórficas. Secundariamente ocorrem arenitos muito finos, finos e médios. Siltitos cinza esverdeados ou cinza escuros e carbonosos com leitos e camadas de carvão onde as camadas de carvão são de ocorrência subordinada. Ocorre normalmente na porção basal da Fm Rio Bonito, em contato discordante com o embasamento Pré-Gondwânico e é raramente gradacional com as rochas do Grupo Itararé.

O segundo conjunto é predominantemente pelítico, sendo constituído por siltitos cinza a cinza-claros; cinza-escuros a preto, carbonosos, por vezes argilosos, maciços, mais raramente com interlaminações de arenitos e intercalações de leitos e camadas de carvão. É neste conjunto que se desenvolvem as principais camadas de carvão do RS. Suas relações de contato com o conjunto anterior são de concordância, localmente interdigitados e discordantes sobre o embasamento Pré-Gondwânico quando ausente o conjunto arenoso basal e rochas do Grupo Itararé.

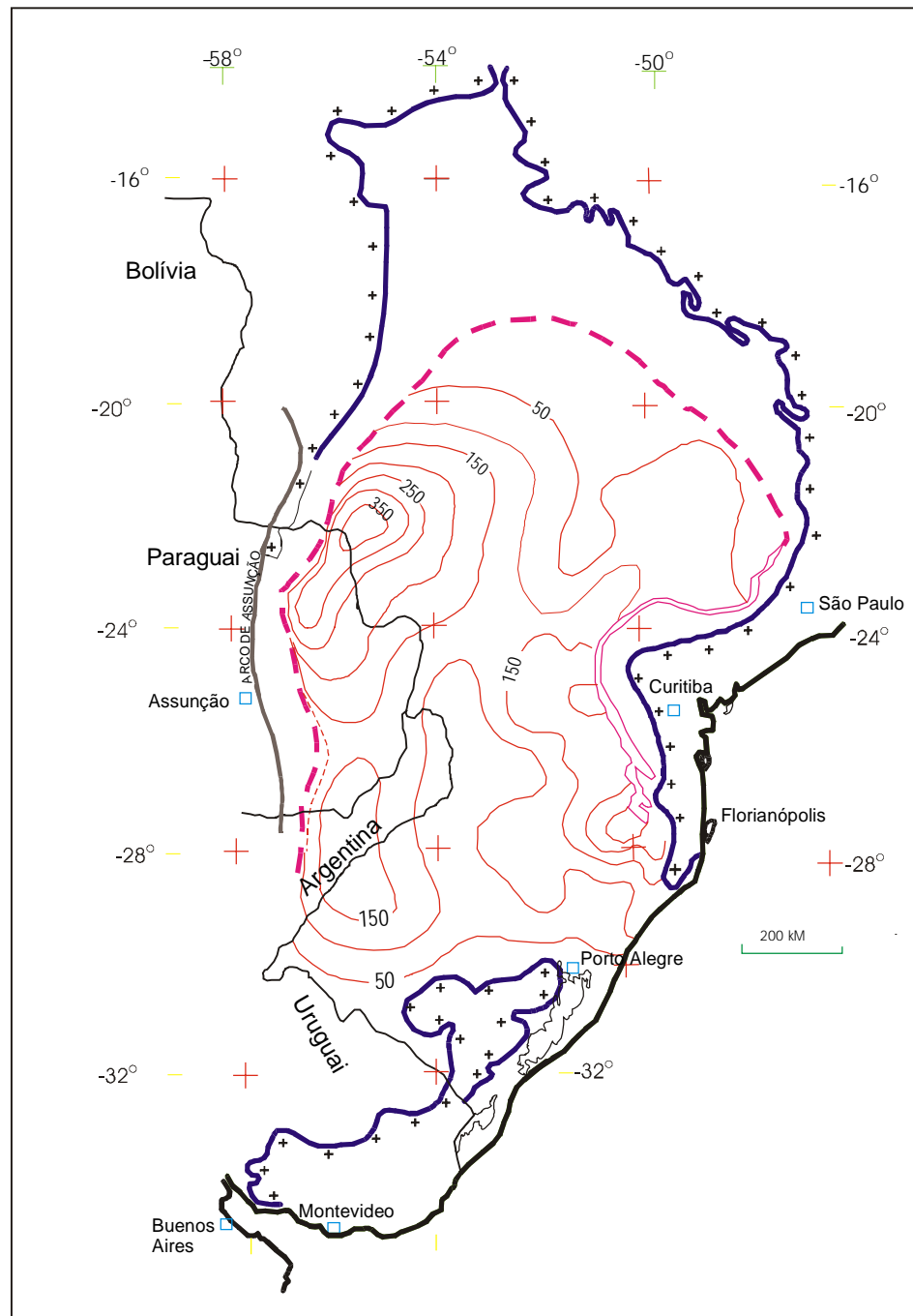


FIGURA 3.2 - Mapa de isópacas da Formação Rio Bonito, modificado de Zalan et al. (1987).

O terceiro conjunto litológico é constituído essencialmente por arenitos quartzozos a ortoquartzíticos, finos a médios, cinza claros, cinza esverdeados, localmente grossos com grânulos e seixos dispersos. Subordinadamente, ocorrem leitos e camadas de siltitos cinza a cinza-escuros e carbonosos, leitos e camadas de

carvão. O contato com os outros dois conjuntos é concordante, localmente de natureza interdigitada e discordante sobre o embasamento.

Milani et al. (1994) comentando sobre o ambiente deposicional da Fm. Rio Bonito, afirmam que a tendência transgressiva foi quebrada momentaneamente pela entrada das cunhas arenosas da Fm. Rio Bonito no Artinskiano/Kunguriano. Tal episódio de reativação de áreas fonte é atribuído por Zalan et al. (1987 e 1990) à Orogenia Tardiherciniana na margem ativa do continente. Arenitos associados a leitos de carvão, siltitos e folhelhos, estes localmente carbonosos, formam um contexto clássico de sedimentação deltaica, que adentrou a bacia por seu flanco leste.

Holtz (1997) em seu estudo das seqüências estratigráficas do Permiano inferior da BP, no norte do estado do RS, identifica a variação de quatro paleoambientes para a Fm Rio Bonito: inicialmente flúvio-deltaico, seguido de lagunar com formação de turfas, ante-praia e ante-praia e planície de maré.

Fragmentos de vegetais e palinórfos constituintes de conteúdo fóssilífero de da Fm Rio Bonito situam a deposição dos sedimentos no Permiano médio a superior (kunguriano a kazaniano) (Daemon & Quadros, 1969).

Formação Palermo

Consiste de siltitos e siltitos arenosos de cores cinza e, por alteração, amarelas e esverdeadas. Localmente, desenvolvem-se arenitos finos e mesmo conglomerados. Estes sedimentos encontram-se normalmente bioturbados, resultando na quase completa destruição de suas estruturas sedimentares. Quando preservadas, caracterizam laminação cruzada de pequeno porte. No RS esta formação atinge a ordem de 150 m de espessura.

O contato inferior com a Fm Rio Bonito é concordante. As características litológicas da Fm Palermo indicam deposição em ambiente marinho transgressivo de águas rasas, abaixo do nível de ação das ondas (Schneider, op. cit.).

Grupo Passa Dois

O Grupo Passa Dois constituiu-se, na porção sul da bacia, das formações Irati, Estrada Nova e Rio do Rastro.

Formação Irati

Representa uma seqüência sedimentar pelítica, predominantemente de coloração cinza escura a preta, associada a níveis carbonáticos concentrados na metade superior. Caracteriza-se por uma faciologia bastante complexa, com folhelho, folhelho betuminoso, arenito, marga, carbonato e anidrita, indicativos de uma geometria de bacia igualmente complexa, em que configuravam-se golfos e baías de profundidades e salinidades bastante variáveis (Daemon et al., 1991). A rica fauna de répteis mesossaurídeos que ocorre na porção superior da Fm. Irati faz parte deste um horizonte ímpar no contexto do registro paleozóico sul-americano. Depositada em condições de um mar restrito, progressivamente mais salino da base para o topo (Milani et al., op. cit.).

Formação Estrada Nova

É constituída, na porção inferior, por siltitos cinza-escuros com intercalações de folhelhos, raros leitos de calcário e arenitos muito finos. Na porção superior ocorrem folhelhos e siltitos cinza-escuros com laminação plano-paralela esparsa. Aparecem também raros leitos de calcários impuros, siltitos carbonáticos e arenitos muito finos. Seu ambiente deposicional é marinho de águas calmas, abaixo da ação das ondas. Os contatos no seu topo e base são transacionais respectivamente com as formações Rio do Rastro e Irati.

Formação Rio do Rastro

Constituída por arenito, silito e folhelho arroxeados, esverdeados e avermelhados, interpretadas como produto do avanço de sistemas deltaicos desde a borda oeste da bacia (Gama Jr., 1979 apud Milani et al., op. cit.). Os corpos arenosos,

contínuos na base desta unidade, adquirem marcante lenticularidade em sua porção superior. Sua deposição inicia-se em um ambiente marinho raso que transiciona para depósitos de planície costeira e finalmente para depósitos flúvio-deltaicos. A idade triássica, é sugerida por dados palinológicos (Daemon et al., 1991).

Grupo São Bento

Formação Rosário do Sul

Compreende os sedimentos de cores avermelhados, essencialmente arenosos. Constitui-se de arenitos médios e finos e, subordinadamente arenitos muito finos e siltitos, com grãos angulares, subarredondados e mal selecionados. As cores podem ser também rosadas e amareladas ou raramente esverdeadas.

Estratificação cruzada, planar e acanalada são as estruturas sedimentares mais freqüentes. O ambiente deposicional está relacionado a sistemas continentais flúvio-eólicos associados a lagos rasos e localizados.

O membro Santa Maria situa-se na porção superior da Fm Rosário do Sul e constitui-se de argilitos sílticos e siltitos arenosos, vermelhos, fratura subconchoidal e contém nódulos calcíferos dispostos em níveis. Apresenta-se rico em flora e fauna de vertebrados e invertebrados com idade iadiniana/carniana (Triássico inferior e médio). Sua distribuição é restrita ao RS, e em superfície, a forma erosiva em ravinamento dos afloramentos é uma característica marcante.

Milani et al. (op. cit.), em estudo que compreende a elaboração da carta estratigráfica da Bacia do Paraná retira a Formação Rosário do Sul do Grupo São Bento e considera somente as Fms Botucatu e Serra Geral pertencentes ao mesmo.

Formação Botucatu

Constitui-se de arenitos avermelhados, finos a médios normalmente bimodais, friáveis, grãos foscas, arredondados a bem arredondados. Localmente com

maior frequência na parte basal, ocorrem arenitos argilosos, mal selecionados. Estratificação cruzada tangencial em grandes cunhas, na parte basal, estratificação plano-paralela e cruzada acanalada são as estruturas sedimentares mais comuns. As características litológicas e sedimentares da Fm. Botucatu indicam deposição eólica em ambiente desértico com contribuição, na parte basal, de sedimentação fluvial, (Schneider et al., op. cit). A idade é jurássica e o contato inferior com a Fm. Rosário do Sul é discordante.

Formação Serra Geral

Constitui-se, litologicamente, de uma seqüência básica predominante, e de uma seqüência ácida, mais abundante no topo do pacote, porém com possibilidades de intercalações locais junto à seqüência básica inferior. A Fm. Serra geral é resultado do intenso vulcanismo de fissura, iniciado quando ainda perduravam as condições desérticas de sedimentação da Fm. Botucatu, fato este atestado pela presença de inúmeros corpos arenosos de origem eólicas na parte basal da formação (Schneider et al., op. cit.).

É o mais volumoso episódio de extravasamento intracontinental de lavas do planeta como manifestação magmática dos estágios precoces da ruptura do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, que resultou no empilhamento de até 2000 m de rocha vulcânica sobre os sedimentos da Bacia do Paraná, além de intrudir-se por entre os mesmos, na forma de uma intrincada rede de diques e soleiras. A intercalação das lavas, na parte basal Fm. Serra Geral, com os arenitos da Fm. Botucatu posicionam estas duas unidades com idade jurássica-eocretácea (Milani et al., op. cit.).

3.3 - Estratigrafia na região da mina Leão II

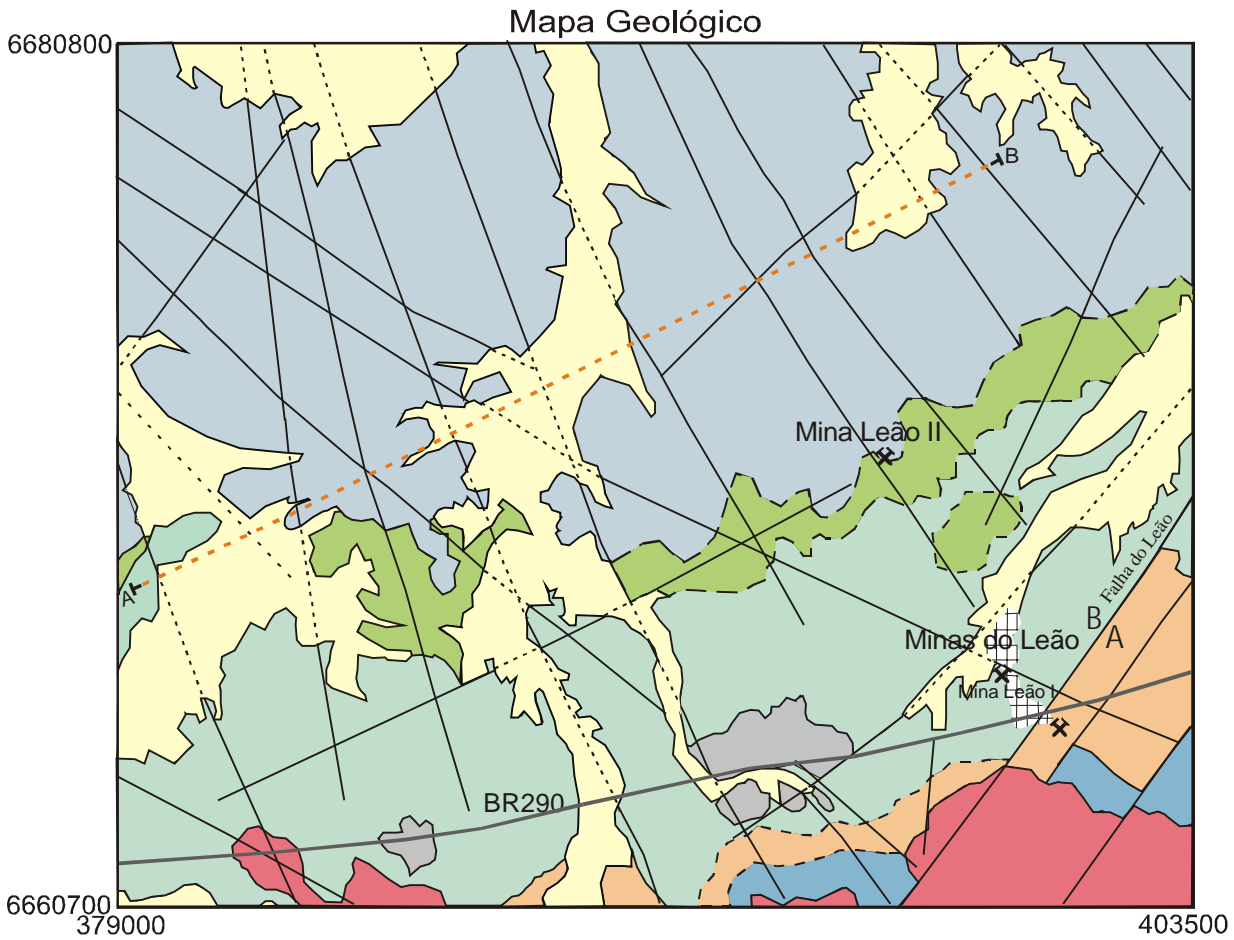
A tabela 3.1 mostra a relação entre as várias unidades geradas como resultado da deposição na bacia do Paraná. Esta tabela, modificada depois de outubro de 1974, é aplicada à região e inclui também unidades que são de pouca significância

para a geologia de mineração da Mina Leão II, segundo relatório interno da CRM(1980).

TABELA 3.1 - Principais unidades estratigráficas na região da concessão Leão II.

ERA	PERÍODO	SUPER GRUPO /GRUPO		FORMAÇÃO	LITOFÁCIES	ESPESSURA	
Cenozóica	Quaternário				Aluvial, areia e cascalho	variada	
Mesozóica	Triássico			Rosário do Sul	Depósitos Fluviais	Incompleto	
Paleozóica	Permiano	Passa Dois		Estrada nova	Siltitos e Arenitos marinhos	50m	
				Irati	Folhelho pirobetuminoso	30m	
				Palermo	Arenito marinho e folhelho	50m	
	Permo-Carbonífero	Tubarão		Gua tá	Rio Bonito	Seqüências carboníferas deltaica	30-60m
				Itararé	Suspiro	Flúvio Glacial não marinho	~15m
					Budó	Siltito e Arenito marinhos	~15m
Precambriana				Embasamento	Granito, gnaisses e quartzitos		

Observa-se, para a área de estudo, que o mapa geológico elaborado por Lopes (1986), (figura 3.3), e seção geológica (figura 3.4), únicos disponíveis da região, apresentam uma diferença fundamental em relação aos dados da tabela 3.1, que é a ocorrência da formação Rio do Rastro, não referida no relatório interno da CRM.



Coluna estratigráfica

	CENOZÓICO	QUATERNÁRIO Aluviões e eluviões constituídos por clásticos finos e grosseiros, areia, silte e eventualmente cascalhos.	<p>Convenções Geológicas</p> <p>— Contato definido</p> <p>- - - Contato aproximado</p> <p>A — Falha - A = bloco alto B — Falha - B = bloco baixo</p> <p>- - - Falha encoberta</p> <p>✕ Mineração</p> <p>A — B Seção geológica</p>
		MESOZÓICO	
	TRIÁSSICO FORMAÇÃO ROSÁRIO DO SUL Arenitos avermelhados, finos a médios, quartzosos, com estratificação paralela e cruzada .		
	PALEOZÓICO	PERMIANO FORMAÇÃO RIO DO RASTRO Arenitos finos, siltitos e argilitos esverdeados, bordos a avermelhados, com laminação paralela e cruzada acanalada..	
		FORMAÇÕES ESTRADA NOVA / IRATI E N - argilitos , folhelhos e siltitos cinza -escuro com lentes arenosas calcíferas. I - argilitos , folhelhos cinza escuros a pretos pirobetuminoso intercalados com margas	
		FORMAÇÃO PALERMO Siltitos arenosos cinza a amarelo, arenitos finos na base e na parte superior. Intensa bioturbação	
		FORMAÇÃO RIO BONITO Siltitos cinza e folhelhos escuros, carbonosos, com leitos e camadas de carvão. Associações de arenitos finos e grosseiros. Localmente conglomerados. Estratificação paralela, cruzada e acanalada.	
	PRE-CAMBRIANO	Quartzo-mica-xistos, quartzitos micáceos e calcários marmorizados. Rochas graníticas e sieníticas Gnaisses e migmatitos.	

ESC. HORIZ: 1/175.000



FIGURA 3.3 - Mapa geológico e coluna estratigráfica da região, modificados de Lopes (1986).

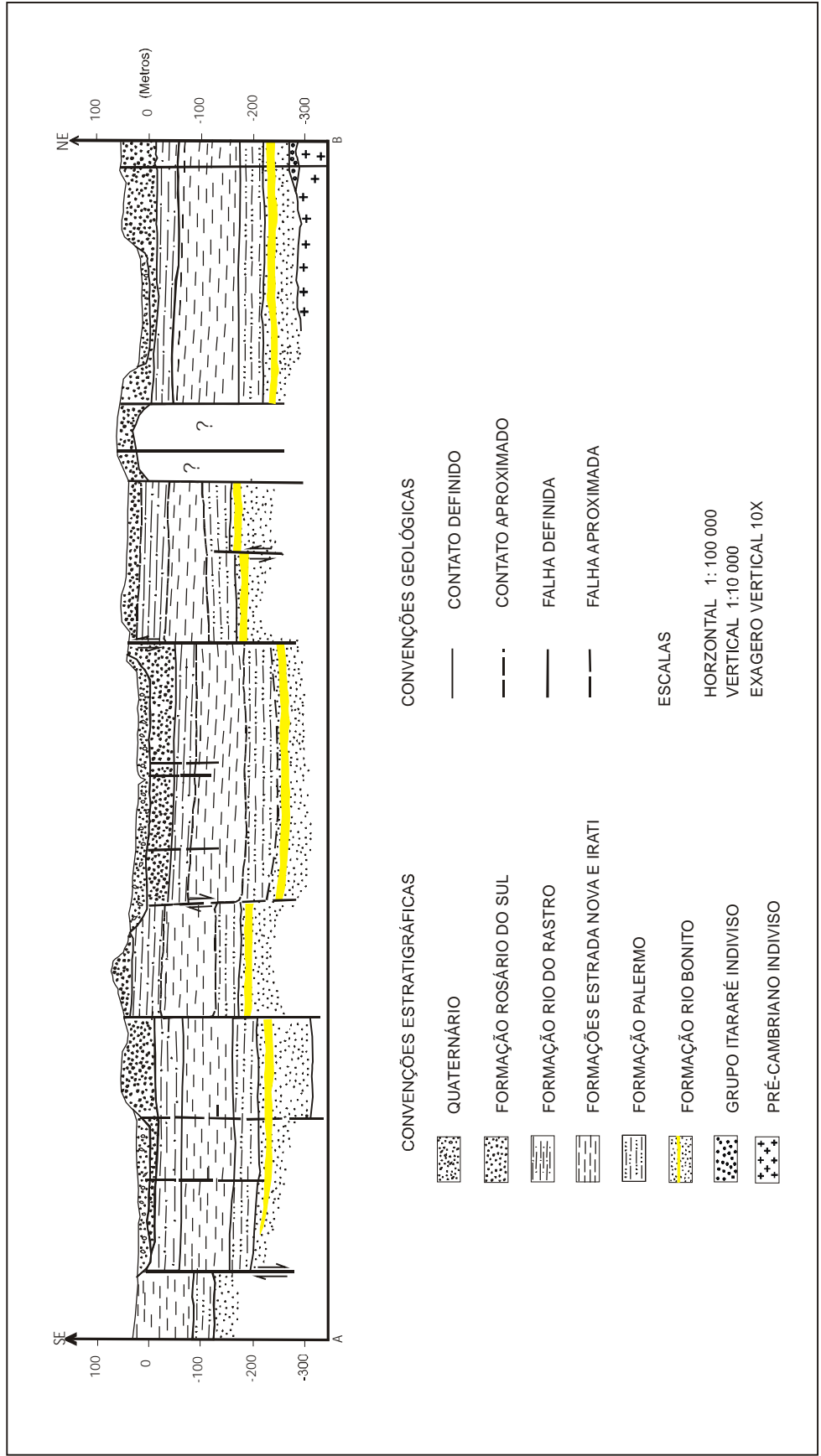


FIGURA 3.4 - Seção geológica A-B, modificada de Lopes (1986).

Embasamento Pré-cambriano

Muitos dos furos de sondagens na Leão II ultrapassaram as seqüências carbonosas atingindo o embasamento. As litologias relacionadas incluem granitos ou rochas de alto grau de metamorfismo como gnaisses e quartzitos.

Sub Grupo Itararé (Permo-Carbonífero)

Encobrimdo discordantemente o embasamento estão as rochas permo-carboníferas do sub-grupo Itararé. Existem duas formações que constituem o Sub-Grupo; a formação inicial de origem marinha e referida como Formação Budó enquanto a mais tardia é a Formação Suspiro. A Formação Budó consiste de siltito, siltito arenoso, arenito e ocasionalmente inclui conglomerados. Existe a tendência do tamanho do grão aumentar a partir da base da Formação. A Fm Suspiro é composta de rochas que são de origem glacial, flúvio-glacial e limno-glacial. As litologias típicas incluem tilitos, siltitos, arenitos, folhelhos e diamictitos. Estes últimos representam caracteristicamente a litologia desta Formação. Dentro da bacia a continuidade desta unidade tende a ser aleatória. As maiores espessuras desenvolvidas nesta unidade tendem a ocorrer nos lugares onde a paleo superfície topográfica do embasamento era anormalmente baixa.

Sub Grupo Guatá (Permiano Inferior)

Consiste de duas formações: a Formação carbonosa Rio Bonito situada na base, que é coberta concordantemente pela Formação Palermo.

A Fm Rio Bonito é a formação de principal interesse econômico na concessão Leão II. Em algumas partes da bacia a formação tem sido descrita como sendo constituída de três unidades com camadas de carvão confinadas no centro delas. Entretanto, localmente as camadas de carvão podem ser encontradas em diversos níveis, mas existe a tendência das ocorrências serem mais freqüentes no centro e em direção ao topo da Formação.

No local da concessão a Formação tem espessura variando de cerca de 30 a 60 m e, além de carvão, as litologias típicas incluem folhelho carbonoso, folhelho, arenito e siltito. Existe também ocorrência ocasional de conglomerado, mais freqüentemente no intervalo entre as duas camadas de importância econômica, as camadas inferiores (I) e (I2). Este conglomerado consiste de clásticos de siltito e arenito, bem selecionados suspensos em uma matriz rica em argila.

A Fm. Rio Bonito é concordante com a seqüência subjacente do Sub-Grupo Itararé, quando ela está presente, e discordante com as rochas do embasamento Pré-Cambriano.

A Formação inicial do Sub-Grupo Guatá é a Fm Palermo. Ela é amplamente distribuída dentro da Bacia do Paraná e, no Rio Grande do Sul, tem espessura máxima de 300m. Na região da concessão sua espessura é em média de 50 m. É característica litológica da Formação Palermo, em toda a bacia, um siltito arenoso acinzentado com alterações para cores amarelas a esverdeadas, mas leitos de arenito grosseiro também ocorrem.

Grupo Passa Dois

Na área de estudo este grupo é representado pelas formações marinhas Irati e Estrada Nova. A Fm Irati representa uma seqüência sedimentar pelítica, predominantemente de coloração cinza escura a preta, associada a níveis calcíticos concentrados na metade superior. O contato com a Fm Palermo é concordante. Os sedimentos que compõem esta unidade foram depositados em ambiente marinho raso, abaixo do nível normal de ação das ondas, onde as restrições da bacia propiciaram condições de deposição de margas, calcários, e folhelhos pirobetuminosos.

Recobrimo concordantemente a Fm Irati ocorre a Fm Estrada Nova. Esta é também uma unidade marinha mas é tipicamente de granulação mais grosseira que a formação Irati. Consiste geralmente de argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuros com concreções ou lentes calcárias. A formação tende a ter granulação mais grosseira em direção ao topo onde as unidades argilosas e silticas são intercaladas com arenitos de fina granulometria.

Grupo São Bento

O Grupo São Bento cobre discordantemente a Fm Estrada Nova. Existem três formações que constituem este grupo, mas somente a inferior está representada na concessão Leão II, que é a Fm Rosário do Sul. É uma unidade não marinha que inclui duas fácies principais. A primeira é fluvial, contendo sedimentos de planície de inundação e a segunda é lacustre. Arenito é a litologia dominante embora exista uma larga variedade de litologias presentes. A Fm geralmente tem cor avermelhada. A espessura encontrada na região da concessão é da ordem de 30m. Ocorre principalmente ao norte de Leão II, consistindo de um arenito finamente granuloso de coloração vermelha rosada.

Quaternário

Os depósitos aluviais e coluviais que estão presentes nos leitos e margens dos rios e arroios são depósitos do Quaternário. A tipologia consiste de depósitos finos de areia e argila e ocasionalmente cascalhos inconsolidados.

3.4 - As bacias carboníferas no Estado do Rio Grande do Sul

As jazidas carboníferas do estado do Rio Grande do Sul, localizam-se na “Depressão Periférica”, faixa aflorante das rochas sedimentares da Bacia do Paraná no RS associadas às demais rochas gondwânicas. São limitadas ao sul e sudeste pelas rochas mais antigas do Escudo Sul-Rio-Grandense; ao sul e sudeste pelas vulcânicas da Fm. Serra Geral e a leste são cobertas pelos sedimentos cenozóicos da planície costeira. De leste para sudoeste ocorrem as grandes jazidas de Santa Terezinha, Morungava-Chico Lomã, Charqueadas-Santa Rita, Leão-Butiá, Iruí, Capané e Candiota. Associadas às grandes jazidas ou mesmo isoladamente ocorrem jazidas menores.

As camadas de carvão ocorrem na Fm. Rio Bonito, Grupo Guatá, Super Grupo Tubarão. Sua idade tem sido amplamente discutida, sendo que Marques et al. (1982) correlacionaram todas as camadas de carvão do RS, atribuindo-lhes idade Artinskiano-Kungariano.

Para Corrêa da Silva (1987), as jazidas carboníferas do estado formaram-se em turfeiras predominantemente subaquáticas, de fácies orgânicas límnic e limno-telmático, sendo formadas por vegetais pteridofíticos de porte arbustivo herbáceo associados a gimnospermas arborescentes e a elementos vegetais relacionados a algas. Tal ambiente desenvolveu-se em uma bacia intracratônica, de lenta subsidência, condicionando a formação de camadas pouco espessas de carvão associadas a rochas sedimentares predominantemente pelíticas.

Conclui a autora que o desenvolvimento da vegetação foi condicionado pelas variações do nível da água nas turfeiras, proporcionando a deposição simultânea de matéria orgânica e inorgânica intimamente associadas, e a oxidação dos detritos vegetais transportados para o interior das turfeiras,

3.5 - A bacia Leão-Butiá

A bacia carbonífera Leão-Butiá, também referida simplesmente como Leão, possui uma forma alongada segundo a direção SW-NE com uma área de 1070 Km² e recursos de carvão na ordem de 2.442 x 10⁶ toneladas. O carvão é do tipo betuminoso Alto Volátil C, (Muller et al. 1987), com teores médios de cinza de 56% e de enxofre entre 1 e 5%, exibindo alguns setores da jazidas propriedades coqueificantes. Quando apresenta-se completa possui 7 camadas de carvão: 3 superiores (S1, S2 e S3), e 4 inferiores (I, I2, I3 e I4). A mais importante de todas é a camada I.

Lopes (1990) em seu estudo paleoambiental da Fm Rio Bonito na jazida Leão, afirma que há um amplo predomínio das fácies deltaicas (litofácies de arcóseos, de pelitos e de arenitos finos) sobre as fácies fluviais (litofácies de conglomerados), ou então estas fácies progradam sobre depósitos sedimentares glacio-lacustres da Fm Rio do Sul.

Piccoli et al. (1986) em seu trabalho sobre o paleoambiente da jazida Leão, relata que a seqüência sedimentar que engloba as camadas de carvão, é composta, na base por arenitos predominantemente grosseiros originados em ambiente meandrante. Em direção ao topo intercalam-se um espesso pacote pelítico (lacustre), contendo as camadas de carvão de origem palustre. No setor noroeste da jazida, encontram-se,

preservados as fácies arenosas e um sistema de barreira, que se associou aos pelitos e protegeu as turfeiras. No final do ciclo, passou a dominar a transgressão marinha, que está evidenciada pelo pacote arenoso sobreposto a toda a seqüência.

3.6 - Estratigrafia das camadas de carvão na concessão da mina Leão II

Existem seis camadas de carvão na formação Rio Bonito na concessão Leão II. Elas são referidas como S1, S2, S3, I, I2 e I3 do topo para a base da seção. Somente as camadas I e I2 têm significativo potencial de desenvolvimento, conforme relatório interno da CRM. As outras são demais estreitas ou muito descontínuas para o desenvolvimento de grandes áreas o suficiente para justificar mineração. A figura 3.5 mostra o perfil de um furo de sondagem ao norte da concessão, sendo que a camada S1 não está presente.

3.7 - A camada Inferior I

Até o presente é a única camada que foi estudada profundamente com o objetivo de lavra na concessão Leão II. É a camada mais espessa e mais contínua na concessão. Este estrato consiste de finos leitões de carvão, separados por bandas de conglomerados, folhelhos carbonosos e folhelhos. Um leito primário delgado de carvão normalmente coberto por três leitões carbonosos mais finos. Cada leito carbonoso é separado por bandas de folhelhos carbonosos.

Em alguns locais um folhelho de coloração cinza também foi depositado em associação com o folhelho carbonoso. Na maioria dos casos onde isto ocorre existe somente uma banda de folhelho carbonoso presente, usualmente, no intervalo acima do leito de carvão primário basal. Em alguns casos, no entanto, duas bandas de folhelho se desenvolvem, e, raramente três. A porção imediata ao teto da camada I consiste de folhelho carbonoso com espessura de aproximadamente um metro. Já a lapa da camada I parece ser adequada para mineração, pois consiste de um espesso leito de folhelho carbonoso sobreposta a um conglomerado.

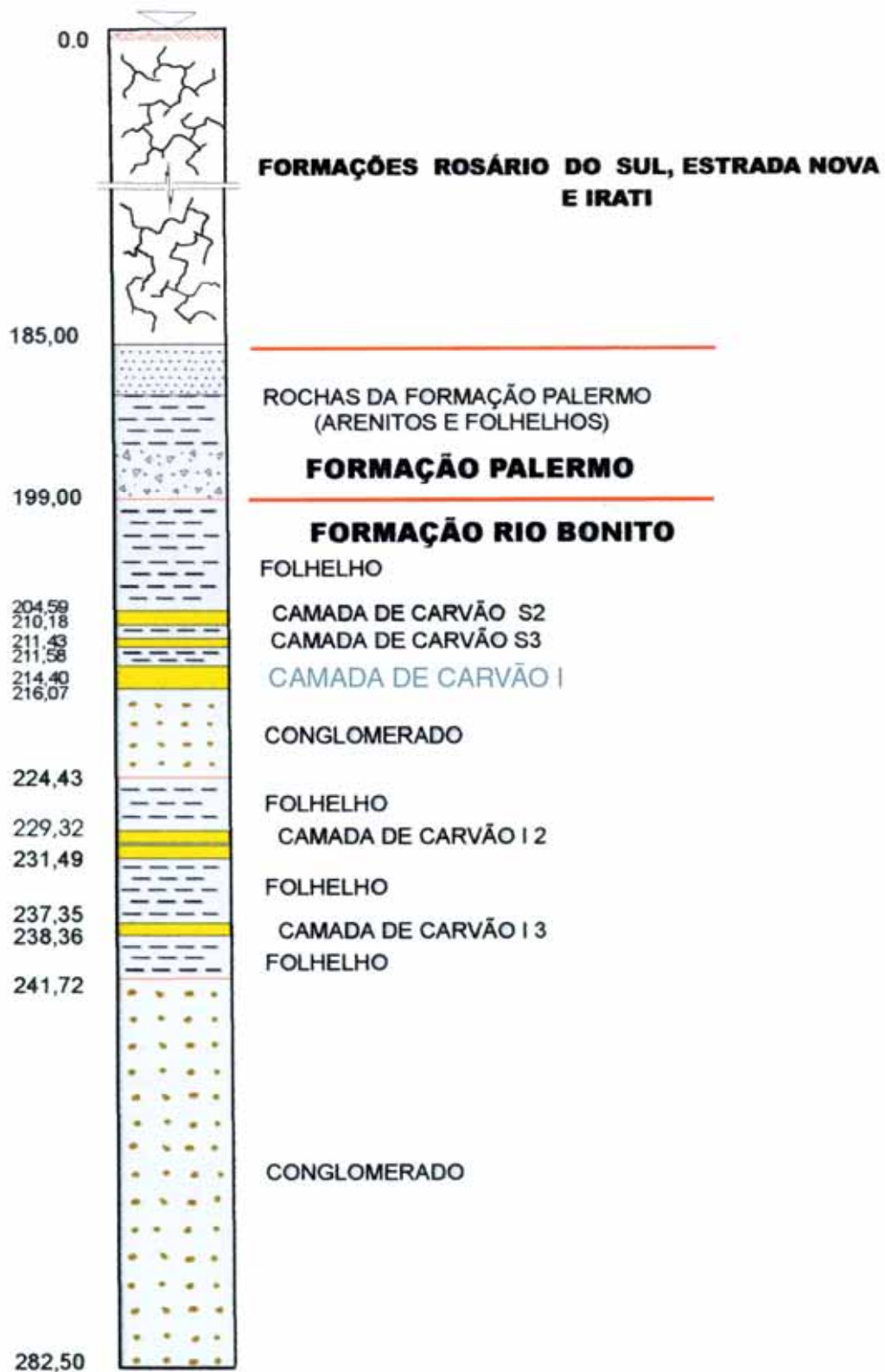


FIGURA 3.5 - Perfil de um testemunho de sondagem na região de estudo modificado de CRM (1980).

3.8 - Geologia Estrutural - Bacia do Paraná

3.8.1 - Morfoestruturas lineares da Bacia do Paraná

A figura 3.6. mostra os principais elementos tectônicos da Bacia do Paraná. Um marcante padrão de feições lineares em forma de X pode ser observado. Estas feições podem ser divididas em três grupos, de acordo com as orientações (NW-SE, NE-SW e E-W). Os lineamentos NE são derivados de dois cinturões móveis brasileiros (700a 400Ma) que afloram nas margens leste e sudoeste da bacia. A origem dos lineamentos N.W. é nebulosa, contudo há muitas evidências que de que eles sejam, pelo menos, tão antigos quanto os lineamentos NE, de idade brasileira, provavelmente até mais velhos.



FIGURA 3.6 - Principais sistemas de falhamentos da Bacia do Paraná, modificado de Zalan et al. (1987).

Ribeiro (1980) apud Zalan et al. (1987) conclui por uma idade arqueana para as estruturas lineares com direção N50°W, presentes nas massas rochosas transamazônicas (1900-2000 Ma) remanescentes nos terrenos pré-cambrianos do extremo sul do Brasil.

Soares et al. (1982), através de imagens LANDSAT e RADAR identificaram faixas retilíneas com alta concentração de lineamentos, separando-os em três grupos de trendes NW (variando de N25°W a N65°W) e dois grupos de trendes NE (variando entre N35°E e N60°E). De acordo com os autores, estas zonas estruturais representariam áreas de maior mobilidade tectônica em comparação às áreas adjacentes. Concluem que estes elementos representam zonas de fraqueza do embasamento, que vários deles controlam a sedimentação durante a evolução da bacia e que as zonas de trendes NW estão intensamente intrudidas por diques de diabásio, enquanto os trendes NE são notadamente carentes desta feição.

Citam ainda que o padrão estrutural de cada um destes grupos é diferente, principalmente porque as falhas com orientação NW foram fortemente reativadas durante o quebraamento juro-cretáceo do Gondwana, enquanto que as de direção NE não o foram. Este evento tectônico do juro-cretáceo foi o mais forte dentre aqueles que, de alguma maneira, afetaram a BP. Ele reativou vigorosamente as falhas NW pré-existentes, criando, provavelmente várias outras paralelas a esta direção, promovendo o condicionamento de milhares de corpos ígneos intrusivos e a extrusão do mais volumoso derrame de lavas do planeta.

O padrão estrutural das zonas de falha NE é diferente. Elas são constituídas ou por uma única falha larga ou por uma zona de falha retilínea. Geralmente ocorre ausência significativa de diques e, conseqüentemente das deformações associadas a eles. Entretanto, estruturas relacionadas a movimentos transcorrentes são muito mais comuns ao longo dos lineamentos NE, muito embora também sejam freqüentes ao longo dos lineamentos NW.

Segundo relatório interno da CRM (1980), as fraturas e falhas com orientação NE e NO são produtos de uma tensão compressiva máxima atuando essencialmente na direção este-oeste. Também são interpretadas como um episódio de

colisão continental que resultou na união de porções da América do Sul e África. O arqueamento crustal que acompanhou este episódio e resultou na inclinação para oeste dos blocos falhados. Condições de soerguimento e erosão ocorreram na bacia, inclusive na região da concessão Leão II, até os períodos Permiano e Carbonífero. Nestes períodos, horsts e grabens se formaram como consequência do movimento vertical dos blocos do embasamento ao longo dos principais falhamentos antigos. Também é relatado que a sedimentação nos deltas e a formação de carvão foi influenciada por estes movimentos diferenciais, uma vez que, preferencialmente, as camadas mais espessas e mais frequentes se desenvolveram no interior dos grabens, em vez de se desenvolverem nas plataformas altas dos horsts.

Os sedimentos da Bacia do Paraná foram afetados pelo evento tectônico de reativação no Cretáceo inferior. As antigas falhas NE-SW foram reativadas e novas falhas se formaram. Predominaram grandes movimentos verticais. Arqueamentos da crosta acompanharam este evento, inclinando blocos na direção oeste. O vulcanismo na B P ocorreu durante este ciclo através das fissuras abertas através do arqueamento.

Os lineamentos E-W são pouco visíveis na BP e podem ser detectados em mapas aeromagnetométricos e imagens Landsat. Seu desenvolvimento teve início a partir do Triássico. Esta idade, aliada ao seu extraordinário paralelismo com as zonas de fratura oceânica, sugerem uma ligação com o desenvolvimento do Atlântico Sul.

3.8.2 - Geologia estrutural na região da concessão Leão II

A história tectônica mostra que a Leão II tem sido afetada principalmente por movimentos verticais em falhas e fraturas que existiam antes dos sedimentos carbonosos terem sido depositados.

3.8.2.1 - Falhamentos

É bem conhecida próxima a Mina Leão II a falha do Leão, uma estrutura de caráter regional, que cruza a BR 290 no município de Minas do Leão. Esta falha tem

rejeito de 130 metros e separa o distrito subterrâneo da Mina Leão I a noroeste, do distrito a céu aberto a sul. O plano de falha se estende por 20 Km. Esta estrutura não causa impacto direto na mina Leão II.

Na área da Leão II, baseado na análise dos mapas de contorno estrutural das camadas de carvão e isópacas de cobertura, foram identificados dois falhamentos com rejeitos suficientes para impedir o desenvolvimento do projeto de mineração, (figura 3.7). O primeiro falhamento tem orientação EO a ENE e foi plotado onde existe uma marcada quebra na estrutura semi-circular semelhante a um domo nas curvas de contorno estrutural das camadas de carvão. O segundo falhamento tem direção NE e intercepta o primeiro falhamento aproximadamente no centro da concessão. É interpretado como uma falha pela ruptura da continuidade das linhas de contorno estrutural. Não existe informação disponível, além dos furos de sondagens, com relação aos rejeitos destes falhamentos. Entretanto a interpretação do contorno sugere que o rejeito é pouco variável e com aproximadamente 15 metros. A posição do falhamento é assumida como o limite do desenvolvimento do painel de mineração.

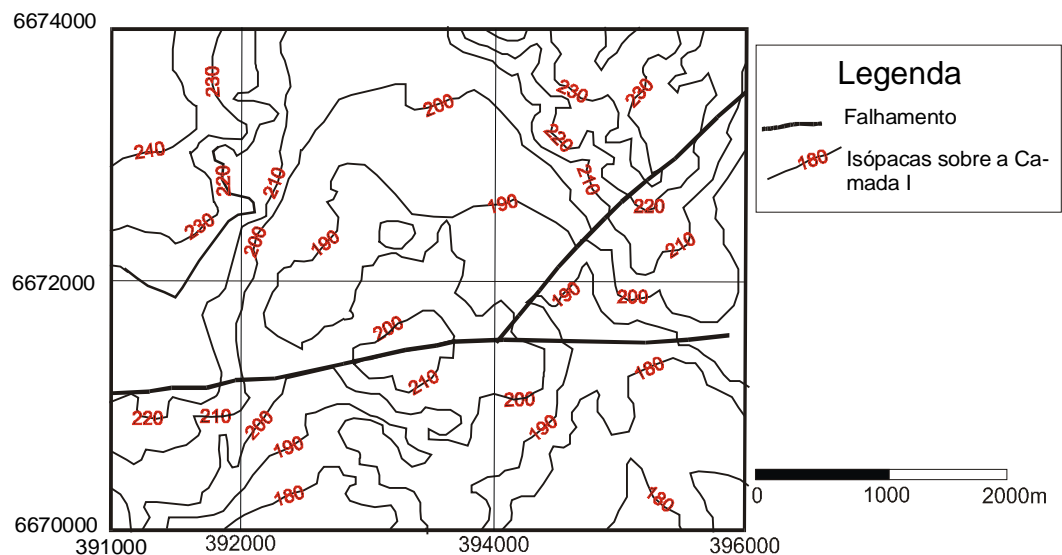


FIGURA 3.7 - Mapa parcial das isópacas sobre a camada I, salientando dois falhamentos, modificado de CRM (1980).

O outro sistema de fratura de grande importância é o sistema de partição no carvão (“cleat system”). Existe um sistema bem claro de partição que é medido com uma direção azimutal de 140° e com mergulho aproximadamente vertical. Este

conjunto de fraturas, originadas como resultado de processo tectônico, apresenta um espaçamento médio em torno de 10cm.

3.8.2.2 - Dobramentos

Os eventos tectônicos por movimentos verticais de reativação em falhas e fraturas, que existiam antes dos sedimentos carbonosos terem sido depositados, propiciam o aparecimento de feições de dobras. No relatório interno da CRM este tipo de dobra é referido como “drape fold”, terminologia que não é usada tradicionalmente no meio geológico. Estes dobramentos se desenvolvem, quando sedimentos mais jovens, ainda pouco litificados, encobrem rochas fraturadas do embasamento. Desta forma, quando um bloco do embasamento se move verticalmente em relação ao outro, o sedimento é deformado. A deformação que é experimentada pelo sedimento é maior na região do plano de falha dos blocos do embasamento. Como resultado, os eixos das dobras tendem a seguir a orientação dos limites dos blocos. Os falhamentos geralmente acompanham o desenvolvimento de dobras embora as dobras é que são subordinadas aos falhamentos.

O formato espacial da camada I na concessão Leão II é ilustrado no modelo digital da capa da camada I, (figura 3.8). Este modelo mostra que, exceto, ao longo da margem leste, existe uma tendência geral para o mergulho da camada em direção NW, com média aproximadamente de 1 grau; ao longo da margem leste a camada parece mergulhar para oeste com ângulos variando de 2 a 3 graus.

As linhas de contorno estrutural ou, simplesmente contornos estruturais são utilizados para expressar a forma geométrica de uma superfície estrutural qualquer e, através do seu emprego, é possível representar-se, com razoável grau de exatidão, a configuração de uma dobra, de uma superfície de falha, de um veio ou de camada mineralizada. Nestes casos, as linhas de contorno não representam a topografia do terreno, mas sim a morfologia real da estrutura antes de esta ter sido atingida pelos processos erosivos (Loczy & Ladeira, 1976).

O mapa de contorno estrutural mostra a localização e a tendência lateral dos eixos de dobramentos e o mergulho das camadas. É observado que existe uma tendência dos eixos serem orientados nas direções NW e NE mas podem mudar de direção abruptamente.

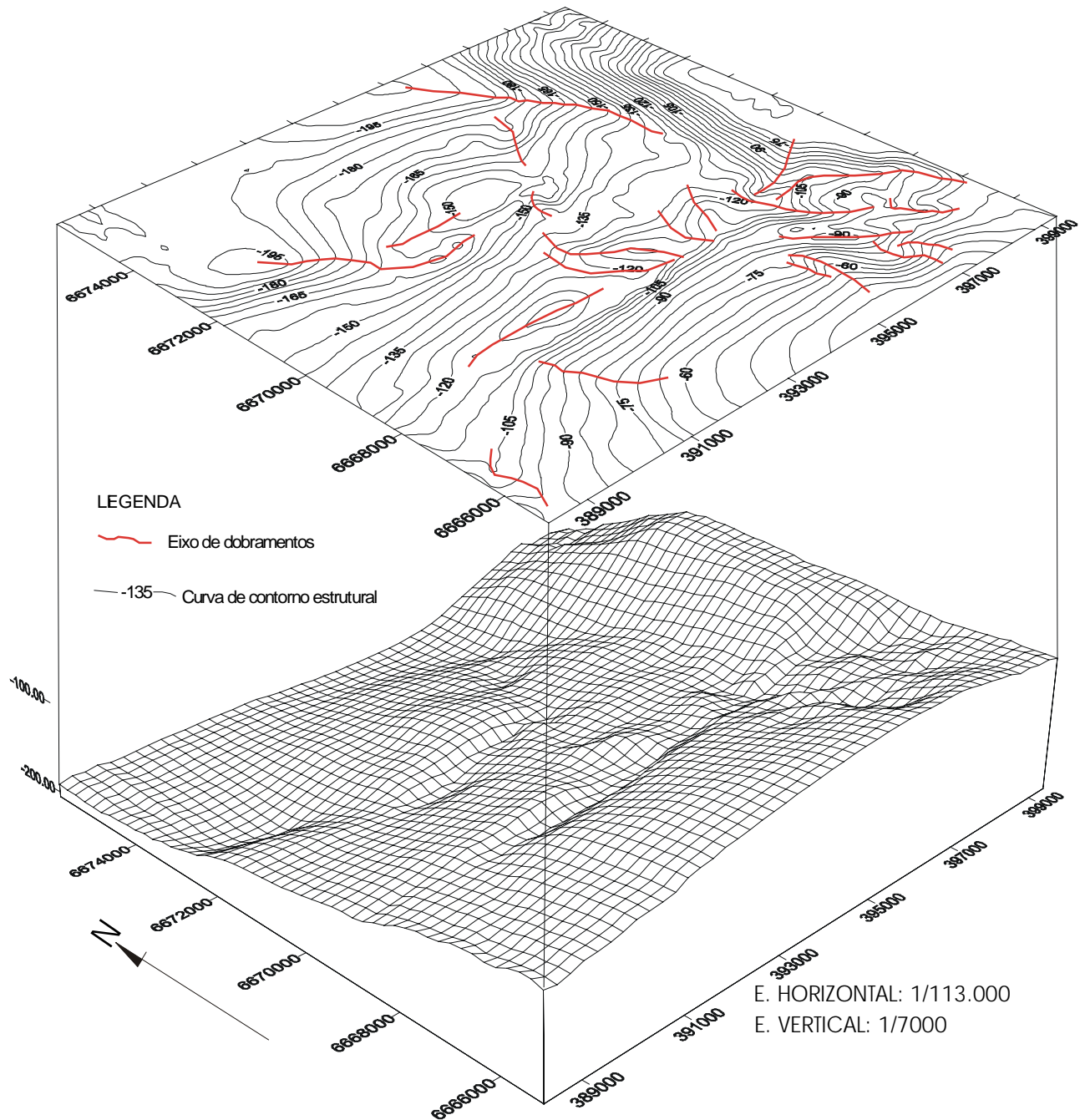


FIGURA 3.8 - Mapa de contorno estrutural (parte superior) e modelagem digital das curvas de contorno estrutural da capa da camada de carvão inferior (I). Observa-se o mergulho NW.

3.9 - Geomorfologia

3.9.1 - A área de estudo no contexto da Depressão Periférica do RS

A região de estudo está enquadrada no domínio da Superfície Aplainada da Campanha, segundo Ab'Saber, 1969, em seu estudo geomorfológico das superfícies aplainadas na área territorial do estado do Rio Grande do Sul. Trata-se de uma superfície interplanáltica típica, especialmente desenvolvida entre a zona de transição topográfica entre o escudo uruguaio-sulriograndense, (figura 3.9), e as estruturas sedimentares paleozóicas da margem sudeste da Bacia do Paraná. A superfície da Campanha tem seu núcleo básico na área central de exposição dos terrenos sedimentares carboníferos, permianos e triássicos da depressão periférica gaúcha.

Cita o mesmo autor, que embora barrado em sua expansão, de um lado pelo escudo e do outro pelas escapas basálticas, o aplainamento forçou, através da marcha de uma pedimentação vigorosa, os dois domínios de bordos de erosão, conseguindo penetrar um pouco no escudo e um pouco na zona basal marginal dos derrames. Tudo indica que o plano de erosão interplanáltico tenha sido iniciado por um sistema de drenagem peculiar a um sistema de cuevas concêntricas de frente ligeiramente interna, em obediência ao aspecto semi-dômico das estruturas paleozóicas e mesozóicas regionais. Localmente o modelo genético do relevo de cuevas regional se processou dentro do seguinte esquema: um quadro regional de estruturas homoclinais (monoclinais), previamente aplainadas, posteriormente sujeito a um esquema de tipos genéticos de cursos d'água peculiares às regiões de cuevas.

Não havendo depósitos correlativos nos mais altos coxilhões que hoje representam os remanescentes desta superfície, porém existindo pedimentos rochosos muito bem preservados, além do que uma impressionante homogeneidade altimétrica para com os mais diferentes quadrantes deste pediplano, que corta as deformações geológicas mais diversas, pode-se garantir que se trata de uma superfície interplanáltica elaborada sob condições de pediplanação exorreica. Certamente, os produtos de erosão oriundos da longa degradação desta superfície aplainada foram removidos para áreas bem distantes, através de uma rede de drenagem pioneira, imediatamente anterior à

atual, muito embora de posição topográfica mais elevada e de regime hidrológico inteiramente diverso.



FIGURA 3.9 - Fotografia da região de estudo mostrando em primeiro plano a Depressão Periférica e no horizonte o Escudo Sulriograndense. A linha tracejada marca o nível de aplainamento da Superfície da Campanha.

Os vales dos rios Jacuí e Ibicuí, na depressão periférica só se definiram, tal como se apresentam hoje, após a generalização desta notável superfície aplainada neogênica, conclui Ab'Saber, op cit.

O relevo da depressão periférica é suavemente ondulado, variando entre 15 a 150 metros de altitude. Entre as colinas e os relevos tabuliformes, interpenetram-se seções de planície aluviais, onde a drenagem é meândrica ou, mesmo, desorganizada. Nos contatos com os leitos fluviais, quer no curso do rio Jacuí, quer nos baixos cursos dos seus afluentes, dominam depósitos de planície de inundação, em baixos suscetíveis à freqüentes inundações, onde se formam banhados com depósitos recentes de turfa.

A morfologia de perfis suaves corresponde a um baixo platô dissecado, tendo como eixo uma extensa planície fluvial inundável, de maior amplitude à jusante da confluência do rio Vacacaí, com o rio Jacuí.

A Depressão Periférica do RS é delimitada pelos leques aluviais e os pedimentos da formação Serra Geral, ao norte (Figura 3.10), e pelos patamares inferiores do Escudo representados pelas serras do Sudeste, ao sul. São aspectos transicionais entre duas unidades e porque a depressão periférica deve sua gênese a uma evolução intimamente ligada à rede hidrográfica de uma extensa bacia fluvial: a do Jacuí (Gusmão et al., 1990.)



FIGURA 3.10 - Fotografia vista de sul para norte, mostrando a Depressão Periférica e ao fundo a Formação Serra Geral.

A planície é mais ampla às margens do rio Jacuí, acentuando a dissimetria da depressão periférica, quanto a densidade hidrográfica e a padrões de drenagem. Enquanto os afluentes da margem esquerda encontram-se em estágio mais avançado de dissecação sobre a encosta, adentrando-a, os afluentes da margem direita apresentam padrões retilíneos, como por exemplo o Arroio dos Ratos que, apesar de extenso, tem direção norte-sul até a cidade homônima, onde inflete para nordeste, ao desembocar no rio Jacuí.

4 - SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto (SR) é definido como aquisição de informação, sobre condições e/ou estado, de um alvo por um sensor que não está diretamente em contato com ele (Asrar, 1989).

Novo (1992) define Sensoriamento Remoto como sendo uma utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos para transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc., com objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações.

Meneses & Ferreira Júnior (1995) conceituam SR como uma medida de troca energética resultante da interação da radiação eletromagnética de um determinado comprimento de onda com os objetos da superfície terrestre.

Um sensor em SR é composto por um conjunto de equipamentos que são capazes de captar a energia eletromagnética, e transformá-la em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente.

Quanto a origem da fonte de energia, os sensores podem ser classificados como ativos e passivos. Os primeiros, geram e enviam um sinal em direção ao alvo a ser analisado, recebem e registram o sinal de retorno, após sua interação com o alvo. Como exemplo, podemos citar os sensores de microondas ou radar. Os sensores passivos, não geram nem transmitem um sinal, entretanto, eles detectam e registram energia eletromagnética refletida ou emitida por um alvo. São exemplo as câmeras fotográficas e os radiômetros.

Outra forma de classificar os sensores é quanto ao tipo de transformação da radiação detectada. São denominados de não-imageadores, quando não fornecem uma imagem do alvo sensoriado, mas sim uma resposta em forma de dígitos ou gráficos, e temos como exemplo o radiômetro. São classificados como imageadores quando fornecem uma imagem da superfície sensoriada.

Para Novo (op. cit.) os sensores imageadores podem ser classificados em função do processo de formação de imagem, em sensores fotográficos, sensores de varredura eletro-óptica e radares de visada lateral. Neste trabalho, usaremos as imagens do LANDSAT 5 TM, que é um sensor de varredura eletro-óptica.

Em atividade desde 1984 a plataforma LANDSAT 5 transporta o sensor TM com sistema de imageamento eletro-óptico do tipo de varredura mecânica. Os detectores do TM estão arranjados em forma matricial de 16 X 6 fotodetectores de silício (bandas 1, 2, 3, e 4) e de antimoneto de índio (bandas 5 e 7) e ainda 4 detectores termais de telureto de mercúrio-cádmio (HgCdTe) para a banda termal.

A tabela 4.1 mostra as principais características orbitas do sistema LANDSAT 5. E a tabela 4.2 mostra as resoluções espectrais e espaciais do sensor TM.

TABELA 4.1 - Órbita e cobertura do satélite Landsat 5

DISCRIMINAÇÃO		LANDSAT 5
ÓRBITA	Circular	705 km
	Quase Polar	98,2°
	Heliossíncrona - Passagem pelo Equador	9:45 hs
COBERTURA	Período de 1 passagem	99 min.
	Distância entre 2 órbitas	2.752Km
	Período cobert. completa	16 dias
	Número total de órbitas	233
	Varredura na superfície	185 X 185 km
	Número de órbitas/dia	14 +9/16
	Sentido de deslocamento	Norte/Sul
	Recobrimento lateral no Eq.	7,6%

TABELA 4.2 - Bandas e resoluções espectrais e espaciais do sensor TM

BANDA	FAIXA ESPECTRAL(μm)	DENOMINAÇÃO	RESOLUÇÃO (m)
1	0,45 – 0,52	azul	30x30
2	0,52 – 0,60	verde	30x30
3	0,63 – 0,69	vermelho	30x30
4	1,55 – 1,75	IV próximo	30x30
5	2,08 – 2,35	IV médio	30x30
6	10,4 – 12,5	IV termal	120x120
7	2,08 – 2,35	IV médio	30x30

Entre os principais sensores, aplicados ao estudo do uso do solo e cobertura vegetal, atualmente em órbita, podem ser destacados, além do o sensor TM - Thematic Mapper a bordo do LANDSAT 5, o sensor AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer a instalado do NOAA , o sensor HRV - High Resolution Visible que faz

parte do satélite SPOT, Sensor HRIS - High Resolution Interferometer Sounder instalado na série iniciada pelo GOES 8.

4.1 - Características das imagens de sensores orbitais de varredura

As imagens de sensores remotos orbitais estão disponíveis no formato digital e são constituídas por um arranjo matricial de seus elementos. Cada elemento desta matriz tem sua posição definida pelo sistema de coordenada (linha, coluna). A este elemento individual é dado o nome de *pixel*, derivado de “*picture element*”

O elemento individualizado *pixel* possui um atributo numérico chamado “*z*”, que representa a média da energia refletida ou emitida pelos materiais que compõem a cena da superfície imageada equivalente ao tamanho do pixel. O atributo numérico varia de 0 a 255 (do branco ao preto) e é associado ao nível de cinza, como será melhor discutido a seguir.

4.2 - Resoluções de uma imagem LANDSAT 5 TM

4.2.1 - Resolução espacial

É o poder de discernimento espacial do sensor, ou seja, a capacidade de “enxergar” objetos na superfície da terra. Quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial. A definição da resolução espacial do sensor é através da construção geométrica do seu campo de visada instantâneo (IFOV), que representa a área vista no terreno num determinado momento e de uma maneira simplificada representa o tamanho do pixel. Como pode ser visto na figura 4.1, o IFOV do sensor TM é de aproximadamente 8,8”.

4.2.2 - Resolução espectral

A resolução espectral mostra a que segmentos do espectro eletromagnético (bandas) o sensor é sensível e ainda qual a largura do comprimento de onda da faixa sensibilizada. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo maior é

a resolução espectral do sensor. As 7 bandas do TM e seus respectivos intervalos são mostrados na tabela 4.2.

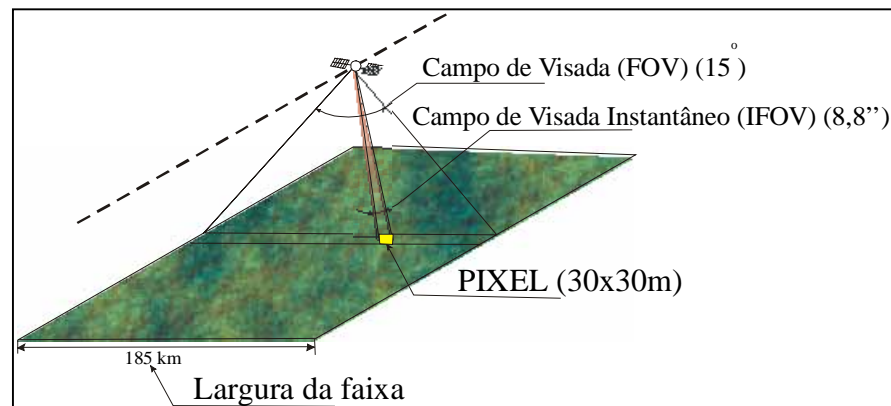


FIGURA 4.1 - Representação esquemática, sem escala, do campo de visada, campo de visada instantâneo e da cobertura do 'pixel' da imagem no terreno.

4.2.3 - Resolução radiométrica

Para Crósta (1993), a resolução radiométrica é dada pelo número de níveis digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. É expressa em termos de dígitos binários, ou bits. O sensor TM do LANDSAT 5 tem uma resolução radiométrica de 8 bits ou um byte. Desta forma pode registrar 256 (2^8) níveis de cinza, de 0 para preto até 255 para o branco. O valor do nível de cinza, atributo do pixel, é chamado de número digital (ND) ou contador digital (CD).

4.2.4 - Resolução temporal

É o tempo que o satélite leva para passar pelo mesmo ponto em duas passagens consecutivas sobre a superfície da terra. O LANDSAT 5 tem uma resolução temporal da ordem de 384 horas ou 16 dias.

4.3 - Comportamento espectral de alvos

Conforme Steffen et al. (1996) o fluxo de radiação eletromagnética (REM) ao interagir com um objeto pode ser parcialmente refletido, absorvido e transmitido. Os

fluxos resultantes têm valores que dependem das propriedades do objeto. A lei da conservação da energia permite escrever que:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (4:1)$$

ou seja: o fluxo incidente (ϕ_i) será igual ao fluxo refletido (ϕ_r) mais o fluxo absorvido (ϕ_a) e mais o fluxo transmitido (ϕ_t). Esta equação sendo normalizada sobre o fluxo incidente resulta:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (4:2)$$

onde as razões adimensionais ρ , α e τ são denominadas de reflectância, absorptância e transmitância respectivamente.

Pode-se medir a reflectância nas faixas do espectro correspondente ao visível e infravermelho próximo e construir um gráfico onde aparece a reflectância no eixo y e as faixas no eixo x. Selecionando um conjunto de bandas bem estreitas e adjacentes consegue-se um gráfico conhecido como “assinatura espectral” que representa de forma mais detalhada o resultado da interação da energia radiante com a amostra. A figura 4.2 mostra as assinaturas espectrais dos principais alvos na superfície da terra.

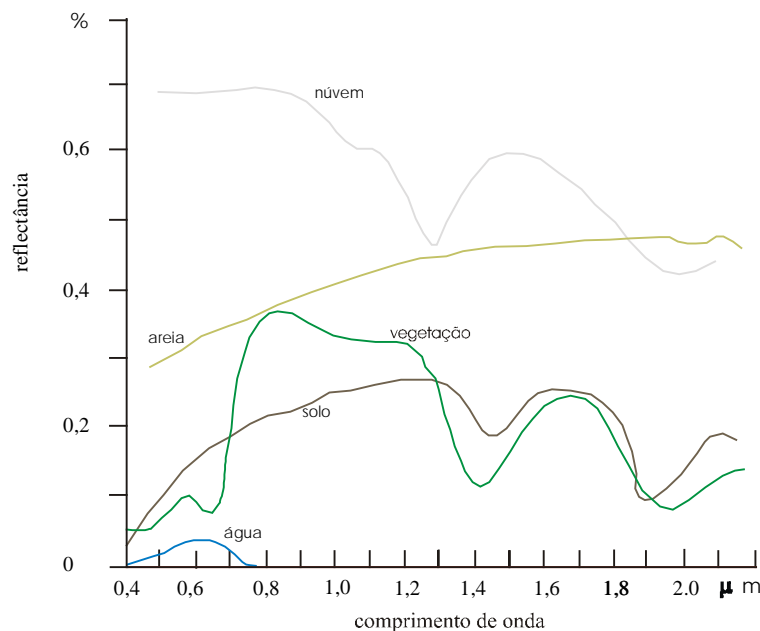


FIGURA 4.2 - Assinaturas espectrais dos principais objetos terrestres, modificada de Steffen et al. (1996).

Para o estudo do comportamento espectral do alvo é necessário considerar os parâmetros geométricos do momento de aquisição dos dados, como: ângulo de iluminação (ângulo zenital da direção solar incidente), ângulo de visada (ângulo zenital da direção de visada do sensor), os ângulos azimutais do sol e sensor e a altitude do sensor.

Entre os principais alvos que apresentam característica particulares, a vegetação, tem sua interação com a REM representada pelas folhas, onde na faixa do visível (0,4 a 0,7 μm) a maior parte da mesma é absorvida. Os responsáveis por esta absorção no azul e vermelho são os pigmentos tipo clorofilas , carotenos e xantofilas. Na região de 0,7 a 1,3 μm a estrutura celular responde pelo aumento da reflectância atingindo aproximadamente 30%. E de 1,3 a 3,0 μm a reflectância é decrescente em função do teor de água existente no vegetal.

Para Moraes (1996), a água em seu estado líquido apresenta baixa reflectância entre 0,38 a 0,7 μm , absorvendo toda a REM acima de 0,74 μm . Novo apud Moraes op. cit. estudou o efeito da concentração de sedimentos na reflectância espectral da água e verificou que o aumento na concentração de sedimentos implica em um aumento da reflectância não linear e mais acentuado na faixa do vermelho.

Swain & Davis (1982) afirmam que a composição e a estrutura cristalina dos elementos minerais primários são fatores determinantes na reflectância dos solos. E que da mesma forma são relevantes o conteúdo de umidade, a quantidade de matéria orgânica e óxido de ferro, a presença em porcentual de argila, silte e areia e a textura superficial.

Hunt (1988) desenvolveu, em laboratório, experiências que permitiram observar o comportamento espectral de rochas das rocha ígneas ácidas (teor de $\text{SiO}_2 > 66\%$), intermediárias ($52\% < \text{SiO}_2 < 66\%$) , básicas ($45\% < \text{SiO}_2 < 52\%$) e ultra-básicas (teor de $\text{SiO}_2 > 45\%$). No geral, a reflectância, é maior proporcionalmente ao teor de SiO_2 .

4.4 - Pré - processamento da imagem

As técnicas de pré-processamento da imagem orbital têm como objetivo transformar os dados digitais brutos em dados corrigidos radiométrica e geometricamente. Quando os dados sobre a imagem são gravados pelo sensor os mesmos contêm erros de geometria e no valor do brilho do pixel. Este último é referido radiométrico e pode ser resultado do instrumental utilizado na gravação dos dados e pelo efeito atmosférico. A atmosfera adiciona componente de radiação espalhada ao sinal refletido ou emitido pelo alvo, conhecido como radiação de trajetória.

O principal erro instrumental é relacionado ao sistema de detectores, que mesmo quando nenhuma radiação está sendo detectada acusam um sinal de saída. Este fato é conhecido como corrente de escuro e é um ruído eletrônico residual do sistema a qualquer temperatura acima do zero absoluto. Neste trabalho foram realizadas correções geométricas nas imagens.

Quando adquire-se uma imagem do INPE, uma boa parte dos elementos de distorção geométrica já estão corrigidos. Podem ser de natureza sistemática ou acidental:

- 1) Rotação a terra durante a aquisição
- 2) Curvatura terrestre
- 3) Variação na velocidade, altitude e atitude da plataforma
- 4) Diferença no tempo de varredura versus velocidade do satélite
- 5) Visada inclinada

4.4.1 - Correções das distorções geométricas

Para Richards (1993) existem duas técnicas para correção das distorções geométricas. Uma é corrigir através de fórmulas individualmente cada uma das distorções desde que sejam bem conhecidas. A outra depende do estabelecimento de uma relação matemática entre o endereço do pixel na imagem e as coordenadas

correspondentes dos mesmos em uma carta topográfica. Neste trabalho utilizamos esta metodologia para a correção geométrica das imagens. O processo é também conhecido como “georreferenciamento”.

Na banda 3 da imagem, após ser realizado um processo de ampliação do histograma, com 2,5% de saturação, selecionou-se 10 pontos que sejam bem discerníveis, geralmente interseções de estradas ou caminhos. Os pontos foram escolhidos distribuídos de forma quase uniforme e de preferência nas bordas da imagem. Anotou-se o valor da linha e da coluna da imagem dos pontos selecionados. Utilizando as cartas da DSG – Folha SH-22-y-B-I-2 - Minas do Leão na escala 1/50000, identificou-se os pontos correspondentes na imagem na carta e registrou-se as coordenadas UTM norte e este. A figura 4.3 é imagem da banda 3 realçada e georreferenciada.

O processo de georreferenciamento das imagens apresentou um resíduo médio de 14,86 m, que é menor que o tamanho do pixel (30 m). A distribuição aleatória e a magnitude baixa dos resíduos evidenciaram a adequação na coleta dos pontos e no processo de transformação.

4.5 - Processamento da imagem

Após o pré-processamento deve-se realizar o processamento propriamente dito da imagem digital, que é um conjunto de operações matemáticas que têm por objetivo tornar a imagem mais adequada a uma finalidade específica. Inserem-se neste contexto os processos de realçamento e suavização de imagem. As técnicas de filtragem, referem-se também a processos de realce e suavização.

4.5.1 - Histograma da imagem digital

O histograma de uma imagem é a representação gráfica da distribuição dos níveis digitais, (figura 4.4). Se cada pixel da imagem for examinado e sua radiância ou reflectância for anotada, um gráfico do número de “pixels” com uma dada radiância

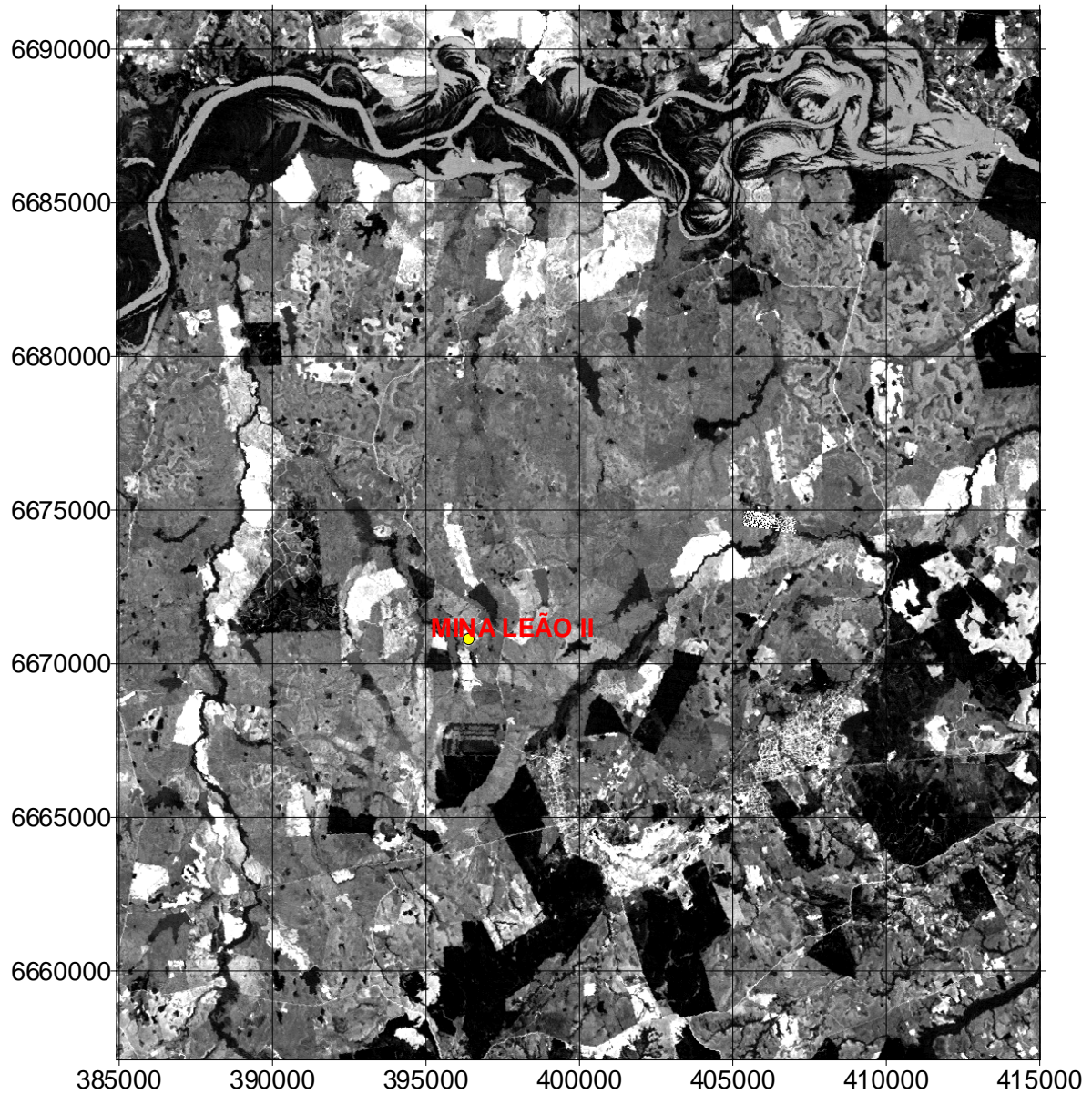


FIGURA 4.3 - Imagem georreferenciada da região na banda 3 com realce.

ou reflectância versus a sua radiância ou reflectância pode ser construído. Este gráfico é denominado histograma da imagem. De forma geral, uma imagem tem um único histograma mas o inverso não é verdadeiro já que um histograma não contém informação espacial mas somente informação radiométrica. Um ponto de crucial importância é que o histograma pode ser visto como uma distribuição de probabilidade

discreta já que a altura de uma coluna (ou barra) indica a chance de encontrar um pixel com uma particular radiância ou reflectância em algum lugar na imagem.

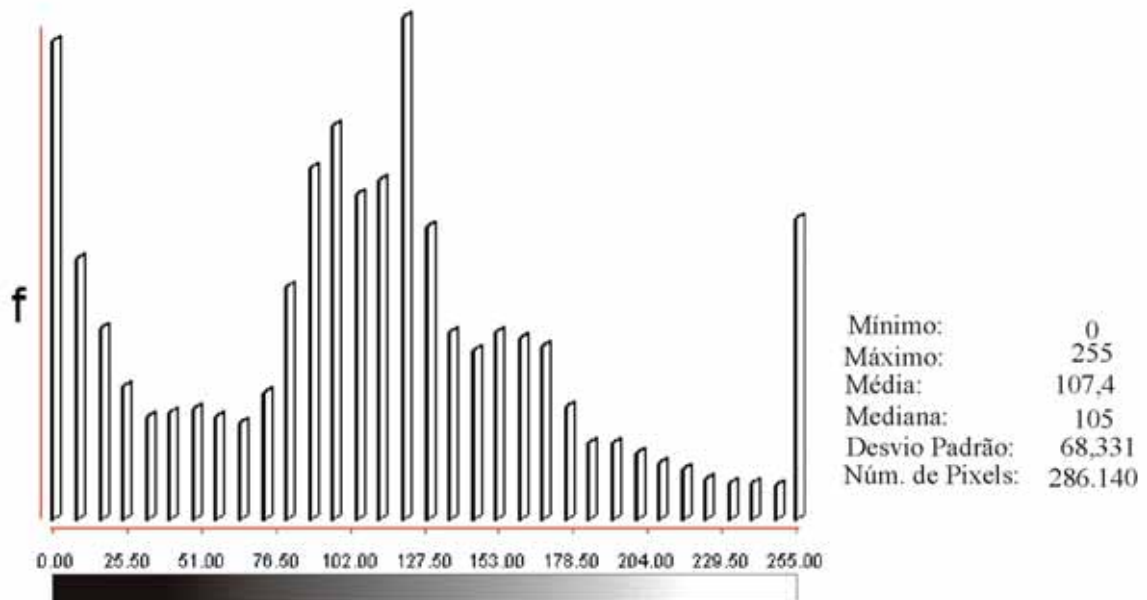


FIGURA 4.4 - Histograma da imagem mostrada na figura 4.3, banda 3 com realce.

4.5.2 - Realce da imagem

Tem como objetivo melhorar as condições visuais de uma imagem para fins de análise visual. Não aumenta o conteúdo da imagem, inclusive há perda de informação.

O contraste de uma imagem é uma medida do espalhamento dos contadores digitais em um determinado intervalo digital. Na análise do histograma de uma imagem quanto maior for o espalhamento dos contadores digitais maior será o contraste, (figura 4.5).

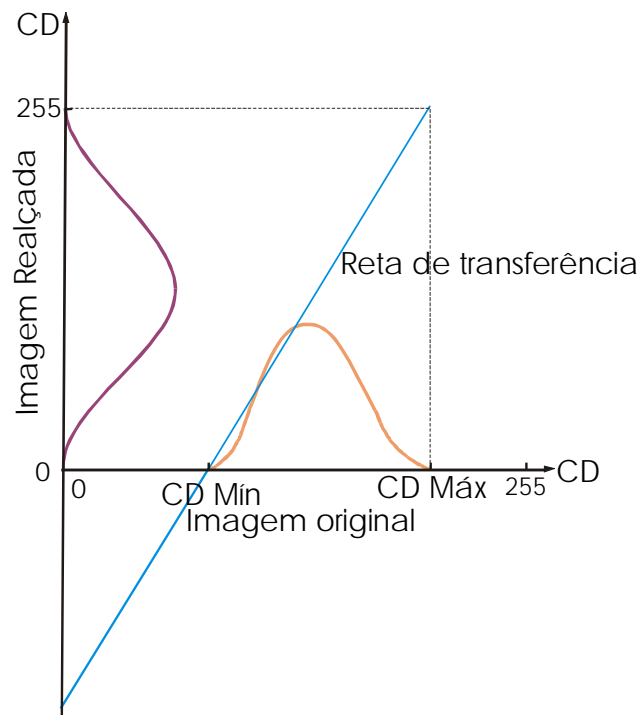


FIGURA 4.5 - Manipulação linear do histograma de uma imagem. Os contadores digitais (C D) mínimo e máximo da imagem original são “espichados” de 0 a 255. A imagem realçada terá maior variância que a imagem original.

A técnica de realce de contraste tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano, (figura 4.6). A forma mais simples de se aumentar o contraste de uma imagem é pela manipulação do histograma, através do aumento linear de contraste. Nele a função de transferência é uma reta onde apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de intersecção com o eixo x.

4.5.3 - Suavização da imagem

Tem por objetivo eliminar altos contrastes em uma imagem e por conseguinte diminuir a variância do espalhamento dos níveis de intensidade do brilho que nela ocorrem.

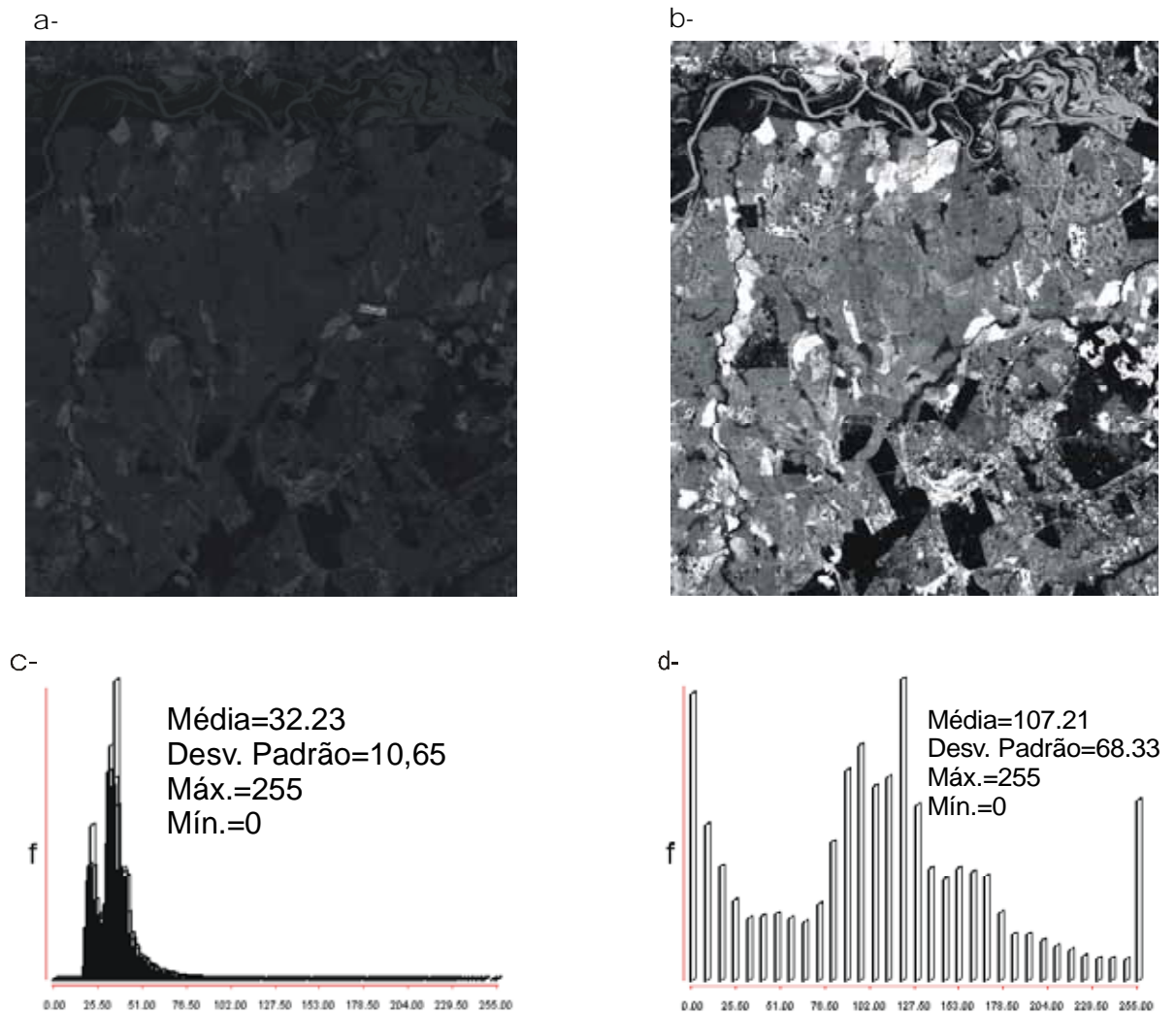


FIGURA 4.6 - a) Imagem original da banda 3 do LANDSAT 5 TM, b) mesma imagem após a aplicação da técnica de realce, c) histograma da imagem do item a e d) histograma da imagem do item b.

4.6 - Classificação digital da imagem

Neste trabalho, através da classificação digital de imagem, elaborou-se o mapa de uso e cobertura do solo da região de estudo, o qual foi intensamente utilizado no capítulo de geoprocessamento. Prakash & Gupta (1998) discutem as técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica usadas para identificação de várias classes de usos do solo. Identificaram a mudança no padrão do uso do solo,

numa seqüência temporal, nas proximidades de uma extensa mina de carvão a céu aberto em Jharia, Índia.

A classificação digital de imagens tem diversos objetivos, entre eles pode-se destacar:

- a distinção entre materiais de diferentes classes espectrais presentes em uma imagem;
- o reconhecimento das características específicas (assinatura espectral) de cada um dos elementos que compõe a imagem;
- mapear áreas da superfície terrestre que correspondem a temas de interesse;
- associar a cada pixel da imagem um “rótulo” descrevendo um objeto real (água, solo, vegetação, etc.).

4.6.1 - Tipos de classificadores.

Os classificadores que utilizam apenas a informação espectral para localizar regiões homogêneas em uma imagem são denominados “*classificadores pixel a pixel*”. Utilizando os métodos estatísticos estes classificadores podem ser separados em **paramétricos** (aqueles que utilizam métodos estatísticos para determinar uma função decisão para a separação das classes) e **não-paramétricos** (aqueles que não utilizam métodos estatísticos). Os classificadores que utilizam, junto com a informação espectral de cada “pixel”, a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos são denominados “**classificadores por regiões**”. Este tipo de classificador, procura simular o comportamento de um fotointerprete, pelo reconhecimento de áreas homogêneas na imagem, e baseia-se nas propriedades espectrais e espaciais das imagens. As propriedades espaciais e espectrais irão unir áreas com mesma textura e a informação de borda é utilizada inicialmente para separação das regiões.

4.6.2 - Tipos de classificação.

Existem essencialmente duas abordagens na classificação de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. A primeira denomina-se *classificação não-*

supervisionada, é nela que o software de classificação decide, com base em regras estatísticas, quais as classes a serem separadas e quais os pixels pertencentes a cada classe. A classificação não supervisionada da região de estudo é mostrada na figura 4.7.

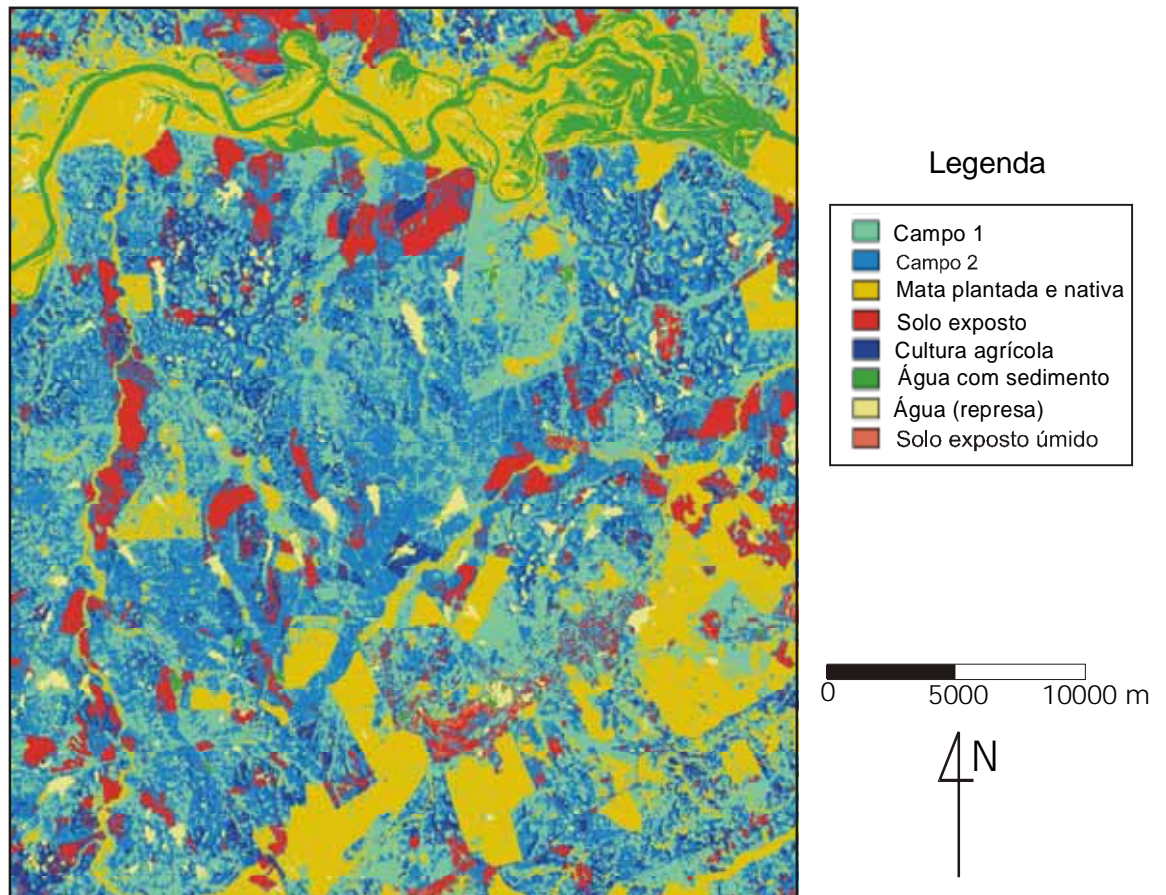


FIGURA 4.7 - Mapa da região através do processo classificação não supervisionada.

Através da classificação não supervisionada foram identificadas oito classes espectrias da área de estudo coberta pela imagem; campo 1, campo 2, mata plantada e nativa, solo exposto, cultura agrícola, água com sedimentos, represas e solo exposto úmido.

Com objetivo de elaborar o mapa de uso e cobertura do solo da região, utilizou-se o mapa originado pela classificação não supervisionada e em função de verificações de campo e operações com as classes existentes, definiu-se o mapa de uso e cobertura do solo do local de estudo (figura 4.8).

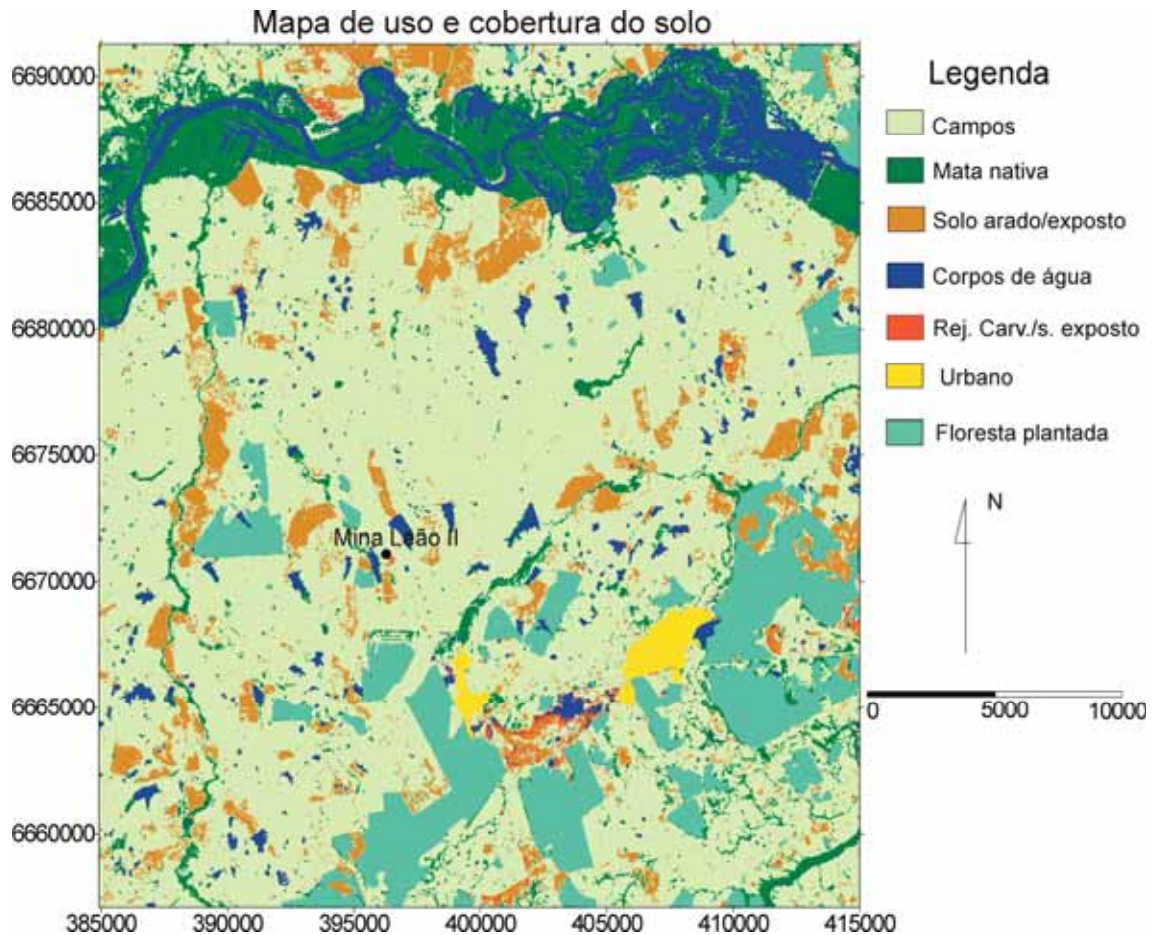


FIGURA 4.8 - Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo, derivado da imagem de classificação não supervisionada, verificações de campo e operações com imagens.

A imagem resultante apresenta as seguintes classes: campos, mata nativa, solo arado/exposto, corpos de água, rejeitos de carvão/solo exposto, urbano e floresta plantada.

O segundo tipo de classificação denomina-se *classificação supervisionada*, e nela o usuário identifica alguns pixels pertencentes às classes desejadas e deixa ao software a tarefa de localizar todos os demais “pixels” pertencentes àquelas classes, baseando-se em alguma regra estatística pré-estabelecida.

5 - MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

Salles (1985) descreve que a representação da superfície topográfica utilizando-se de computadores é realizada através de Modelo Digital do Terreno (MDT), e que esse modelo consiste na distribuição espacial e sua representação numérica de um conjunto de dados da superfície topográfica. O dado básico fundamental para a criação do modelo digital do terreno ou modelo numérico do terreno (MNT) é a existência de um mapa plani-altimétrico do terreno (figura 5.1), ou a existência de um levantamento topográfico do terreno.

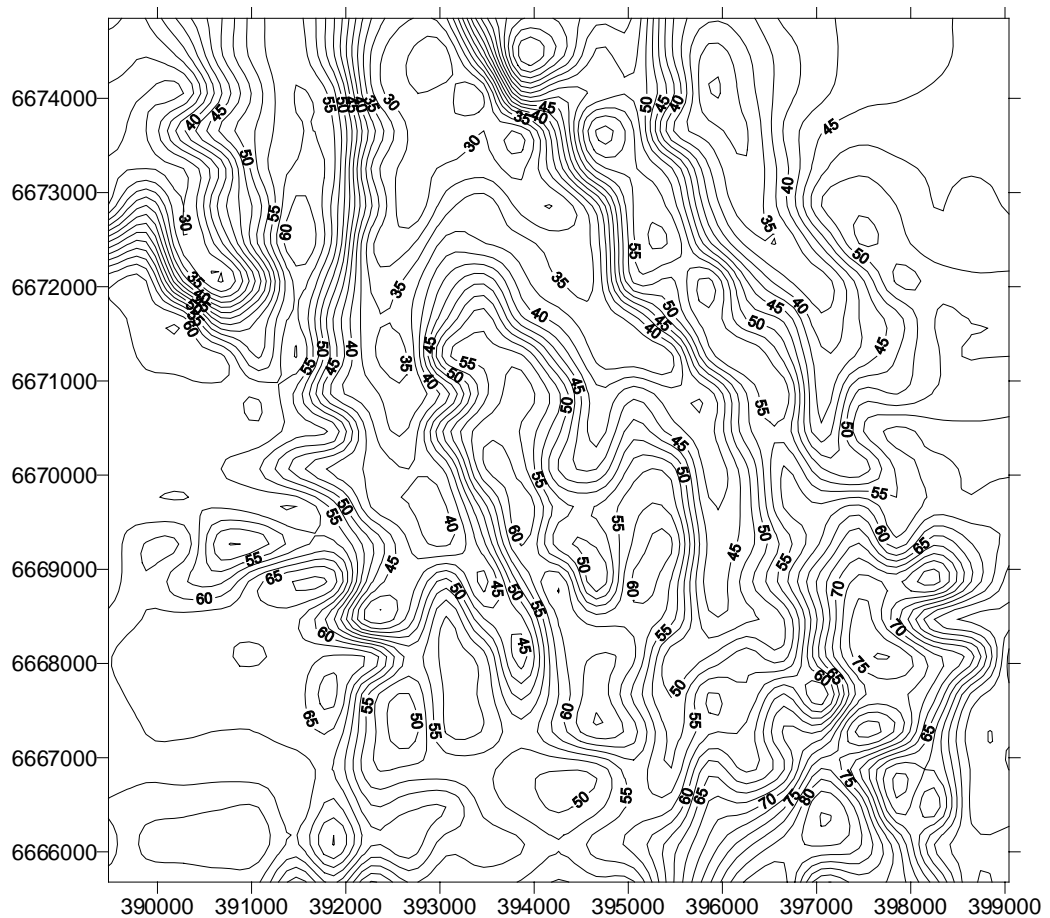


FIGURA 5.1 - Mapa plani-altimétrico da região de estudo, com vista superior e projeção ortogonal.

Felgueiras & Erthal (1989) conceituam Modelo Digital do Terreno como sendo uma representação da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real. De acordo com esses autores, uma das características é a altimetria, e o processo de geração do modelo é dividido em duas fases: uma fase de aquisição de amostras compreendida de digitalização de um conjunto de pontos e uma segunda fase que é a elaboração do modelo propriamente dito. Os autores citam que o modelo numérico do terreno é gerado a partir de um conjunto de pontos com coordenadas $((x_i, y_i, z_i)$, com $i=1, 2, \dots, n$) amostrados da superfície real.

Os autores também definem o Modelo Numérico do Terreno como sendo a variação de uma determinada característica associada a cada ponto de uma porção do terreno. A modelagem do terreno, por funções matemáticas, tem possibilitado através de pontos de controle, criar superfícies ou mesmo ajustar curvas que descrevem com fidelidade a distribuição espacial desses pontos. Sendo assim, a utilização de pontos de controle, "SOFTWARE" específico, e uso de microcomputadores tem permitido modelar curvas e superfícies.

O Modelo Digital do Terreno (MDT), também conhecido como Modelo Digital de Elevação (MDE), representativo de uma determinada superfície, permite a obtenção de informações que possibilitem o planejamento da superfície, estudando-se a altimetria do terreno (energia do relevo), o padrão de drenagem da superfície, a textura de drenagem, a densidade de drenagem, a orientação de drenagem entre outras variáveis utilizadas no manejo de bacias hidrográficas.

Geralmente as variáveis são obtidas por procedimentos tradicionais onde são utilizadas cartas topográficas em escala adequada, curvímetros, réguas e outros instrumentos acessórios. Essa metodologia convencional de obtenção das variáveis torna-se limitada, quando a região de estudo é extensa ou então quando o fator tempo é considerado.

A fase de aquisição das amostras compreende a digitalização de um conjunto de pontos, (x_i, y_i, z_i) , da superfície real do trabalho. Esta fase é determinante na qualidade final do modelo gerado. A amostragem pode ser regular ou irregularmente

espaçada, mas não deve ser aleatória. Deve-se escolher como amostra, aqueles pontos representativos do comportamento da característica do terreno que se quer modelar. A fase de elaboração do modelo, envolve a geração de uma grade regular, a partir do conjunto de amostras que foi digitalizado.

5.1 - MDT da região de estudo

O modelo digital do terreno na região de estudo, (figura 5.2), foi elaborado a partir de uma mapa topográfico da CRM, restrito a área da concessão, com equidistância vertical de 2 metros e na escala 1/10000. A observação do MDT mostra que as maiores elevações se situam no sul da área, principalmente no sudeste. Podemos classificar o relevo, segundo os tipos de relevos adotados por Garcia & Piedade (1978), como sendo predominantemente do tipo ondulado, pois os desníveis em sua maioria não ultrapassam os 20 metros. As encostas são do tipo planas a levemente convexas.

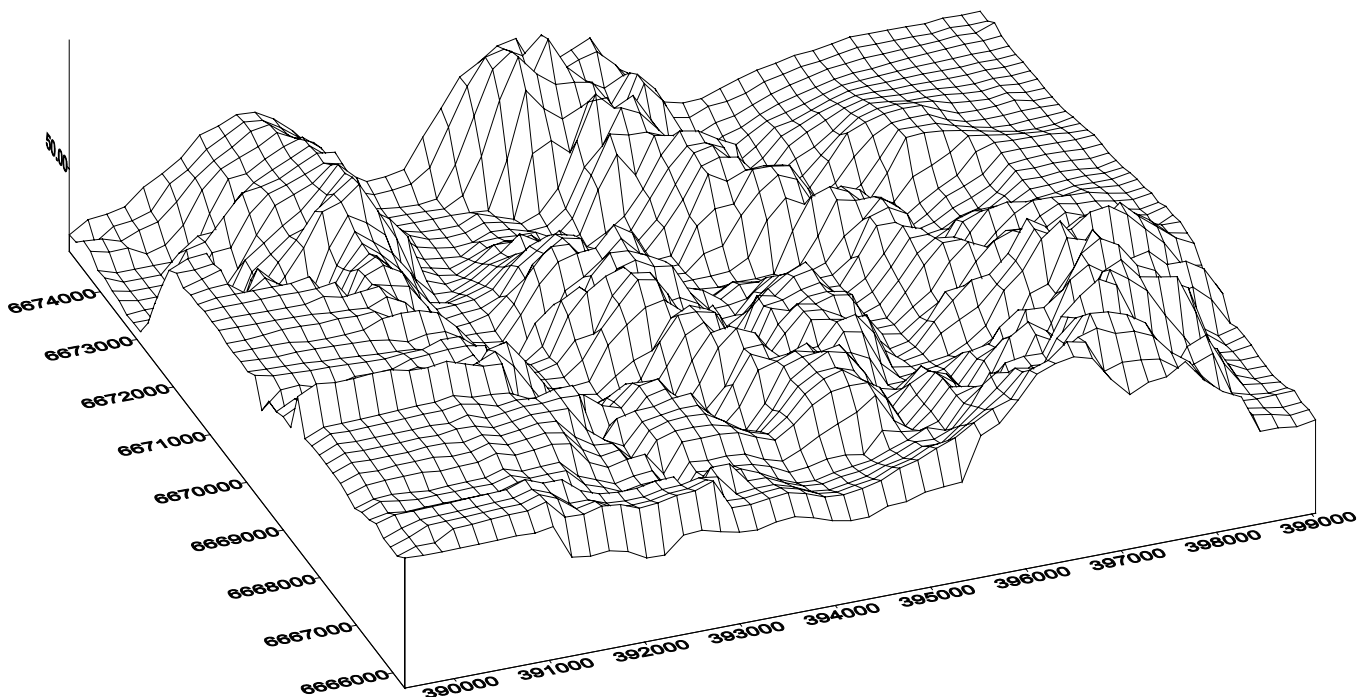


FIGURA 5.2 - Modelo digital do terreno no formato vetorial observado do sul a 20° de direção com a linha norte-sul ($S 20^\circ O$) e com um ângulo de inclinação de 30° com o horizonte. Escalas: eixo $y = 1/12.500$, eixo $x = 1/8.000$ e eixo $z = 1/1.500$.

A geração final do MDT foi nos softwares Idrisi e Surfer. Pode-se visualizar a modelagem digital do terreno também na forma de imagem, (figura 5.3), ou ainda através do relevo por sombras utilizando níveis de cinza (figura 5.4).

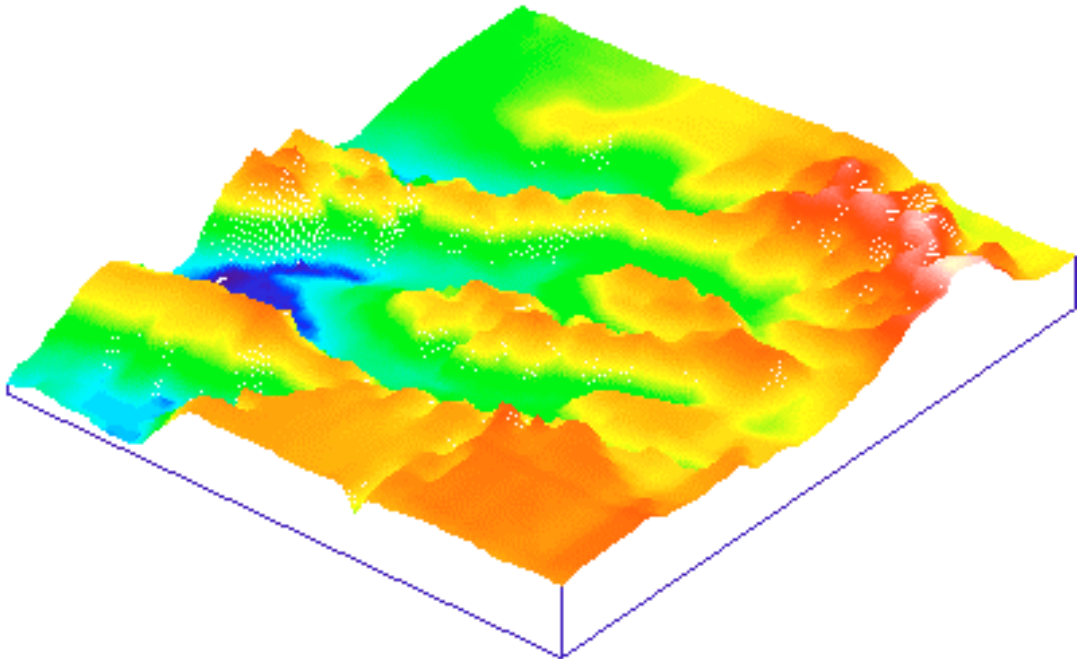


FIGURA 5.3 - Modelagem digital do terreno no formato imagem, observada do sul, com vista de 50° com norte-sul (S50°E) e com inclinação de 50° com o horizonte.

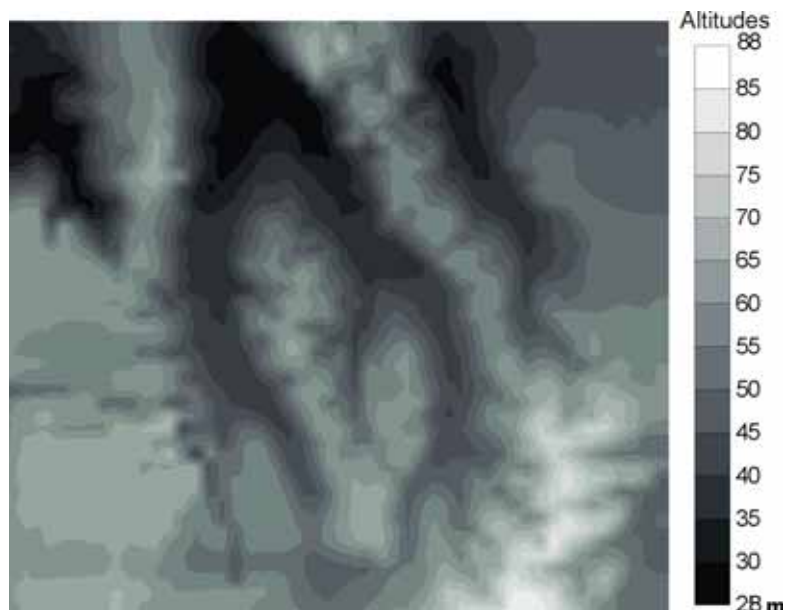


FIGURA 5.4 - Imagem do relevo através de níveis de cinza.

A vantagem de representar o relevo através de imagens, em relação ao formato vetorial, é que as imagens mostram a continuidade espacial de forma gradativa, enquanto que na forma vetorial o relevo é mostrada através de linhas separadas umas das outras, não havendo informação entre as linhas.

5.2 - Importância do MDT na área de estudo.

A representação do terreno da região de estudo na forma de um MDT possui várias aplicações importantes, dentre as quais, podemos citar:

- elaboração de mapas digitais topográficos;
- ferramenta para corte e aterro em projetos de estrada e mineração;
- planejamento de estradas e barragens, e
- confecção de mapas de declividade, perfis, relevo de sombras (figura 5.4) e mapas de orientação de vertentes (figura 5.5).

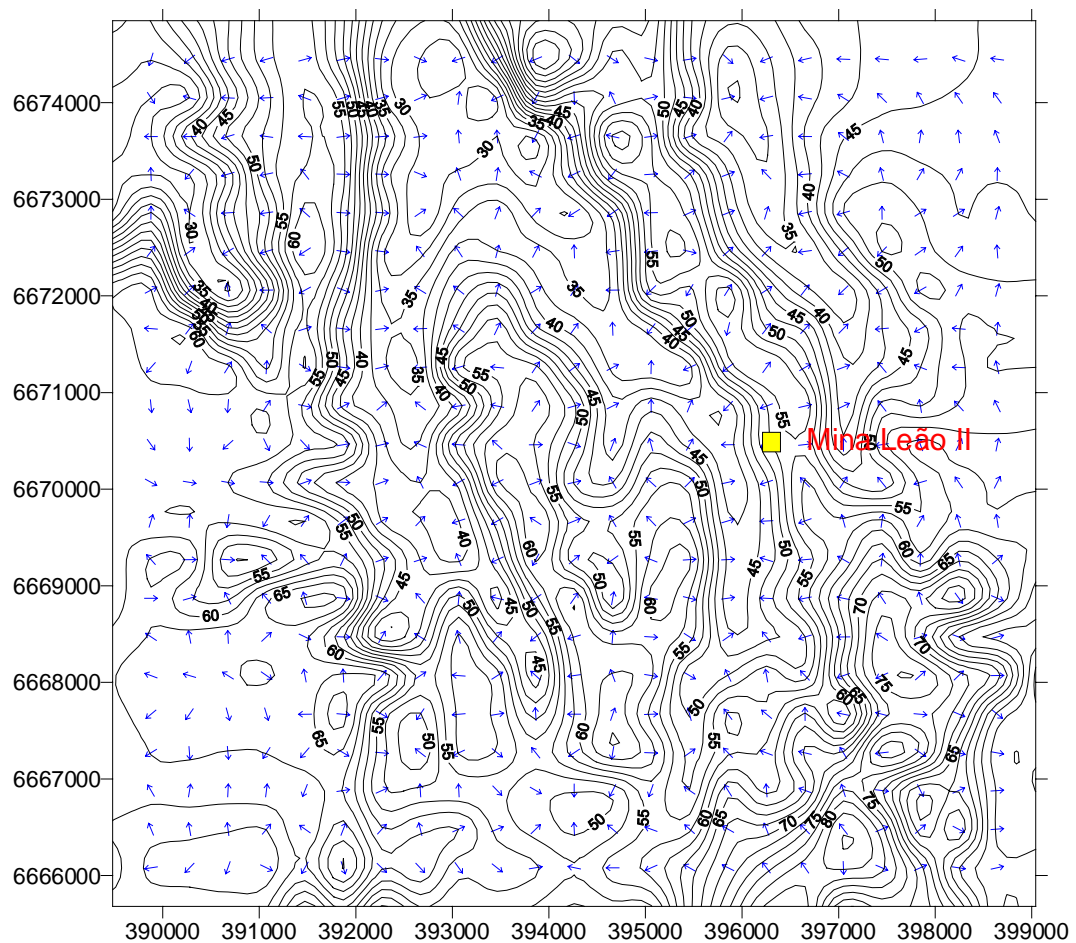


FIGURA 5.5 - Mapa de orientação das vertentes na concessão mineral. As setas indicam o sentido do fluxo da drenagem.

A elaboração do mapa de orientação das vertentes, conhecido também como mapa de aspecto, ou seja, o mapa que indica a direção de maior declividade das encostas é uma ferramenta útil para o projeto de mineração. A direção de maior declividade das encostas é a direção que o fluxo de água deverá seguir, seja esta água de origem natural (chuvas) ou de origem artificial, como as águas provenientes do subsolo. Com os dados das altitudes do terreno, elaborou-se o mapa de aspecto da área da concessão mineral. Este mapa é útil no planejamento da drenagem da mineração e para o planejamento de barragens.

Neste trabalho a modelagem numérica do terreno teve principal importância na obtenção do mapa de declividades do terreno. Este mapa associado a outras informações foi utilizado no capítulo de Geoprocessamento.

6 - GEOPROCESSAMENTO

Segundo Câmara & Medeiros (1996), o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica.

Esta tecnologia, influencia de maneira crescente nas áreas de Geociências, Análise de Recursos Naturais, Agronegócios, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional.

6.1 - Sistemas de informação geográfica - SIG

As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Utilizam-se as informações resultantes para planejamento e tomada de decisões. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Utilizando as ferramentas computacionais, chamadas de SIG, o geoprocessamento tem como função principal armazenar, recuperar e analisar mapas em computador. Por tal motivo é utilizado como uma importante ferramenta de apoio, para abordagem na questão gerencial, quando implica na tomada de decisão sobre questões ligadas a utilização adequada do espaço físico.

Felgueiras & Erthal (1989) conceituam SIG como sendo bancos de dados capazes de capturar (adquirir), armazenar, recuperar e manipular informações referenciadas geograficamente provenientes de imagens, mapas e modelos numéricos do terreno.

Um SIG possui basicamente três importantes componentes, devendo os mesmos apresentarem compatibilidade e estarem ligados entre si. Para que o sistema funcione, os componentes devem ser: “HARDWARE”, “SOFTWARE” e uma estrutura de dados apropriada.

Castaneda (1989) comenta que a literatura especializada propõe uma série de variantes para a definição de um SIG, e que em síntese, elas convergem para o seguinte: sistema automatizado, específico para aquisição, gerenciamento, análise e apresentação de dados do espaço geoambiental.

Burrough (1986) cita que os Sistemas de Informação Geográfica são constituídos de 5 módulos. Esses módulos básicos são subsistemas que permitem as seguintes operações:

- Entrada e verificação dos dados (figura 6.1);
- Armazenamento e gerenciamento do banco de dados;
- Apresentação e saída dos dados (figura 6.2);
- Transformação dos dados e
- Interação com usuário.

A informação geográfica apresenta uma natureza dual: um dado geográfico possui uma localização geográfica (expressa como coordenada em um espaço geográfico) e atributos descritivos (que podem ser representados num banco de dados convencional). A noção de informação espacial está relacionada à existência de objetos com propriedades, que incluem sua localização no espaço e sua relação com outros objetos. Estas relações incluem conceitos topológicos (vizinhança, pertinência), métricos (distância) e direcionais ("ao norte de", "acima de").

O termo Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e numa projeção cartográfica. Os dados tratados em

geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados.

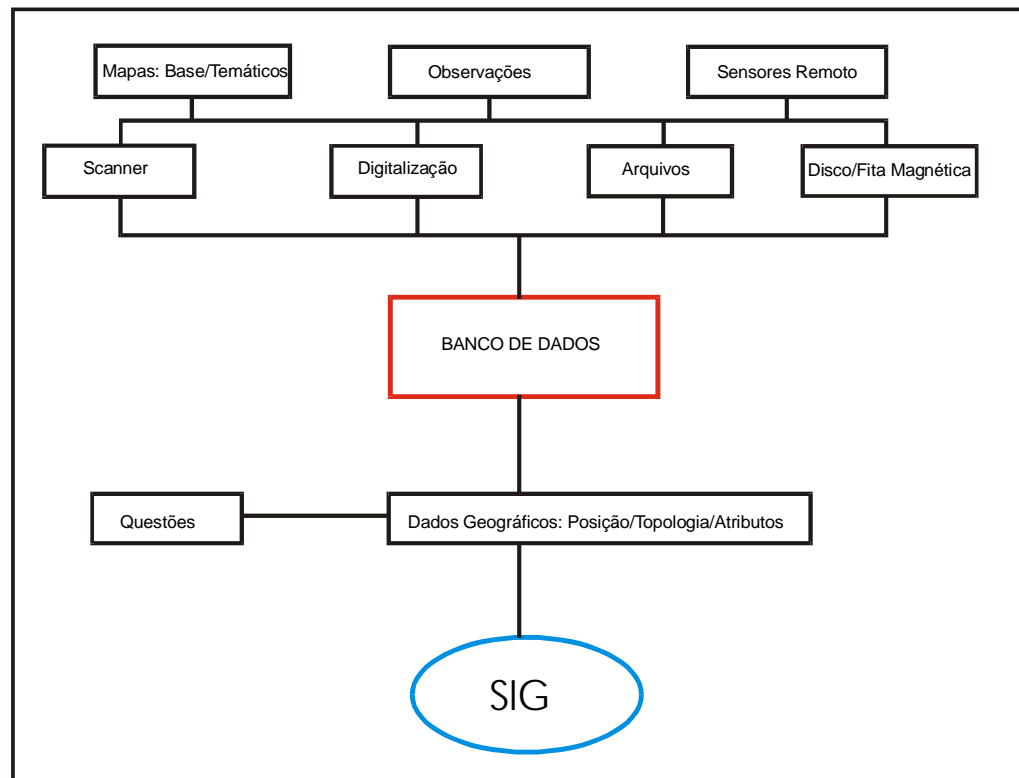


Figura 6.1 - Procedimentos de entrada de dados em um SIG.

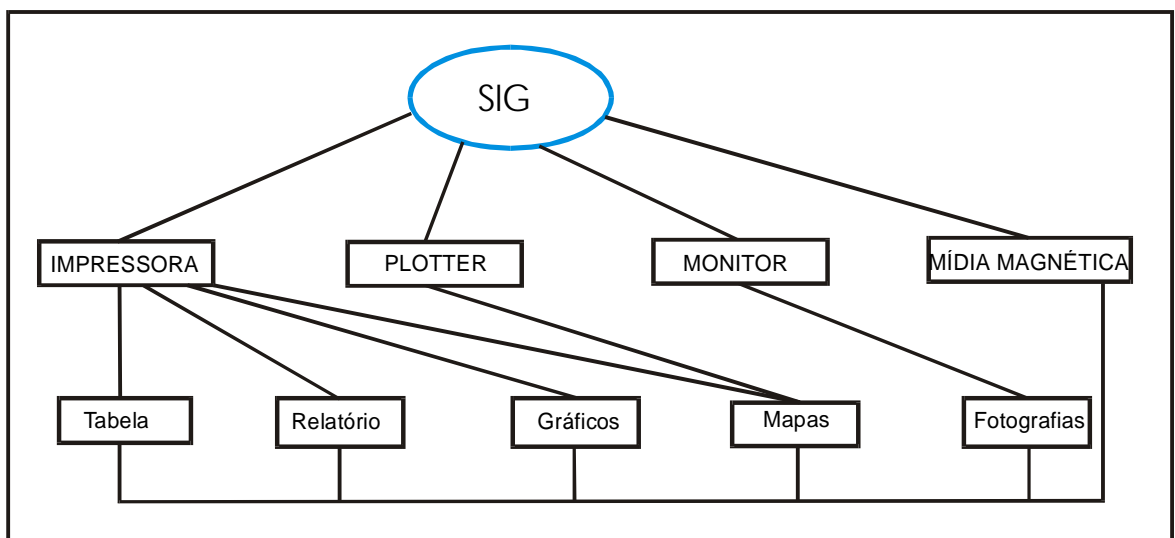


Figura 6.2 - Formas de apresentação dos dados de saída de um SIG.

O requisito de armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos representa uma dualidade básica para SIGs. Para cada objeto geográfico, o SIG necessita armazenar seus atributos e as várias representações gráficas associadas.

De acordo com Licht et al. (1996), na fase de prospecção geológica são produzidos dados espacialmente referenciados, através de coleta de diversos tipos de amostras. O objetivo é adquirir dados sobre a estruturação, composição química, mineralogia e relações espaciais dos diferentes tipos de rochas. A determinação do depósito mineral marca o fim da pesquisa. Daí é feita a estimativa das reservas por técnicas geomatemáticas. Através destas, são feitas interpolações de teores do elemento de interesse, cálculos de volumes de minérios e classificação das reservas em medidas, indicadas ou inferidas, de acordo com o grau das estimativas. Os cálculos devem ser feitos, de preferência em SIGs específicos para cruzamento e análise de informações geológicas. Isto permite fazer estudos de determinação da viabilidade ou não da implantação de uma unidade mineradora.

O método de lavra de uma jazida pode ser subterrâneo ou a céu aberto e as técnicas usadas apresentam uma característica dinâmica: grandes volumes de minério são extraídos para serem beneficiados e obter os minerais de interesse.

Dados de topografia, rede hidrográfica, vias de acesso, situação legal de áreas de pesquisa e secções verticais ou horizontais em corpos mineralizados são descritos em arquivos vetoriais. Os arquivos raster podem descrever a resposta da geologia, magnetométricos, gravimétricos, sísmicos, de radar e temáticos multispectrais.

Segundo os mesmos autores, existem várias possibilidades e alternativas do uso dos SIGs nas atividades de prospecção, pesquisa e lavra de bens minerais, entre elas:

⇒ produção de mapas vetoriais de linhas de contorno ou de imagens raster, que descrevam e identifiquem regiões com abundância e carência de elementos, ou substâncias químicas ou das medidas obtidas por sensores específicos,

- ⇒ realizações de operações booleanas típicas de processamento de imagens,
- ⇒ aplicações de filtros direcionais para detecção de lineamento geológicos, geoquímicos ou geofísicos, relacionados a corpos mineralizados e
- ⇒ construção e visualização de modelos digitais em três dimensões.

Finalmente os autores acrescentam, que os SIGs facilitam o controle e a manipulação dessa grande diversidade de variáveis. Permitem realizar complexas análises espaciais e identificar e delimitar alvos indicados de possíveis corpos mineralizados. Hoje o uso de SIGs é fator crucial para um gerenciamento ótimo de dados e informações de interesse prospectivo nas empresas de pesquisa mineral e de mineração.

6.1.1 - Estrutura dos dados em um SIG

Em geral os programas de SIG são capazes de tratar dados em dois tipos de formato: vetorial e raster.

6.1.1.1 - Formato vetorial

O formato vetorial de um objeto é uma tentativa de representá-lo tão exatamente quanto possível, procurando definir precisamente todas as posições, comprimentos e dimensões das entidades geográficas. Um conjunto de coordenadas x e y definem a superfície do objeto. Tem a vantagem de ocupar pouca memória em disco e apresentar alta fidelidade. A resolução espacial é dada pelo tamanho dos vetores.

6.1.1.2 - Formato raster (varredura)

Neste formato o objeto é representado como uma matriz composta de n linhas e m colunas, onde cada célula (também chamada elemento de imagem, elemento de matriz ou pixel) é referenciada por um índice de linha e coluna e contém um valor correspondente ao atributo estudado. Ocupa grande espaço na memória comparativamente com o formato vetorial, mas é mais adequado para representar fenômenos e grandezas que variam continuamente no espaço. A grande desvantagem do

formato raster é não representar com fidelidade as fronteiras ou limites entre feições mapeadas.

6.2 - Aplicações de SIG na área de estudo

Neste trabalho concentrou-se a aplicação de SIG dirigida a duas atividades: 1^a - escolha de locais adequados para depósitos de rejeitos de carvão e 2^a - traçados de menor custo para vias de transporte a partir da mineração. Estas atividades, não necessariamente, representam necessidades reais para a mineração. O fundamental propósito na elaboração deste estudo é desenvolver e demonstrar a metodologia para se obter os objetivos.

6.2.1 - Determinação de áreas compatíveis para depósitos de rejeitos de carvão

Como uma demonstração das possibilidades de uso das ferramentas de SGI em uma região mineira, tentou-se adaptar situações não reais, mas que não deixam ser coerentes. Neste sentido, formulou-se a seguinte hipótese: através das técnicas de geoprocessamento, escolher as áreas mais indicadas para depositar os rejeitos de carvão. Como fora explicado no capítulo 2, os critérios abordados foram:

- ✓ Não ocupar locais de preservação permanente (drenagem),
- ✓ Não ocupar local urbanizado,
- ✓ Ter compatibilidade com o uso e cobertura atual do solo,
- ✓ Ser compatível com o limite de declividade ($\leq 8\%$),
- ✓ Ter uma relação adequada de proximidade com “boca da mina” e
- ✓ Ter características litológicas e estruturais favoráveis.

6.2.1.1 - A importância dos fatores

Neste estudo, criou-se sete imagens de fatores, através de aplicações de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento nos dados disponíveis, que

foram utilizadas para atender o primeiro objetivo. As três primeiras se referem a fatores absolutos, que indicam locais de restrições absolutas e locais aptos para a locação de depósitos. As outras quatro são fatores relativos e representam diferentes aptidões ou variações gradacionais de aptidões para localização de depósito.

- ◆ Fator absoluto preservação da drenagem (RESTRICÇÃO) - comporta a faixa de 200 metros envolvente da drenagem, visando a preservação da mesma, impedindo o decapamento do solo e o desmatamento, se dentro desta faixa também houver mata. Principalmente tende a evitar a erosão das margens e o conseqüente assoreamento do canal. A figura 6.3a mostra a rede de drenagem da área. A figura 6.3b é a imagem de distância em metros a partir da rede de drenagem e a figura 6.3c representa o fator preservação de drenagem.

- ◆ Fator absoluto declividade maior que 8% (RESTRICÇÃO) – o mapa de declividades do terreno (figura 6.4), associado a outras informações, é uma ferramenta muito importante para análises sobre estabilidade do mesmo. As maiores declividades se concentram em faixas com direções predominantemente N/NE. A figura 6.5 mostra uma imagem booleana da declividade, identificando áreas de restrição (declividade maior que 8 %) e áreas aptas (declividade menor que 8 %). Adotou-se o critério de 8% como limite, baseados nas classes de declividade referidas por Barros (1956), Marques (1971) apud Dani (1996), os quais definiram valores de intervalos de declividade, que são consagrados para as condições de clima e de solo do Brasil.

- ◆ Fator absoluto zonas de planos de falhas (RESTRICÇÃO) - Moore & Waltz (1983), afirmam que as falhas e juntas comumente fornecem indícios de ocorrências de água subterrânea, minerais e petróleo, sendo suas localizações, padrões e densidades importantes para vários estudos, inclusive a suscetibilidade à poluição. A figura 6.6a mostra os alinhamentos dos planos de falhas na área da concessão, modificada de Lopes (1986). A figura 6.6b representa a distância a partir dos planos de falhas e a figura 6.6c salienta as áreas de restrição de 50 em torno dos planos dos alinhamentos.

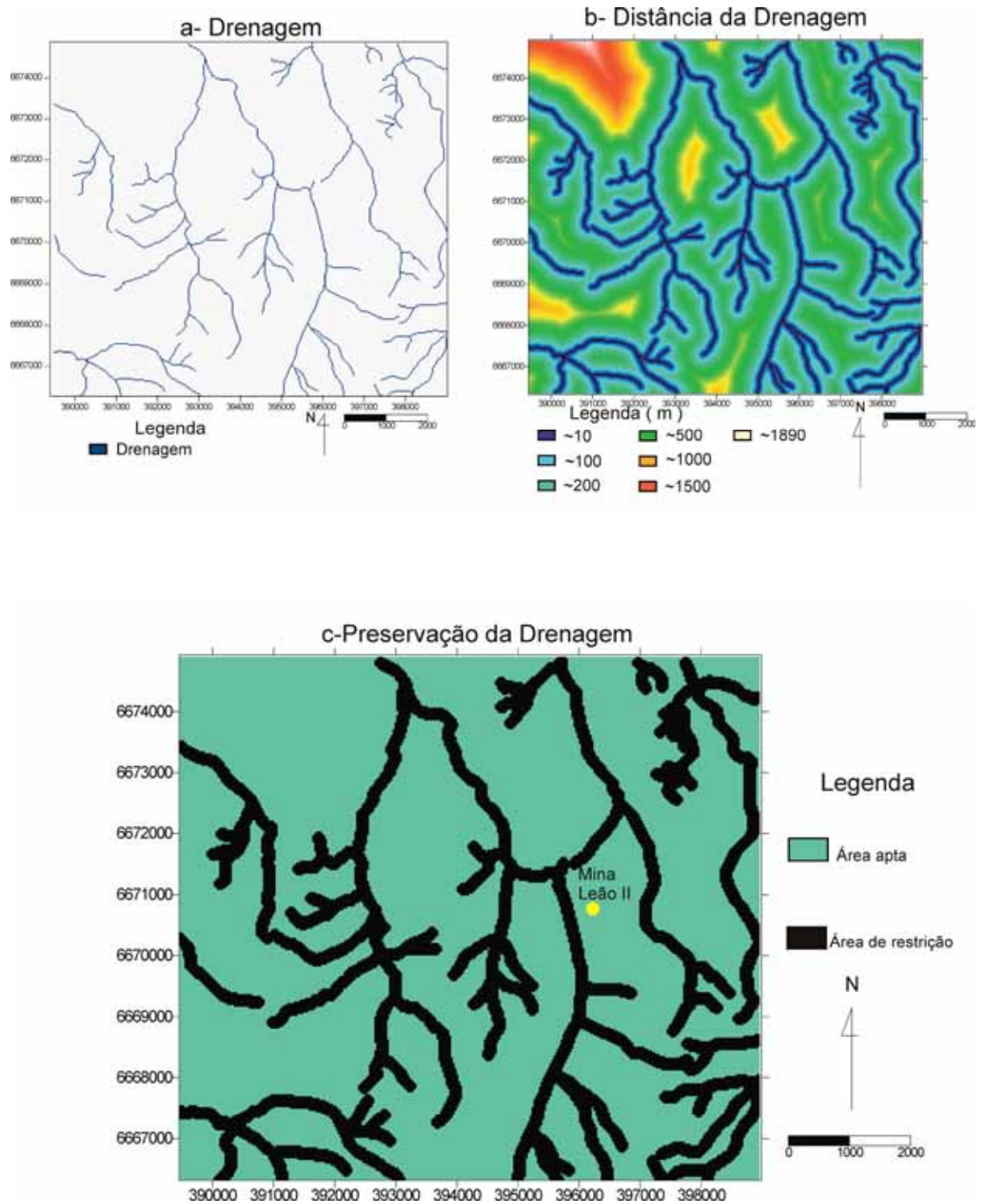


Figura 6.3 - a) Mapa da rede de drenagem, b) Mapa da distância a partir da rede de drenagem e c) Mapa com imagem booleana que mostra a faixa de preservação da drenagem e a área apta.

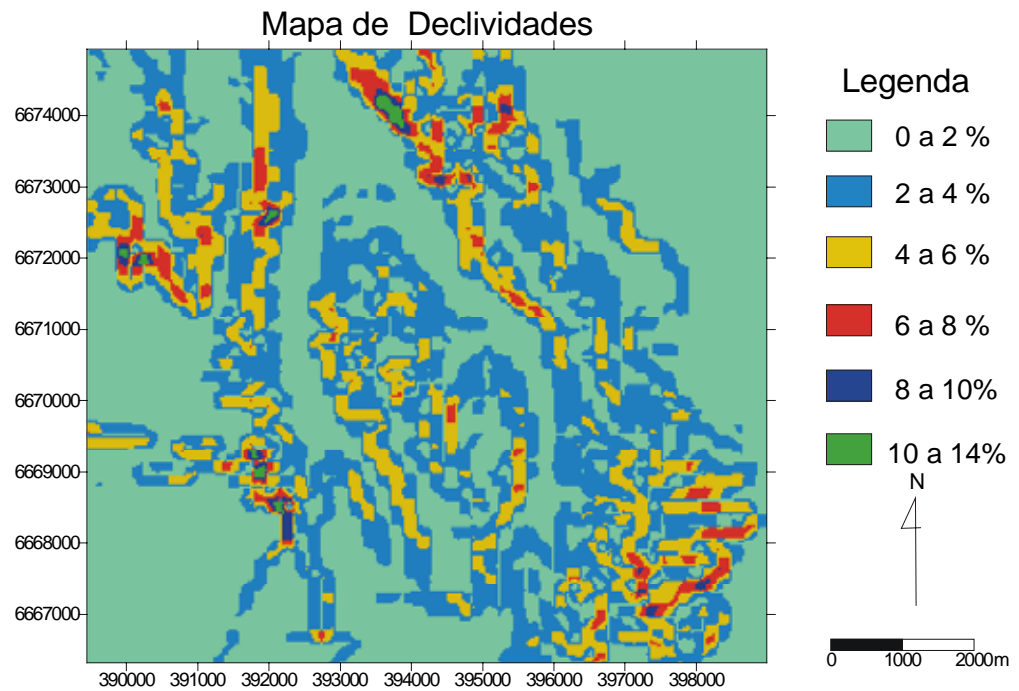


Figura 6.4 - Mapa das classes de declividades existentes na região da concessão.

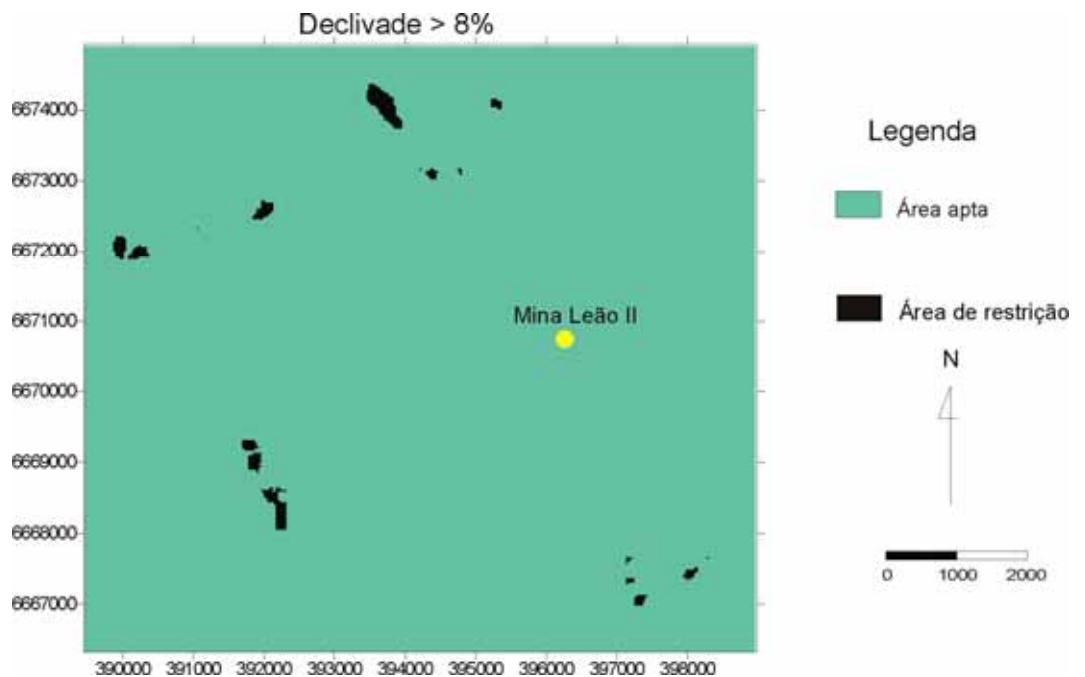


Figura 6.5 - Mapa que mostra o fator restrição de declividade > 8% e as áreas com declividades menores que 8% (aptas).

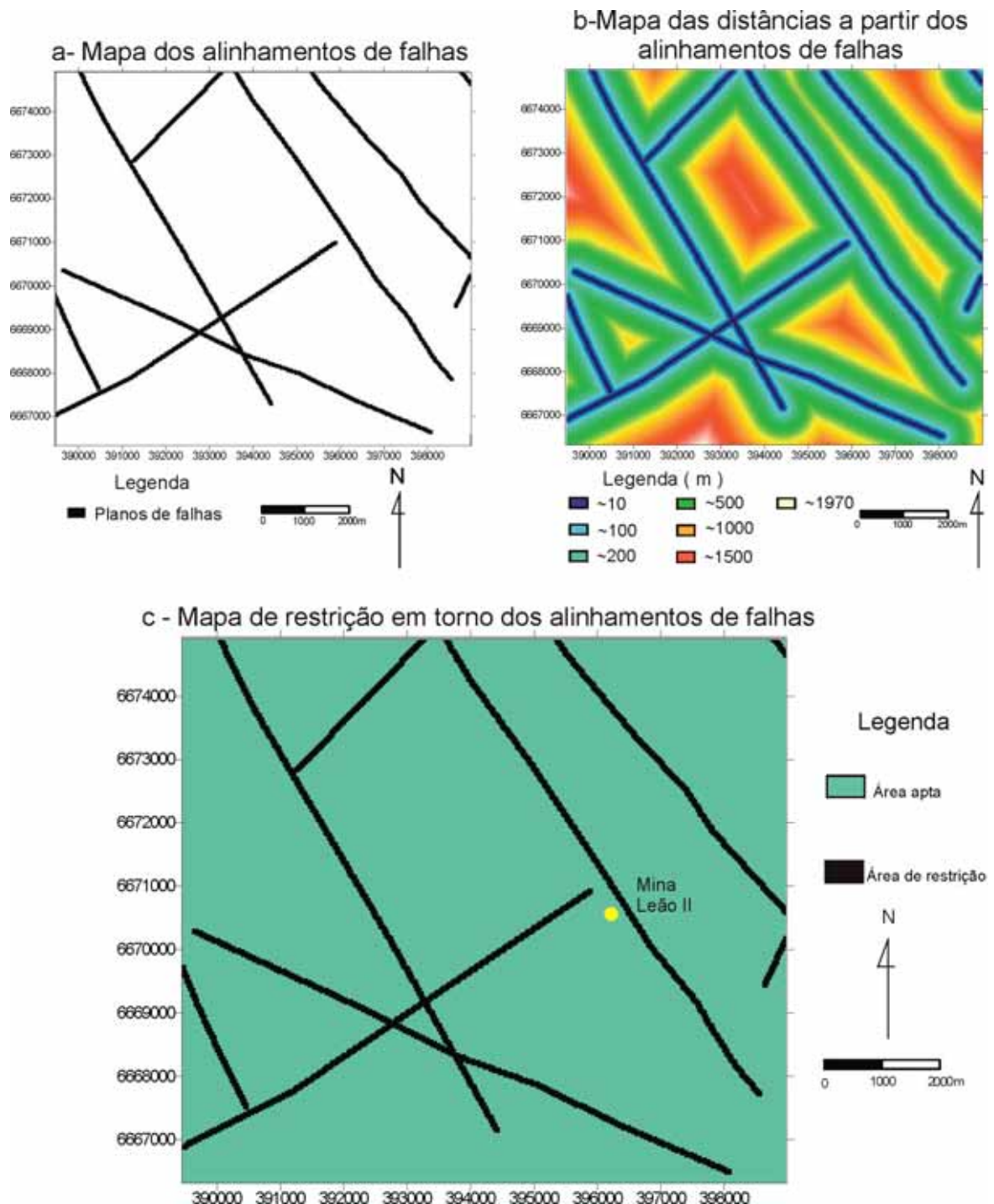


Figura 6.6 - a) Mapa dos planos de falhas modificado de Lopes (1986), b) Mapa de distâncias a partir dos planos de falhas e c) Mapa com imagem booleana de restrição em torno dos falhamentos e áreas aptas.

- ◆ Fator relativo uso e cobertura do solo - As sete classes de uso e cobertura do solo apresentam diferentes aptidões para serem portadoras do material do rejeito. Usando o conhecimento empírico, lógico e até mesmo técnico, reescalou-se os atributos das classes existentes entre o intervalo de 1 (mín.) a 255 (máx.) de acordo com suas aptidões relativas. Neste sentido a imagem foi reclassificada, sendo os atributos alterados da seguinte forma: **campos: 255; mata nativa: 30; solo exposto/arado: 150; corpos de água: 0 ; rejeito/solo exposto: 180; zona urbana: 0 e floresta plantada: 60.** (Figura 6.7).

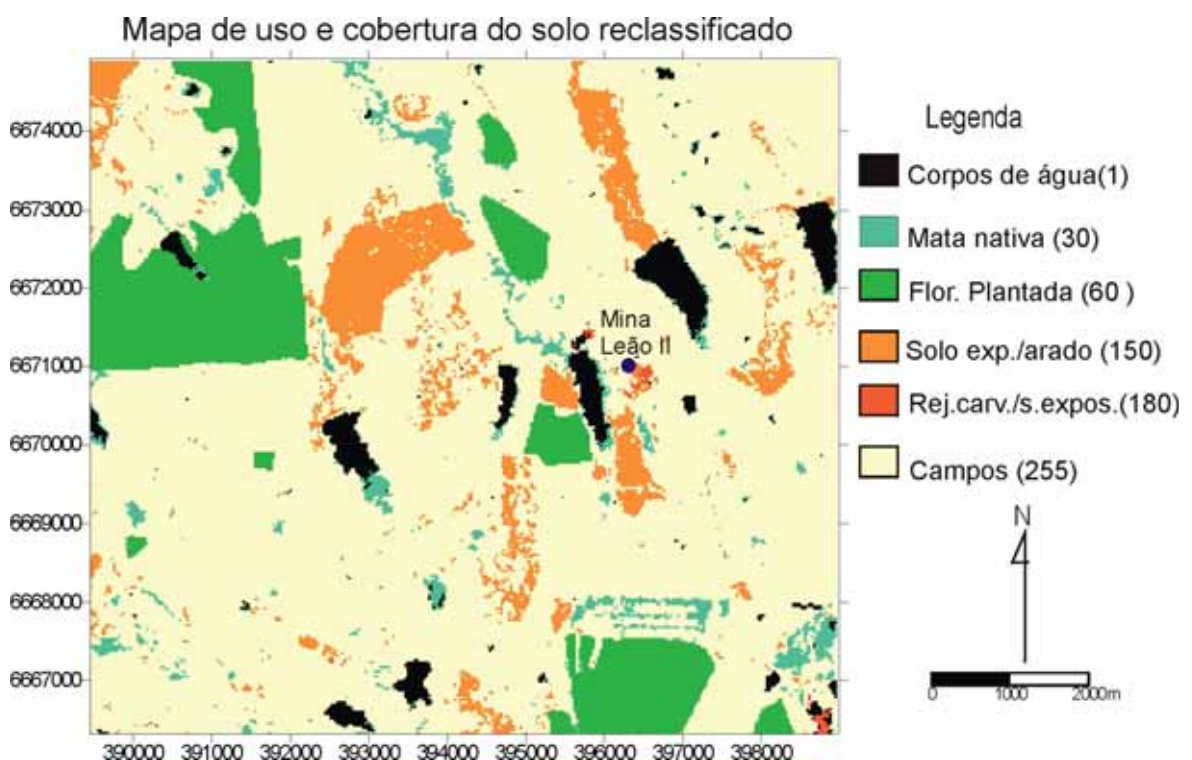


Figura 6.7 - Mapa do uso e cobertura do solo reclassificados para atender os critérios de escolha de local para depósito de rejeitos.

- ◆ Fator relativo declividade de 0 a 8% - Considerou-se que a faixa de declividade do terreno que vai de 0 a 8% é adequada para receber os rejeitos. No entanto, estabeleceu-se um gradiente entre um limite e outro. A função FUZZY do módulo de apoio a decisão do Idrisi realiza esta operação, através de uma função sigmoidal

decrecente, sendo para a declividade 0% atribuído um valor de 255 e para a declividade de 8% um valor 1, (figura 6.8).

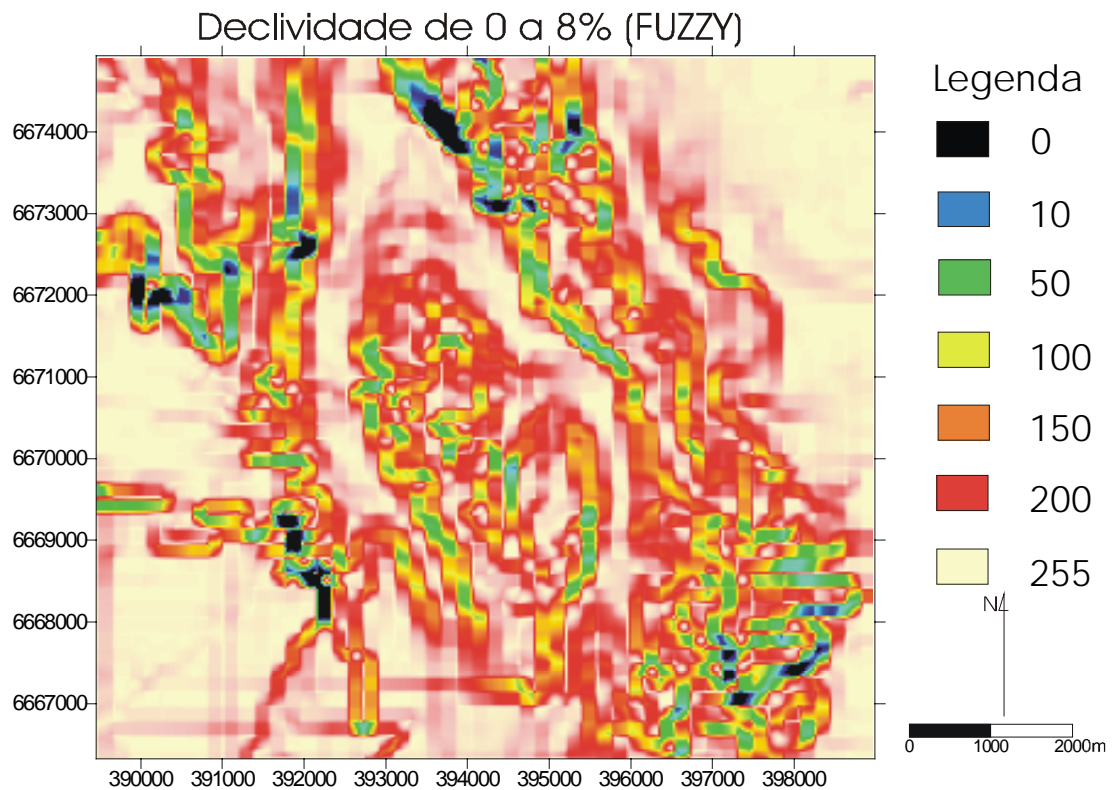


Figura 6.8 - Mapa da declividade de 0 a 8% reclassificada pela função Fuzzy, sendo que os valores maiores indicam melhor adequação.

- ◆ Fator relativo substrato litológico - Como fora explicado, as litologias que ocorrem na área de estudo são: aluviões, Formação Rosário, Formação Rio do Rastro e as Formações Estradada Nova/Irati (indivisas). Para a reclassificação dos atributos, levou-se em conta a probabilidade da característica física de impermeabilidade das formações. Assim, atribuiu-se os valores: 255 para Fms Estrada Nova/Irati (indivisas), 200 para a Fm Rio do Rastro, 75 para a Fm. Rosário e 10 para os aluviões.

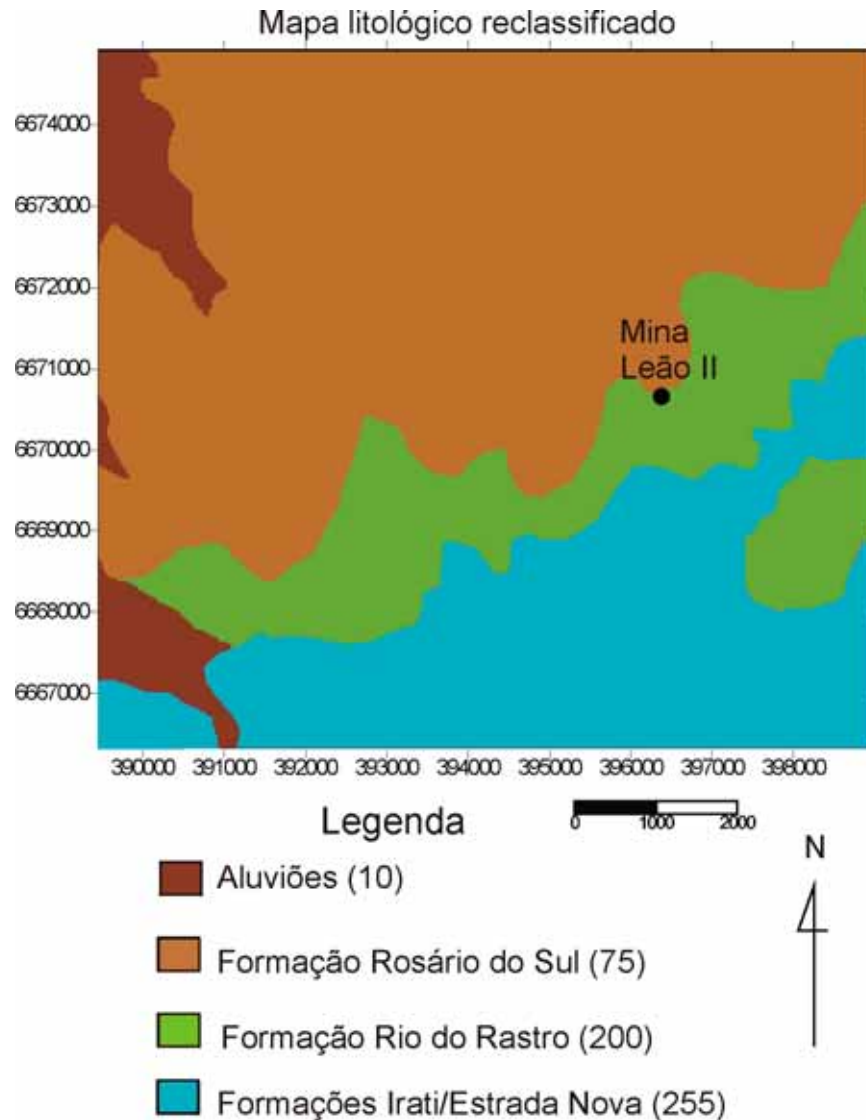


Figura 6.9 - Mapa litológico, com atributos reclassificados, das formações ocorrentes na região da concessão (modificado de Lopes, 1986).

- ◆ Fator relativo distância a partir da “boca da mina” - Neste trabalho, o fator proximidade ou distância a partir da “boca da mina“, (figura 6.10a) tem sua importância relacionada ao fator transporte do material. Neste sentido, o local escolhido para depósito, não deve ficar muito longe da “boca da mina”. Por isso para distância mínima (0,1 m) foi atribuído o valor de 255 e para a distância máxima (8014,1 m) atribuiu-se o valor 1 (figura 6.10b).

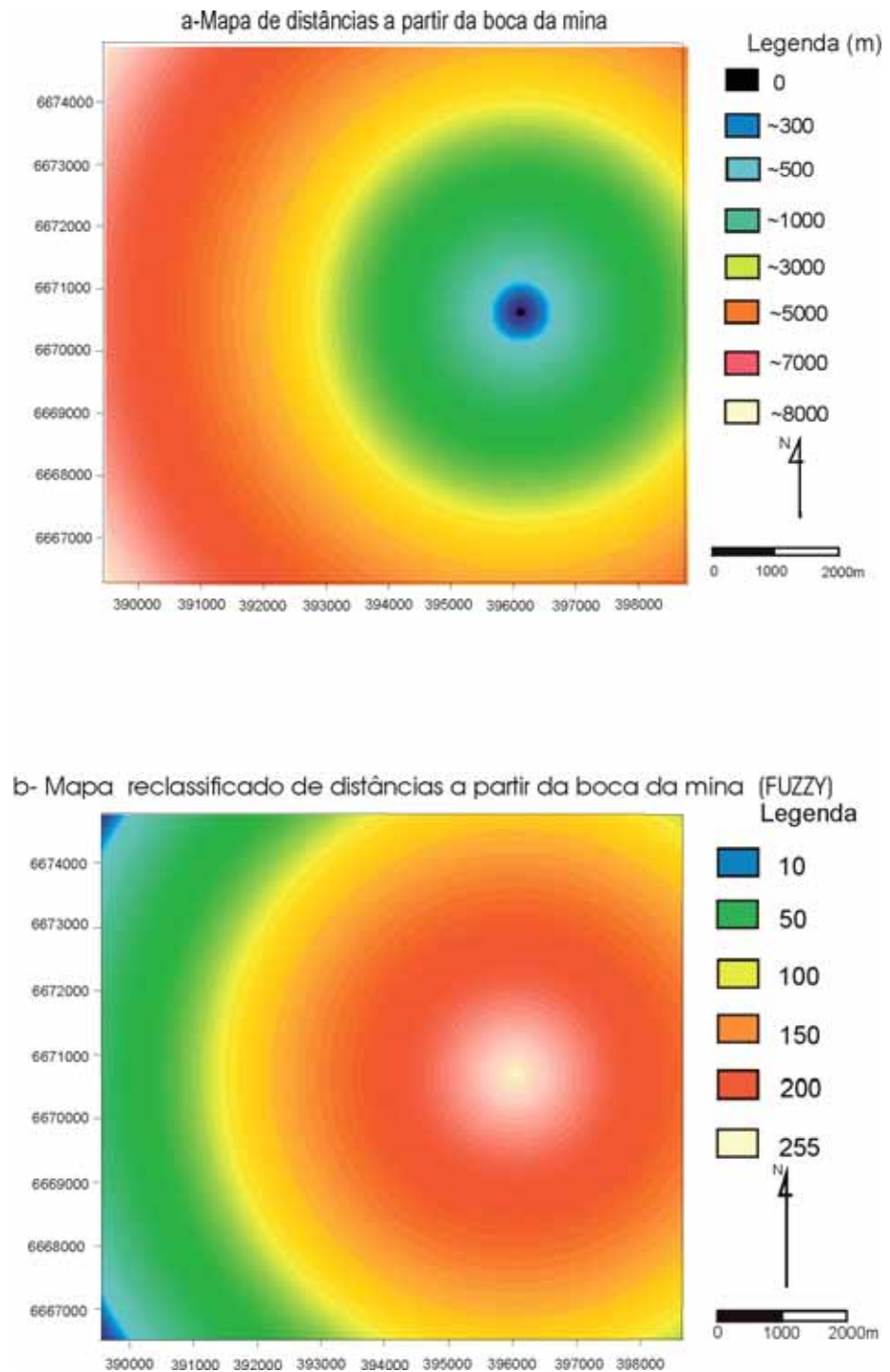


Figura 6.10 - a) Imagem de distâncias a partir da “boca da mina” e b) imagem a partir da “boca da mina” reclassificada por uma função fuzzy linear decrescente.

6.2.1.2 - Ponderação dos fatores relativos

Preparados os quatro fatores relativos, optou-se por atribuir pesos a cada um

deles, de forma a ressaltar a importância relativa dos mesmos. Neste estudo, ponderou-se a declividade com maior peso. O fator uso e cobertura e o fator litológico receberam a metade o peso da declividade. Ao fator distância da “boca da mina” atribuiu-se um sexto do peso da declividade. O resumo das ponderações é o seguinte:

Declividade de 0 a 8 %	= 0,4706
Uso e cobertura	= 0,2353
Litologia	= 0,2353
Proximidade	= 0,0588

Na elaboração de um SIG, para um determinado objetivo, a escolha dos critérios, fatores e ponderações deve ser feita por uma equipe multidisciplinar, agregando conhecimentos e interesses de diferentes áreas das ciências.

Saraf & Choudhury (1998) utilizaram a integração de sensoriamento remoto e GIS em exploração de água subterrânea. Identificaram sítios de recarga artificial e zonas potenciais para futuros reservatórios. Trabalharam com os fatores: geologia, geomorfologia, lineamentos e declividade com várias classes e diferentes ponderações. Eklund et al. (1998) estudaram a conexão entre sistemas de apoio à decisão, dados de sensoriamento remoto e GIS para o planejamento ambiental e monitoramento da salinização secundária dos solos. Consideram os fatores: solos, geologia, declividade, elevações, água subterrânea e imagens de satélites (com as 7 bandas o TM).

Hasenack et al. (1998) analisaram a vulnerabilidade de um parque urbano na cidade de Porto Alegre, através de módulos de apoio à decisão em Sistemas de Informação Geográfica. Consideram os seguintes fatores relativos com seus pesos: vegetação (0,0994), declividade (0,2190), distância das edificações (0,2437) e distâncias das ruas (0,4379).

6.2.1.3 - Mapa de classes de aptidões para o depósito de rejeitos

Para obter-se a imagem que representará os locais mais adequados para depósitos de resíduos de carvão, uma vez já tendo sido preparadas as etapas enumeradas acima, utilizou-se as ferramentas de apoio a decisão do Idrisi pelo módulo MCE (Multi

Criteria Evaluation). Este módulo combina os fatores relativos, de forma que cada um é multiplicado pelo seu peso e somados entre si. A imagem resultante sofre uma operação de interseção com as imagens das restrições, gerando a imagem final (figura 6.11), que é uma composição de acordo com os critérios estabelecidos e que contempla objetivos propostos.

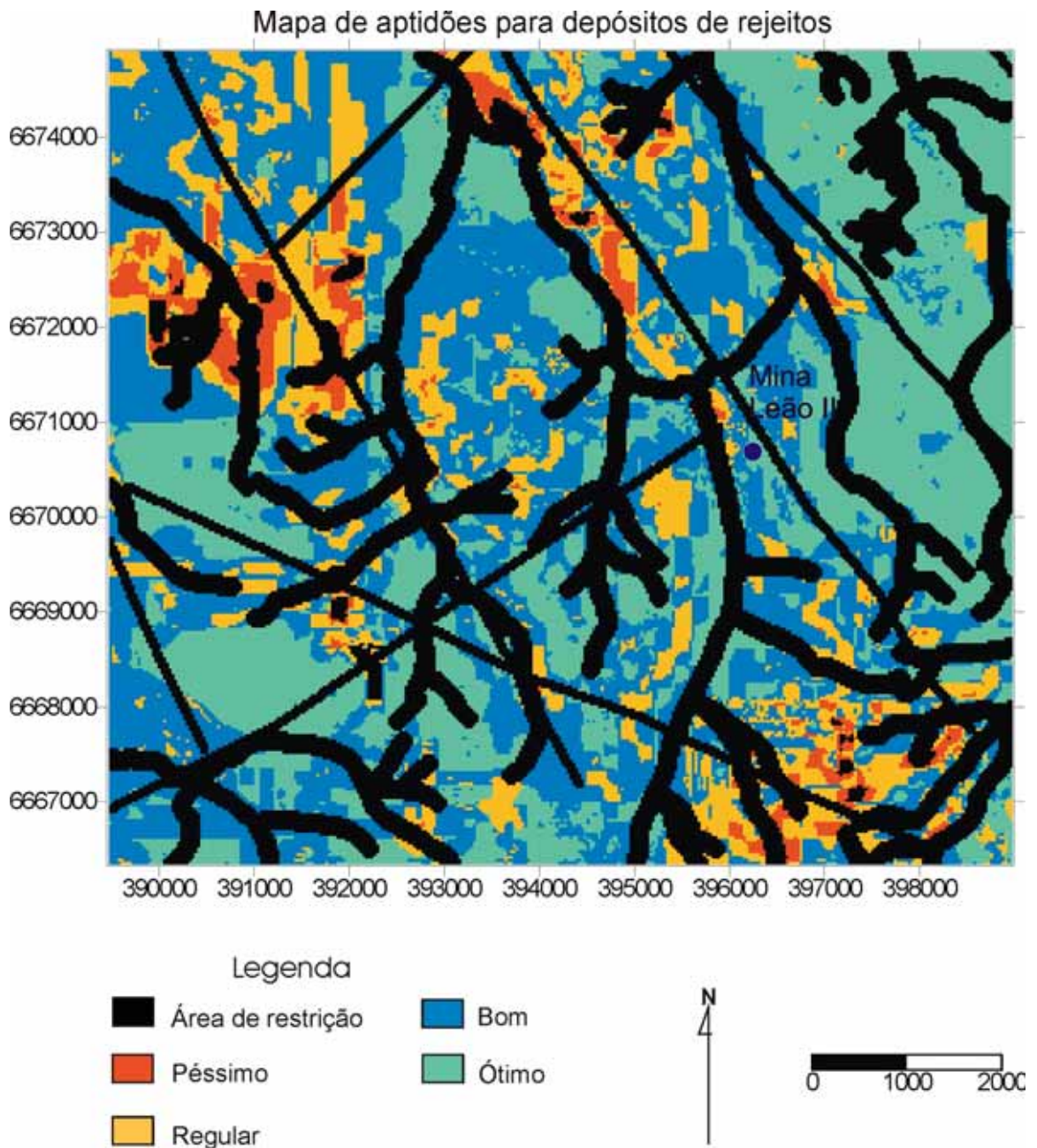


Figura 6.11 - Mapa das classes de aptidões do terreno para depósitos de rejeitos.

A imagem mostra cinco classes, assim denominadas: área de restrição, área péssima, área regular, área boa, e área ótima. As extensões de cada classes em quilômetros quadrados são as seguintes: área restrição = 24,5349, péssimo = 2,335, regular = 9,81540, bom = 24,5862 e ótimo = 20,8674.

Através das técnicas utilizadas, pôde-se verificar de uma forma simples, as áreas mais adequadas ao objetivo proposto, áreas estas que devem ser consideradas em caso de futuros planejamentos. O método contempla a vantagem de apresentar o rigor matemático associado a um forma simples e acessível de visualização, possibilitando mesmo a leigos compreender os resultados.

Outro fato importante, faz-se necessário constatar, é que não se teria o mesmo cenário, caso os pesos atribuídos aos fatores fossem outros, diferentes daqueles considerados neste estudo.

O sítio escolhido para depósito é mostrado na figura 6.12. Esse local reúne varias características consideradas adequadas: apresenta uma área contínua de 7 hectares situada sobre a classe ótima, dista 500 metros em média da boca da mina e o acesso se dá livremente sem passar através de drenagem.

6.2.2 - Determinação de distâncias de menor custo para o traçado de estradas

Da mesma forma como o exercício anterior, trabalhou-se hipoteticamente, mas agora sobre a necessidade de construção de vias de transporte a partir da mineração. Tentando tornar a situação mais próxima da realidade, estudou-se duas propostas: 1) determinar o traçado de menor custo a partir da mineração até a BR 290 e 2) determinar o traçado de menor custo a partir da mineração até um porto existente no rio Jacuí.

Este estudo é baseado no mapa de uso e cobertura do solo. Os atributos das diferentes classes foram reclassificados, visando representar o custo ou o grau de dificuldade para se executar uma via de transporte sobre elas. Neste sentido atribuiu-se valor 1 para a classe campos, 300 para mata nativa, 100 para solo arado\exposto, 700

para corpos de água, 1 para rejeitos de carvão\solo exposto, 800 para urbano e 200 para floresta plantada. A figura 6.13a mostra a imagem das classes de uso e cobertura do solo com novos atributos. E a figura 6.13b é uma superfície de distâncias (também referida como superfície de custos), gerada a partir da “boca da mina”.

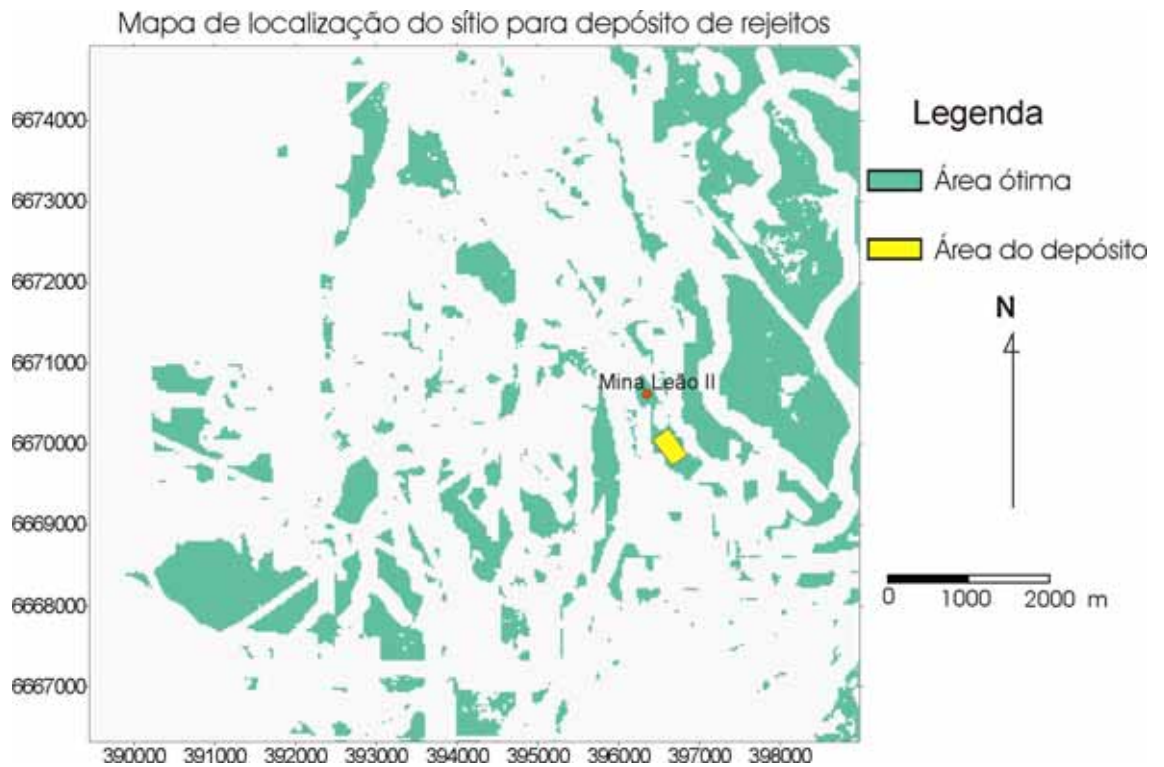


Figura 6.12 – Mapa de localização do sítio para depósito de rejeitos.

Necessita-se de um segundo plano que é a imagem de um ponto que identifica a “boca da mina” e mostra o local e a feição a partir da qual as distâncias de custo foram calculadas. Esta imagem devido a sua simplicidade não foi mostrada.

O estabelecimento das rotas de menor custo (figura 6.14), entre o ponto de saída (boca da mina) e os pontos de destino (BR290 e porto no Rio Jacuí), sobre a imagem de custo foi realizado através de representações vetoriais. A primeira, entre a mina e a BR290 mede 7.143,8 metros e a segunda entre a mina o porto mede 15.226,8 metros.

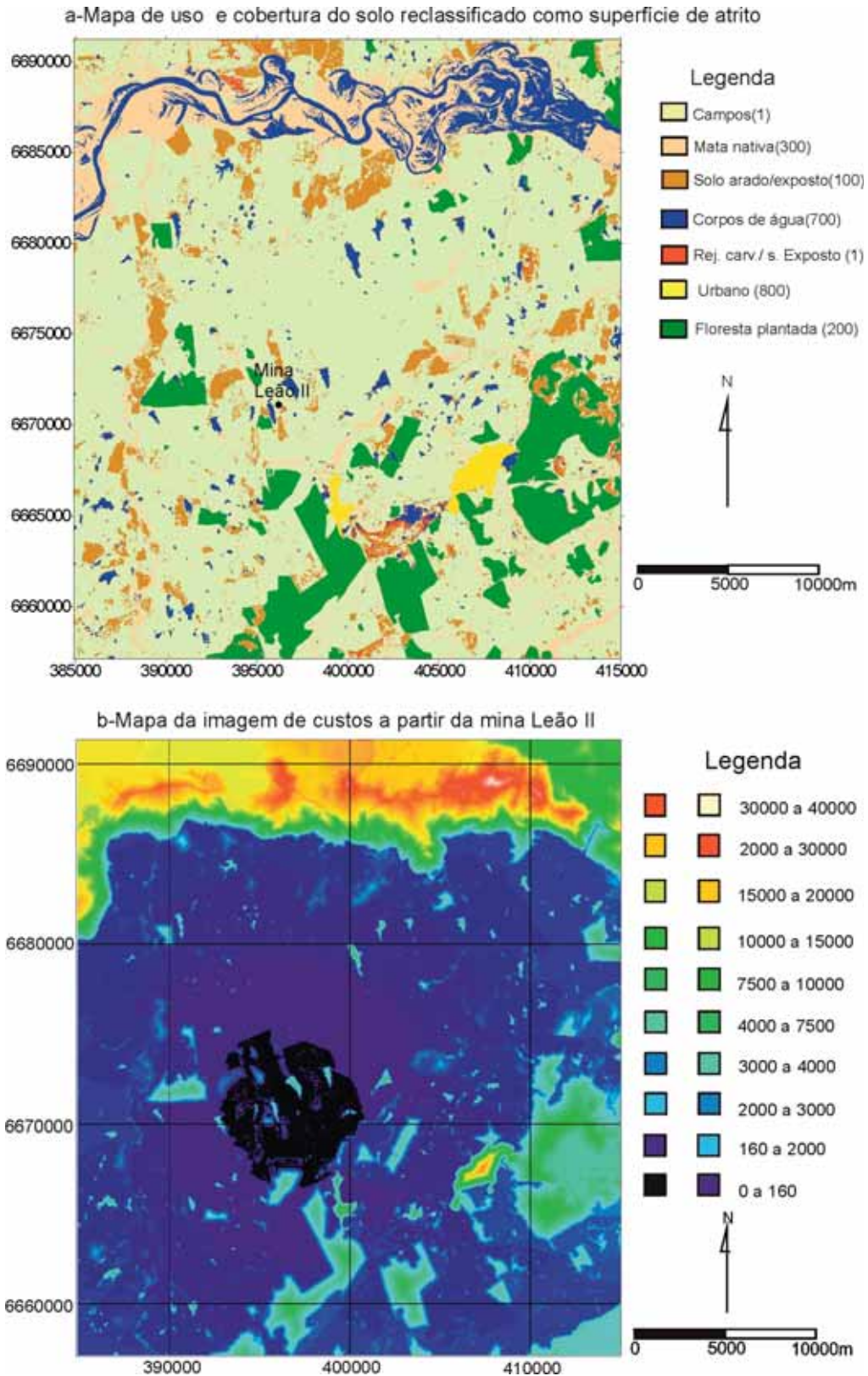


Figura 6.13 - a) Mapa do uso e cobertura reclassificado em função de superfície de atrito, b) Mapa de custo a partir da Mina Leão II.

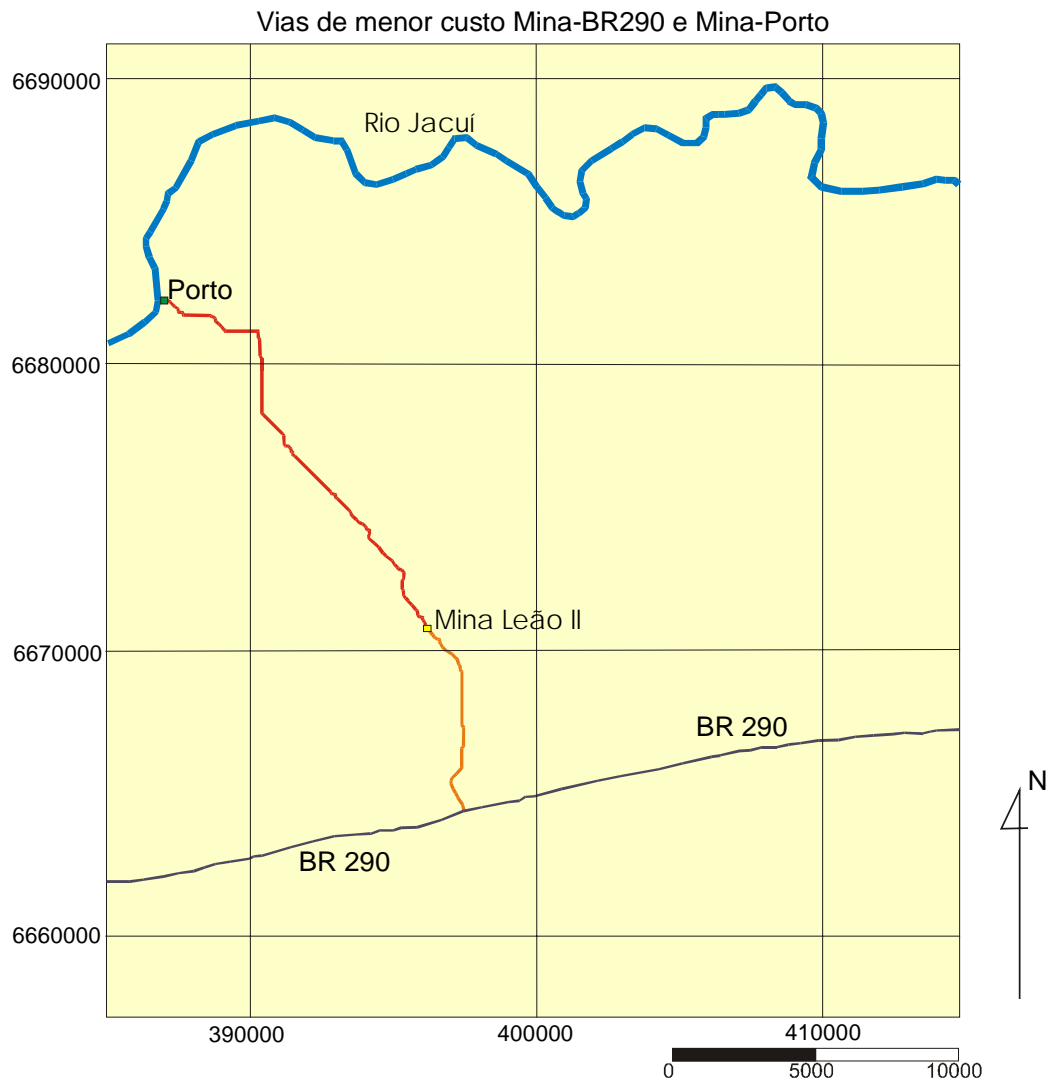


Figura 6.14 - Traçado de menor custo a partir da mina Leão II para BR290 e para um porto no Rio Jacuí.

Os traçados de vias de menor custo entre a mina Leão II e BR 290 e entre a mina Leão II e o porto no Rio Jacuí, seguiram, preferencialmente, devido às ponderações das superfícies de atrito adotadas nesta etapa, dentro da classe de campos, contornando as classes de florestas, corpos de água, área urbanizada e solo arado. Isto significa, que mesmo aumentando o percurso, ainda foi mais compensador executar os desvios.

7 - CUBAGEM DA CAMADA DE CARVÃO ‘T’ USANDO METODOLOGIA DE GEOESTATÍSTICA

7.1 - Geoestatística

Geralmente as informações quantitativas disponíveis sobre os dados espacialmente distribuídos são reduzidas, face a diversos fatores, como por exemplo, o alto custo das amostragens. A avaliação dos locais não amostrados se torna crítica, uma vez que desconhecemos muitos processos naturais geradores das condições existentes, bem como, outros fatores condicionantes. A geoestatística vem se desenvolvendo nas últimas décadas e apresenta-se como uma ferramenta confiável para a estimativa de dados para a grande maioria dos fenômenos naturais, pois se distingue por capturar o padrão de continuidade dos dados geoposicionados. Já os métodos estatísticos tradicionais não levam em conta a influência da localização espacial das amostras, considerando-as independentes espacialmente.

Os métodos geoestatísticos levam em conta a correlação espacial entre as amostras, a aleatoriedade do corpo mineralizado em estudo e permitem avaliar o erro cometido na avaliação, (Andriotti, 1988). O seu embasamento matemático garante a confiabilidade do método e sua utilização racional, aliada ao entendimento físico do problema, possibilitam bons resultados (Beal et al., 1994).

Um fenômeno natural pode, geralmente, ser caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, chamadas de variáveis regionalizadas. Estas variáveis também conhecidas como variáveis distribuídas espacialmente, geoposionadas, ou ainda, variáveis em geociências. Como exemplo destas variáveis podemos citar: cotas

topográficas do terreno, teor de um minério, taxa de um poluente ao longo de uma bacia, espessura de uma camada sedimentar, etc.

Isaaks & Srivastava (1989) definem geoestatística como aplicação de métodos estatísticos a dados que variam no espaço e/ou no tempo. O que diferencia a geoestatística da estatística clássica é que aquela trabalha com valores amostrais que são dependentes uns dos outros e que guardam uma relação de continuidade espacial/temporal entre si.

Neste trabalho, a variável espacialmente distribuída estudada, foi a espessura da camada de carvão inferior (“I”). Sobre esta variável aplicou-se a metodologia de geoestatística para a cubagem do carvão “in situ” na referida camada. O estudo geoestatístico compreendeu três etapas: análise estatística descritiva básica, análise da continuidade espacial e estimativa, as quais serão desenvolvidas a seguir. Os dados estudados se referem a 182 medidas de espessura da camada obtidos através de sondagem. Os valores e as coordenadas das medidas da espessura estão relacionadas no anexo 1. A localização dos mesmos é mostrada na figura 7.1, complementada pelo mapa de magnitude (figura 7.2.).

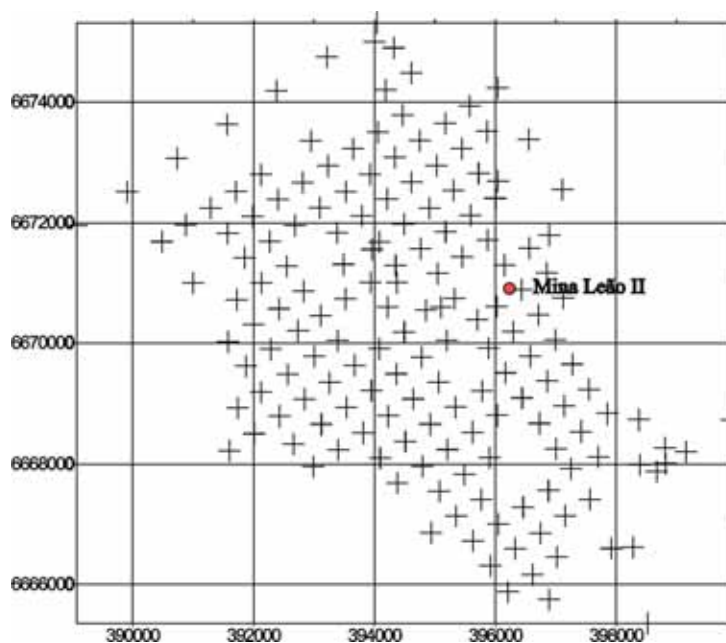


FIGURA 7.1 - Localização pontual dos furos de sondagem da camada I.

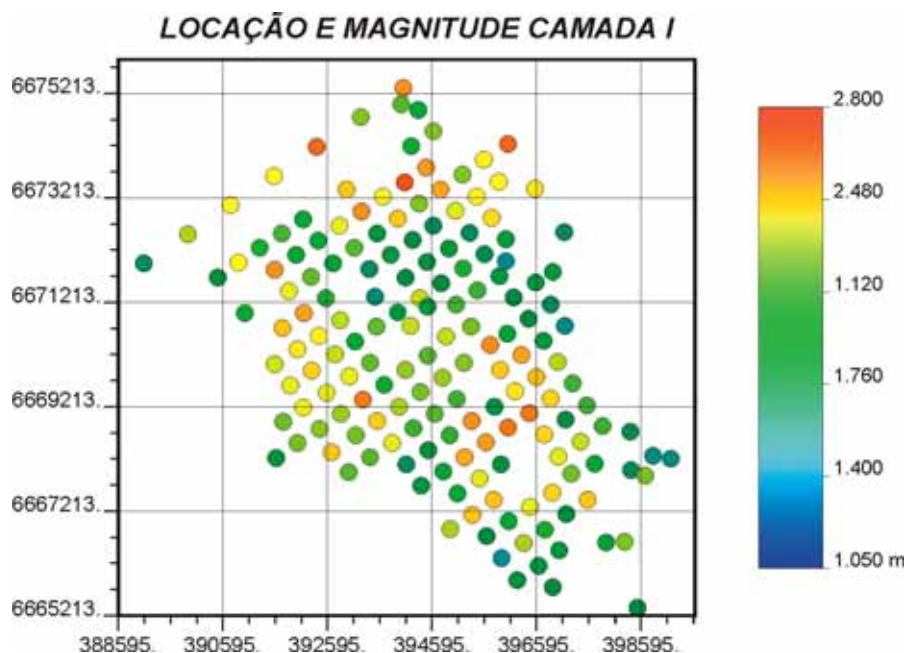


FIGURA 7.2 - Localização das sondagens associada à magnitude da espessura da camada I.

7.1.1 - Análise estatística descritiva básica dos dados

Esta etapa se caracteriza pela análise estatística descritiva dos dados. É utilizada para se determinar parâmetros estatísticos básicos, como: média, mediana, quartis, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, assimetria, curtose e teste de normalidade da distribuição. Por meio de histograma se identifica a presença de valores erráticos, se há homogeneidade, se há mais de uma população e também qual o tipo de distribuição de frequência.

Faz-se necessário se estabelecer nesta etapa a diferenciação entre valores erráticos e “outliers”, sendo os primeiros, valores erráticos que pertencem população e que têm impacto significativo na estimativa. Os segundos se referem dados possivelmente altos que não pertencem à população e que são criados por erros, por exemplo, analíticos ou de digitação.

O histograma, as medidas de posição, como média, mediana, primeiro e terceiro quartis e as medidas de dispersão como desvio padrão e coeficiente de variação podem ser vistos na figura 7.3. A unidade das medidas é o metro.

As fórmulas utilizadas para os cálculos das principais estatísticas: média (m), variância (σ^2), desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria (g) e curtose (k) foram as seguintes:

$$m = 1/n \sum_{i=1}^n vi = 1,8868 \quad 7:1$$

$$\sigma^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (vi - m)^2 = 0,13227 \quad 7:2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = 0,3637 \quad 7:3$$

$$C V = \sigma/m = 0,19328 \quad 7:4$$

$$g = [1/n \sum_{i=1}^n (vi - m)^3] / \sigma^3 = 0,068 \quad 7:5$$

$$k = [(\sum (vi - m)^4) / n] / \sigma^4 = 2,543 \quad 7:6$$

O símbolo vi se refere aos valores amostrais e n ao número de amostras. A média (m) = 1,8868 é o valor em torno do qual a amostragem tende a se concentrar. Como é afetada por valores extremos, que no caso são altos (ver histograma, figura 7.3), é levemente superior a mediana (Md). A mediana = 1,8700, divide a amostra em duas partes iguais, sendo 50% abaixo e 50% acima. O primeiro quartil (Q1) = 1,6100 e terceiro quartil (Q3) = 2,1500 representam os valores que temos no histograma cumulativo igual a 25% e 75% respectivamente.

As medidas de dispersão como o desvio padrão e variância avaliam o grau de variabilidade em torno da média. O coeficiente de variação (CV) = 0,1928, sendo de

magnitude menor que um, provém um grau de dificuldade simples para a realização de estimativas.

As medidas de forma, as quais medem o grau de afastamento de uma distribuição de unidade de simetria, onde $m=Md=Mo$ (moda), mostram o valor do coeficiente de assimetria (g) = 0,068 e a curtose (k) = 2,543. O primeiro é levemente positivo, porque os valores extremos altos deslocam a média para direita. A segunda mede o grau de achatamento na distribuição modal da forma da curva e o valor calculado indica uma forma mesocúrtica.

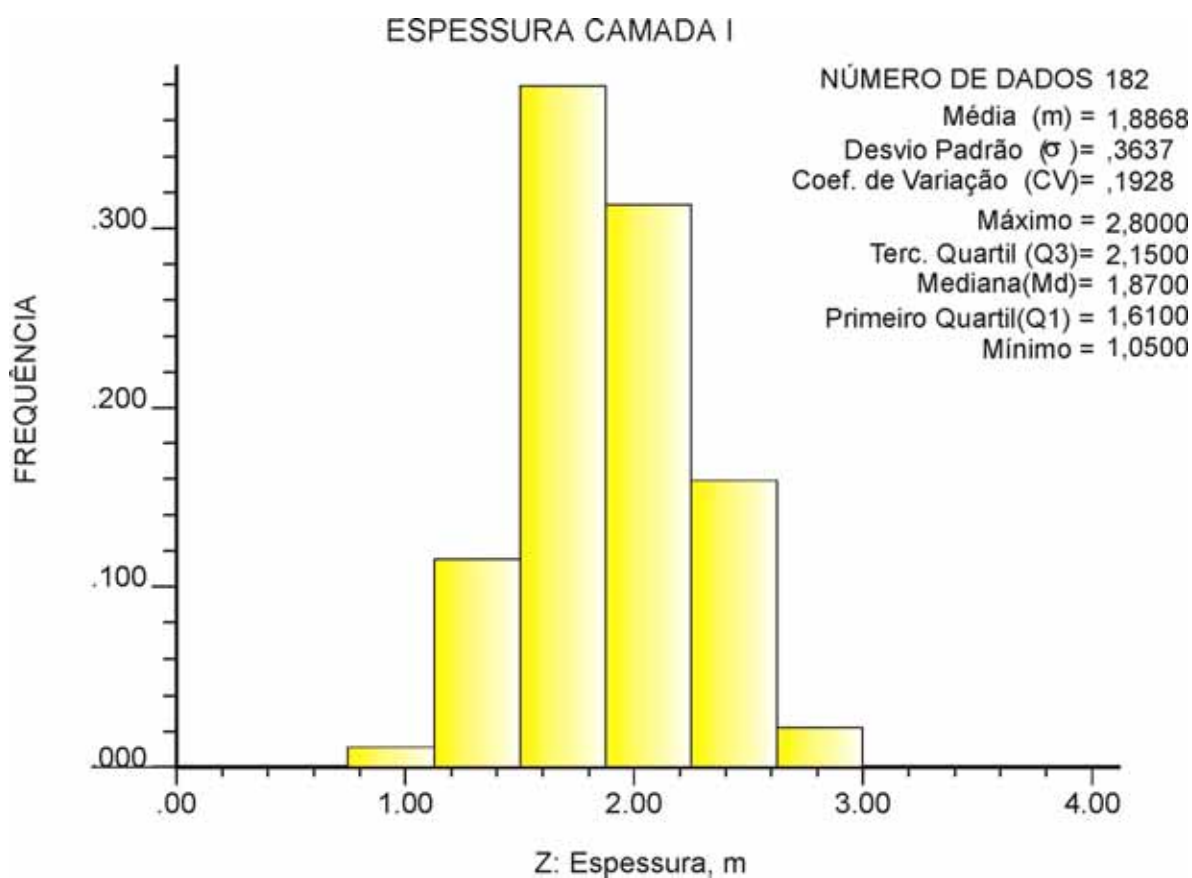


FIGURA 7.3 - Histograma dos dados da espessura da camada I.

7.1.1.1- Teste de normalidade do conjunto de dados da espessura da camada I

Jonhson & Wichern (1982) afirmam que a plotagem dos dados é útil em qualquer análise de um conjunto de dados. O tipo especial de plotagem chamada “Q-Q” pode ser usada para avaliar a suposição de normalidade de um conjunto de dados. Ela é, com efeito, um gráfico dos quantis das amostras versus os quantis que se esperaria observar se a observação fosse distribuída normalmente. Quando a plotagem resultante é um gráfico com pontos plotados aproximadamente em linha reta, a suposição de normalidade é sustentável. Os passos para se executar um gráfico “Q-Q” são:

- 1- Ordenar em ordem crescente os valores amostrais, $v(1), v(2), \dots, v(n)$ e calcular seus valores de probabilidade $(1-1/2)/n, (2-1/2)/n, \dots, (n-1/2)/n$, (tabela 1),
- 2- Calcular os quantis normais padronizados: $q(1), q(2), \dots, q(n)$, e
- 3- Plotar os pares de observações $(q(1), v(1)), (q(2), v(2)), \dots, (q(3), v(3))$, e examinar a linearidade ou não do resultado.(Figura 7.4).

A tabela 7.1 mostra os primeiros oito valores para a preparação da plotagem “Q-Q”.

TABELA 7.1 - Tabela parcial com os dados da espessura da camada I, preparados para a plotagem “Q-Q”.

Ordenação(i)	v(i)	Probab.	Var. reduz(qi)
1	1,05	0,002747	-2,77651
2	1,10	0,008242	-2,39803
3	1,15	0,013736	-2,20474
4	1,16	0,019231	-2,0699
5	1,18	0,024725	-1,96468
6	1,20	0,03022	-1,87757
7	1,22	0,035714	-1,80275
8	1,25	0,041209	-1,73683

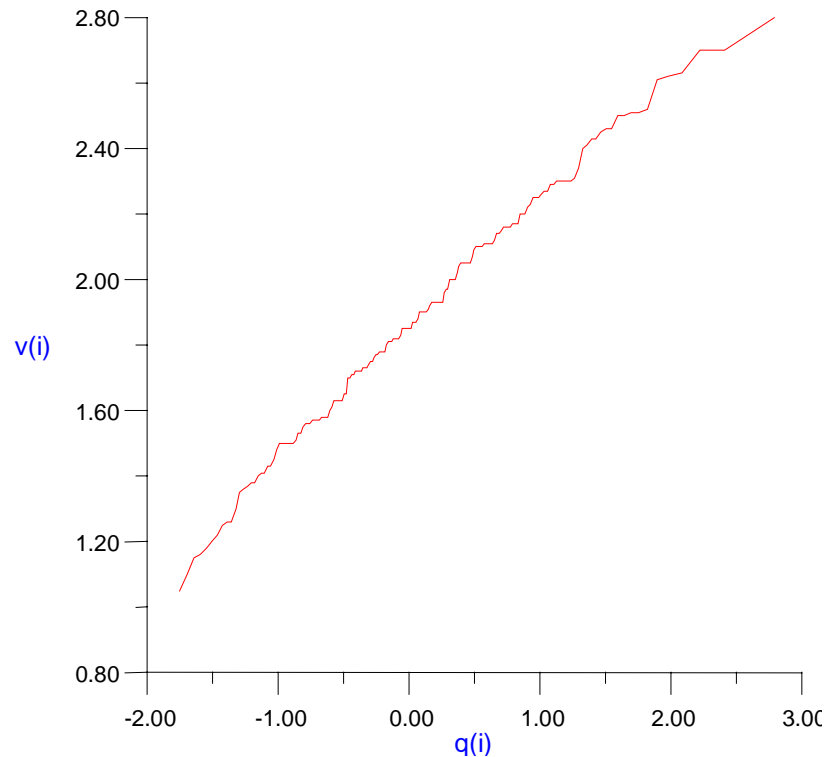


FIGURA 7.4 – Plotagem “Q-Q” dos dados da camada. Visualmente a linearidade para os dados não é plenamente contestada .

O método da plotagem “Q-Q” ,(figura 7.4), é ideal para amostras pequenas ($n \leq 20$), segundo o autor citado acima. Para amostragens maiores o resultado se torna duvidoso.

Se forem muitos dados, como é o caso (182 amostras), então utiliza-se como alternativa o teste formal de FILLIBEN, que calcula o **coeficiente de correlação “ r ”** entre $v(i)$ e $q(i)$, pela seguinte fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((v(i) - \overline{v(i)}) * (q(i) - \overline{q(i)}))}{\sqrt{(v(i) - \overline{v(i)})^2} * \sqrt{(q(i) - \overline{q(i)})^2}} \quad 7 : 7$$

Sendo o resultado de **r** calculado = **0,993**. Este resultado é comparado com os valores tabelados conforme a tabela 7.2.

TABELA 7.2 - Modificada de Johnson & Wichern (1982) - Tabela para testar a normalidade - Método de FILLIBEN.

Tamanho da amostra	Nível de Significância	
	5%	1%
5	0,879	0,830
10	0,920	0,880
15	0,939	0,913
.....
.....
150	0,991	0,987
200	0,993	0,990

Se os dados amostrais tiverem uma distribuição normal, valor de correlação r será muito perto de 1. Então temos que testar se o valor de r é significativamente menor que 1. Para isto, verifica-se o valor de r tabelado e compara-se com o valor de r calculado. Se o valor de r calculado for maior que o valor de r tabelado, para um teste ao nível de 5% de significância, não se tem evidência contra a hipótese de normalidade dos dados.

Para os dados amostrais o valor calculado de r foi = **0,993**. Verifica-se o valor de r tabelado para 182 dados amostrais que é: 0,98934 para 1% de significância e 0,99256 para 5% de significância. Observa-se que o valor r calculado é maior que os valores tabelados tanto para 1 % e 5 % de significância, e que r não cai na região crítica. Portanto, não se tem evidência contra da hipótese de normalidade dos dados.

7.1.2 - Análise da continuidade espacial das medidas da espessura da camada I

Ao iniciar esta etapa faz-se necessário um breve comentário sobre as estatísticas bivariadas. A forma mais comum de se visualizar a relação entre dois conjuntos

de dados é através de um gráfico x e y, onde no eixo x são colocados os valores de uma variável e no eixo y os valores da outra variável. Um gráfico deste tipo é referido na bibliografia de geoestatística como “scatterplot” ou diagrama de dispersão.

No estudo de variáveis com a mesma posição espacial duas a duas, pode-se identificar, a priori, três comportamentos específicos: elas serão positivamente correlacionadas, negativamente correlacionadas ou não serão correlacionadas.

As amostras serão positivamente correlacionadas quando a altos valores da variável x estão associados altos valores da variável y. Negativamente, quando a altos valores de uma correspondem baixos valores da outra. E quando o aumento em uma variável não causa efeito na outra, então elas não são correlacionadas.

A estatística usada para sumarizar a relação entre duas variáveis x e y é o coeficiente de correlação: ρ cuja fórmula é a seguinte:

$$\rho = 1 / n \sum_{i=1}^n (x_i - mx)(y_i - my) / (\sigma_x \sigma_y) \quad 7 : 8$$

Onde $x_i, y_i, mx, my, \sigma_x, \sigma_y$ correspondem respectivamente valores da variável x,y,média de x, média de y, desvio padrão de x e y e n é o numero de dados. O termo do numerador é chamado de Covariância, e também é usado para sumarizar o relacionamento de duas variáveis. O fato notável é que as ferramentas usadas para descrever a relação entre duas variáveis podem também ser usadas para descrever a relação entre o valor de uma variável e o valor da mesma variável a uma localização “h” próxima. O gráfico que representa a relação entre estas duas variáveis é chamado de “h-scatterplot” e mostra valores possíveis de pares de dados cuja localização é separada por uma certa distância h em uma direção particular.

O formato da nuvem de pontos em um “h - scatterplot” (figura 7.5) nos revela quão contínuo são os dados em um certa distância e em uma direção particular. Se os

valores de uma variável e os valores da mesma variável separados de uma distância forem muito similares então os pares serão plotados próximos a linha $x=y$ ou com a linha de 45° de inclinação com o horizonte que passa pela origem dos eixos. Quando os valores dos dados se tornam menos similares, a nuvem de pontos no “h-scatterplot” se torna mais difusa.

Um outro índice plausível e útil para se medir a força do relacionamento entre duas variáveis é o Momento de Inércia (MI) sobre a linha $x=y$ que é definido pela seguinte fórmula:

$$MI = 1/2n \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \quad 7:9$$

Portando, o Momento de Inércia é metade da diferença média quadrática entre as coordenada x e y .

O relacionamento entre o momento de inércia e distância h de separação em um “h-scatterplot” é tradicionalmente chamado de Semivariograma. O prefixo semi se refere a fração $1/2$ da equação. É senso comum se usar a palavra Variograma no lugar de Semivariograma.

Intencionado ser diferente de outras estatística, as quais usam covariância e correlação para caracterizar a continuidade, a geoestatística usa o momento de inércia ou simplesmente o VARIOGRAMA para aquela finalidade, (equação 7:10).

$$\gamma(h) = 1/2Nh \sum_{i=1}^{Nh} [X(x_i) - X(x_i + h)]^2 \quad 7:10$$

Onde $X(x_i)$ é o valor da variável X na posição (x_i) , $X(x_i+h)$ é o valor da variável X na posição (x_i+h) e Nh é o número de pares de valores separados entre si por uma magnitude h na direção do vetor.

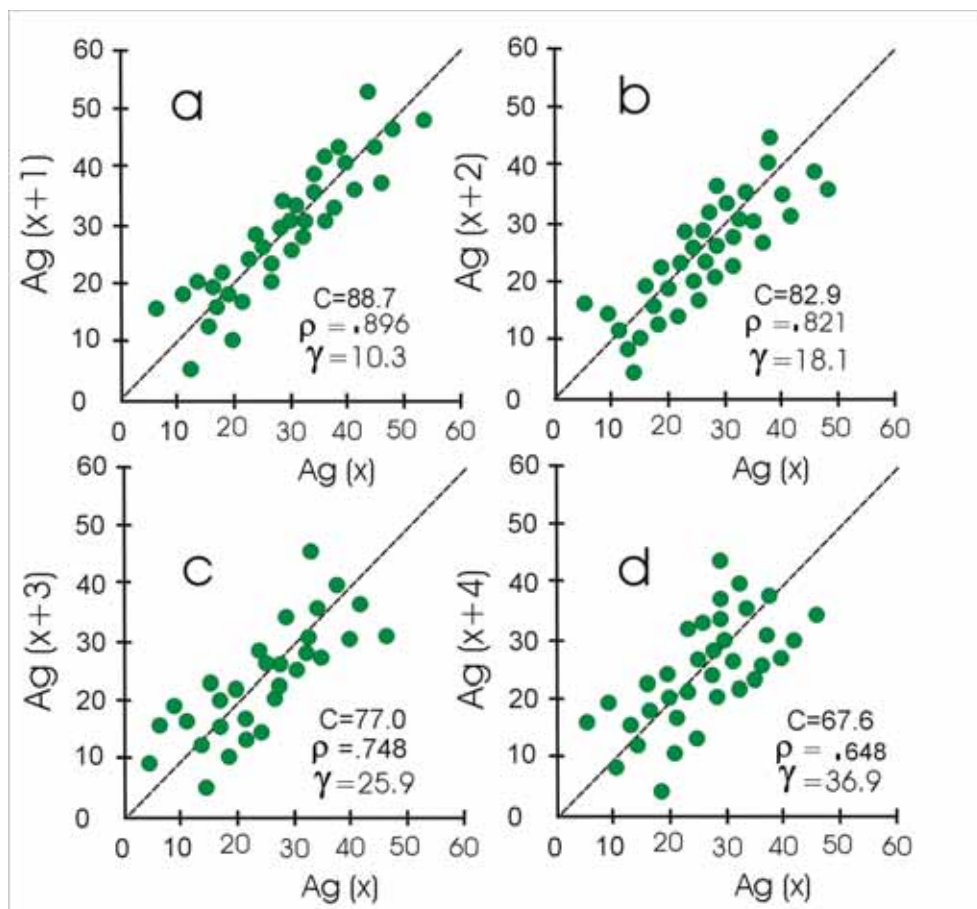


FIGURA 7.5 - Diagrama de dispersão (“h - scatterplot”) de uma variável e a mesma variável a 4 posições diferentes, modificado de Isaaks & Srivastava (1989).

A continuidade espacial é função de h , um vetor, que depende de distância e direção. Por isso, os variogramas são calculados separadamente, um de cada vez, para cada direção. O software que calcula os variogramas chama-se GAMV e pertence à coletânea de programas de geoestatística do GSLIB, (Deutsch & Journel, 1996). A rotina GAMV gera um arquivo de saída, o qual através do software VARFIT, do Laboratório de Produção Mineral (LAPROM) do Departamento de Minas da Escola de Engenharia da UFRGS é realizado o gráfico variograma. Faz-se necessário estabelecer os parâmetros de distância h , a tolerância de h e também a direção azimutal de h .

Outras funções também podem sumarizar a continuidade espacial (figura 7.6), como o correlograma ($\rho(h)$), a função covariância ($C(h)$), embora o mais tradicional seja o variograma ($\gamma(h)$).

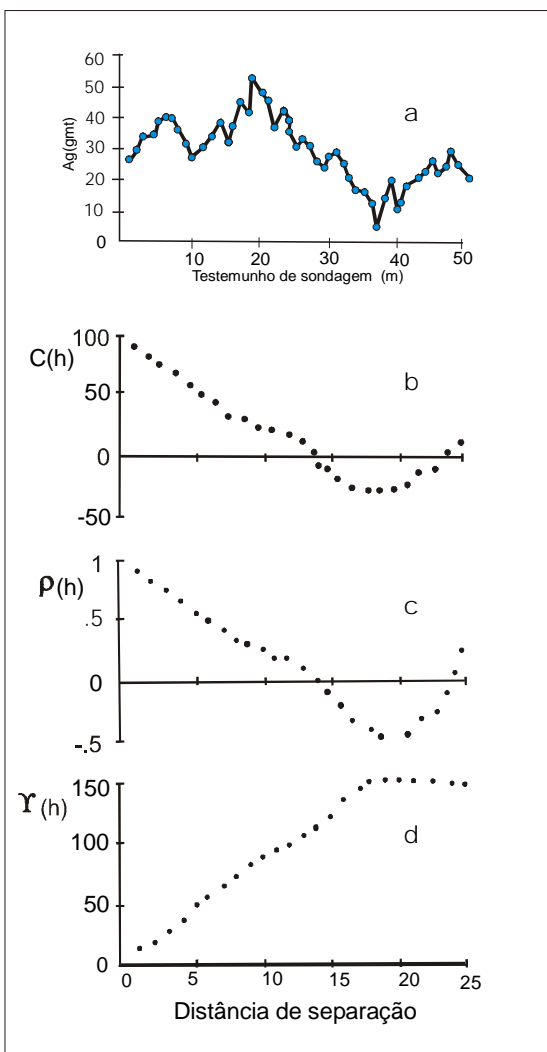


FIGURA 7.6 - Modificada de Issacs & Srivastava op. cit., (a) - Gráfico do teor de minério em um testemunho de sondagem e três formas de representar a continuidade espacial, (b) - Função covariância, (c) - Correlograma e (d) - Variograma.

7.1.2.1 - Análise dos variogramas

A medida que a distância de separação entre os pares de amostras cresce, há também um crescimento correspondente no valor do variograma. No entanto a partir de

uma determinada distância de separação entre as amostras, não se observa mais o correspondente aumento no valor do variograma. Esta distância limite (h) é chamada de alcance ou “range”, (figura 7.7). O platô que o variograma atinge no alcance é denominado de patamar ou “sill” e corresponde a variância total (σ^2) dos dados amostrais.

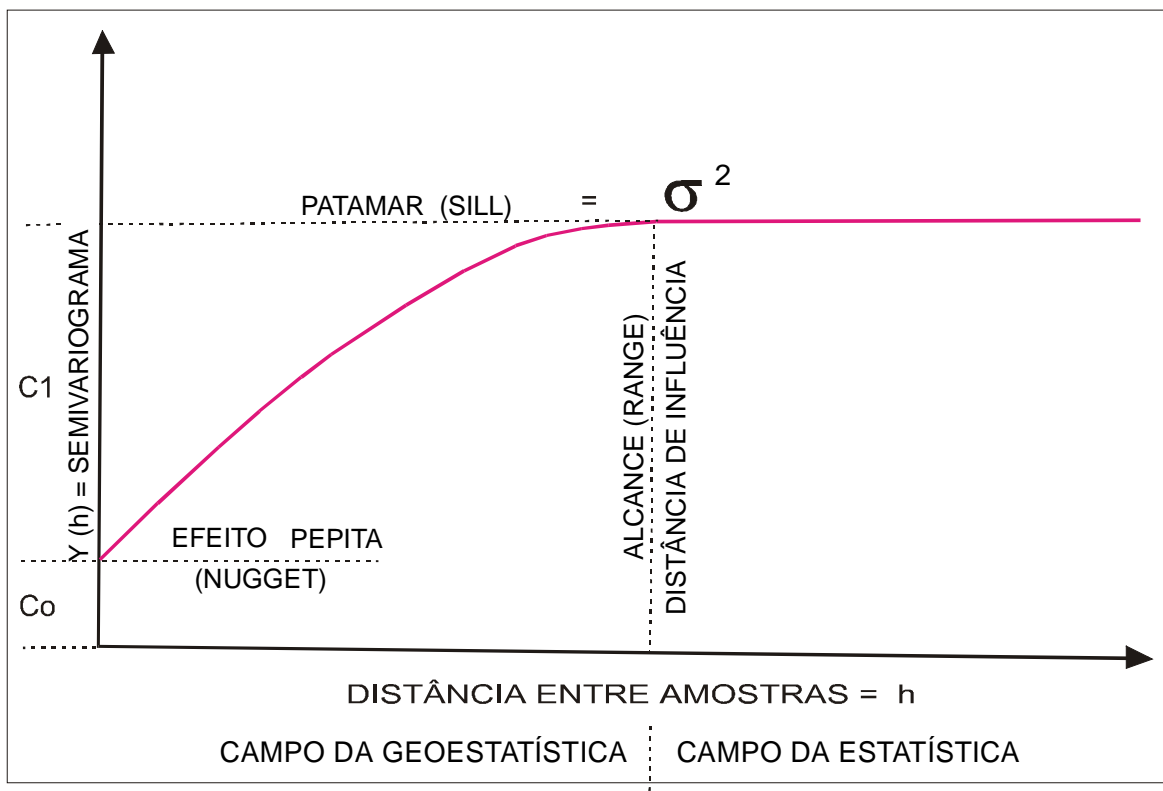


FIGURA 7.7 - Formato tradicional de um variograma com os principais componentes, segundo Issacs & Srivastava *op. cit.*

Embora o variograma devesse passar pela origem $\gamma(0) = 0$, isto raramente acontece, pois geralmente o variograma começa em um ponto positivo do eixo y . Este valor é chamado de Efeito Pepita (*Nugget Effect*). As causas deste fato são erros analíticos, erros de amostragem ou ainda uma variabilidade acentuada em pequena escala (pepita). Quanto melhor preparada a amostra, menor será o efeito pepita. O variograma, como o gráfico mostra é uma função monotônica crescente. Após o range as amostras apresentam uma independência espacial.

Segundo Journel & Huijbregts (1978), o estudo da análise variográfica é detectar a principal característica estrutural do fenômeno regional sobre estudo, pela análise dos variogramas experimentais. A informação estrutural obtida deve ser continuamente comparada com o conhecimento das características do fenômeno (geológico, tectônico, mineral). O variograma completa e enriquece o conhecimento geológico do fenômeno, uma vez que o variograma quantifica a informação estrutural para uso no procedimento de estimação.

Em certos casos, estudos geológicos podem indicar a direção de variabilidade preferida de uma mineralização, devido, por exemplo, a alteração ou dispersão. Um estudo da anisotropia (variação espacial preferencial) a partir de variogramas experimentais em várias direções permite a verificação de tais hipóteses, além disso, permitirão uma análise quantitativa da variabilidade total, devido ao fenômeno particular de dispersão ou alteração, conclui o autor.

7.1.2.2 - A escolha dos parâmetros do variograma

É necessário escolher a distância h (*lag spacing*) de separação entre os pares de amostras, o número de “lags”, a tolerância do “lag” e o ângulo azimutal da direção do “lag”. Para a distância de separação entre os pares de amostras é observado, geralmente, o padrão da campanha de amostragem e costuma-se adotar um tolerância aproximadamente da metade do “lag”. O número de “lags” deve ser suficiente para cobrir toda a área amostrada. As direções de tomadas de observações devem cobrir de 0° a 180° por medidas regularmente espaçadas, salvo o conhecimento prévio de outras informações.

Em um conjunto de dados como amostragem da espessura da camada I obtida pela campanha de 182 furos de sondagem, foi necessário verificar se os dados são mais contínuos ao longo de certas direções.

As direções escolhidas foram a cada 15° , assim a primeira foi com azimute de 0° a segunda com 15° , a terceira com 30° e assim por diante até 180° , estabelecendo-se 13 observações. Para acompanhar a malha existente também foram feitos variogramas nas direções de 57° e 147° . E o tradicional variograma onidirecional (figura 7.8) também foi realizado.

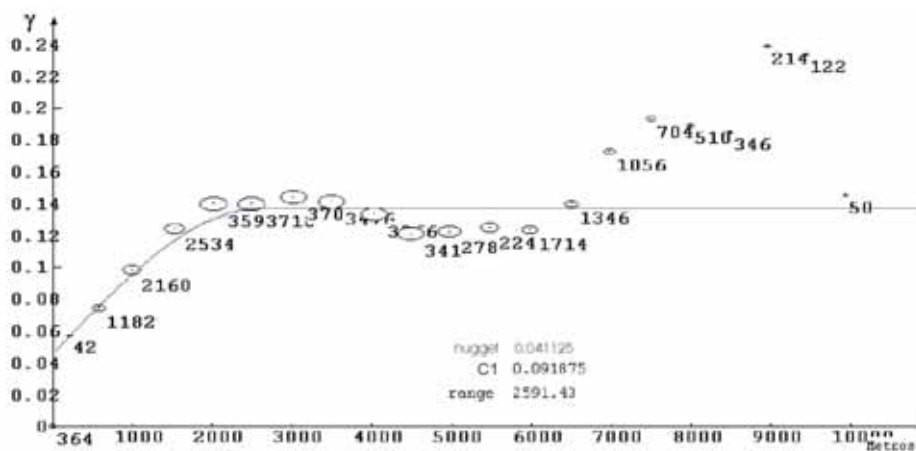


FIGURA 7. 8 - Variograma onidirecional.

Os parâmetros principais identificados na realização da série de variogramas estão apresentados na Tabela 7.3. Nas diferentes direções dos variogramas, salienta-se aquelas duas que mostram o maior e o menor alcance, quais sejam as direções de 45° e 135° . Estes variogramas são mostrados nas figuras 7.9 e 7.10.

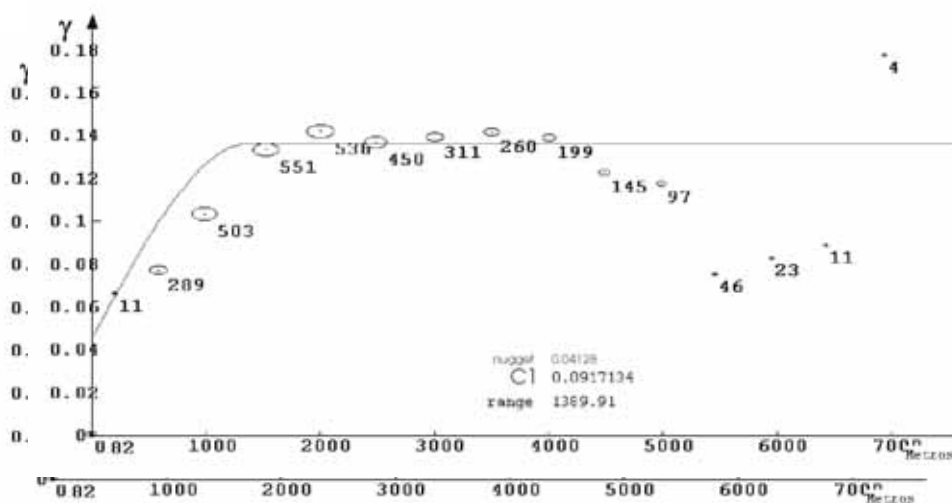


FIGURA 7.9 - Variograma de direção 45° , mostrando menor continuidade espacial.

TABELA 7.3 - Principais parâmetros identificados nos variogramas experimentais. Em destaque (negrito) as direções de maior e menor continuidade espacial da camada I.

DIREÇÃO (°)	NUGGET (Co)	(C1) (SILL-Co)	RANGE (a)	SILL
ONIDIREC.	0,04125	0,0918	2591,43	0,1330
0	0,0414	0,0917	1999,19	0,1331
15	0,0409	0,0918	1866,48	0,1326
30	0,0419	0,0916	1766,96	0,1335
45	0,0413	0,0917	1389,91	0,1329
60	0,0411	0,0920	1797,22	0,1331
75	0,0415	0,0914	1831,33	0,1329
90	0,0437	0,0920	2157,31	0,1357
105	0,0415	0,0923	2328,65	0,1338
120	0,0454	0,0901	2723,23	0,1355
135	0,0415	0,0916	2888,27	0,1331
150	0,0408	0,0918	2518,58	0,1326
165	0,0419	0,0909	2312,92	0,1328
180	0,0421	0,0914	2013,66	0,1335
57	0,0413	0,0918	1583,37	0,1331
147	0,416	0,0917	2776,33	0,1333

Graficamente, usando-se a direção do variograma e plotando nesta direção os valores dos alcances (ranges), em escala apropriada, pode-se desenhar a elipse dos alcances (figura7.11), pela união dos pontos que marcam os alcances. Esta é uma forma gráfica de se verificar as direções de menor e maior continuidade espacial, pois estas direções coincidem com os eixos menor e maior da elipse, respectivamente.

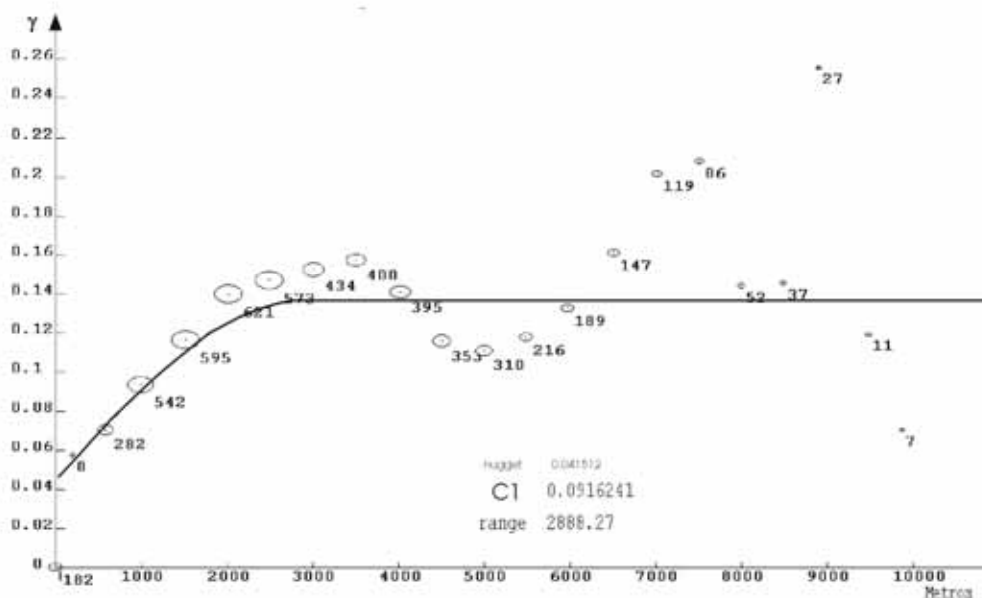


FIGURA 7.10 - Variograma com direção azimutal de 135° , alcance (range) de 2888,27 m, a maior continuidade espacial nas medidas da espessura da camada I.

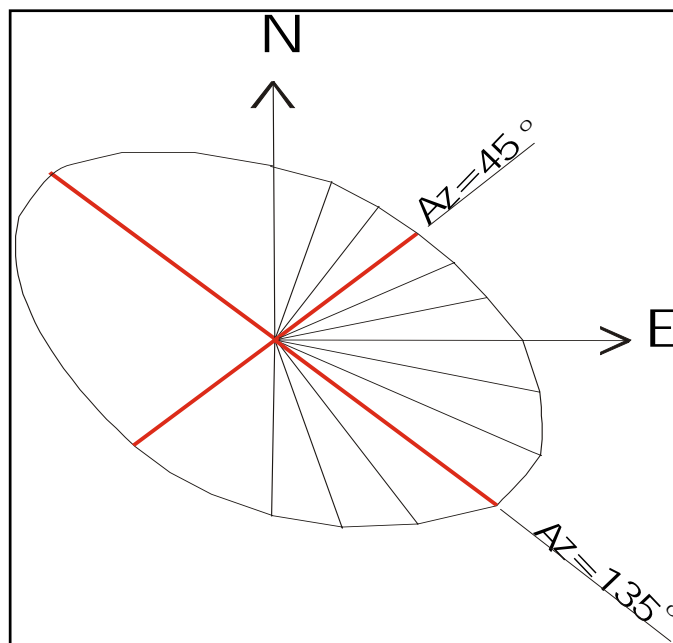


FIGURA 7.11 - Elipse dos alcances (ranges). Uma forma gráfica de se identificar as direções de maior e menor continuidade espacial da variável em estudo, coincidentes com os eixos maior e menor da elipse.

Beal et al. (1994) afirmam que é difícil encontrar-se um depósito mineral ou qualquer outro fenômeno natural cuja continuidade seja igual em todas as direções (isotropia). Quando as variáveis geoposicionadas variam de forma diferente de acordo com uma direção definida, diz-se haver anisotropia.

As observações dos semivariogramas direcionais permite identificar a existência ou não de direções diferenciadas na continuidade espacial do conjunto de dados amostrados.

A tabela 7.3 contendo os parâmetros dos variogramas e o diagrama dos alcances (elipse), principalmente, mostram claramente a evidência de anisotropia na continuidade da distribuição espacial da espessura da camada I. Apontam uma anisotropia com máxima continuidade na direção 135° de azimute e mínima continuidade espacial na direção 45° de azimute. Pode-se ainda afirmar que na direção 45° existe uma variação rápida de continuidade e que na direção de 135° existe uma variação lenta na continuidade. Verifica-se uma coincidência entre a direção de maior continuidade espacial da camada (135°) e a direção do sistema de partição do carvão (140°), relatado no capítulo 3, página 50.

A anisotropia identificada classifica-se como do tipo geométrico, já que, os semivariogramas, nas diversas direções, apresentam os mesmos patamares e efeitos pepita, mas diferentes alcances.

7.1.2. 3 - Os modelos dos variogramas

Os modelos de variogramas mais comumente usados em geociências são do tipo gaussiano, esférico e exponencial (figura 7.12). O modelo esférico apresenta um crescimento rápido na origem onde tem um comportamento linear e é o tipo mais freqüente utilizados nas variáveis em geociências.

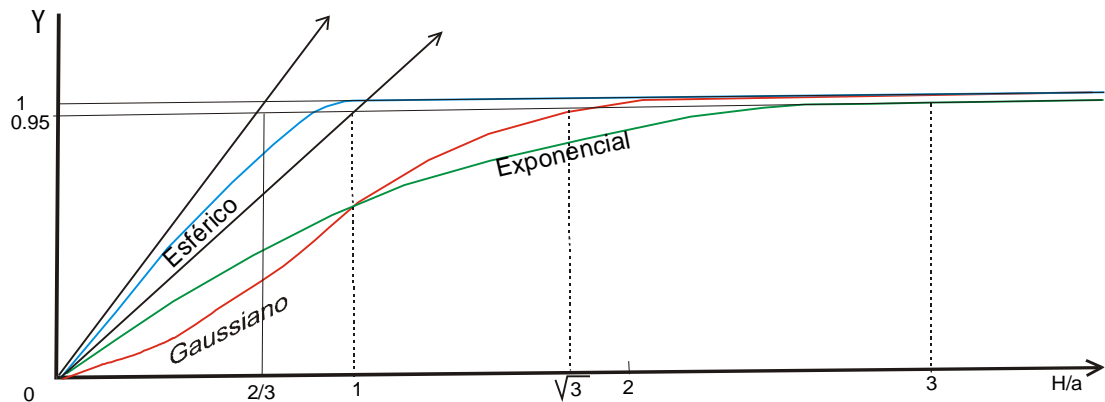


FIGURA 7.12 - Formato dos modelos de variogramas tipo esférico, exponencial e gaussiano, modificado de Andriotti (1988).

O modelo exponencial também apresenta um comportamento linear na origem. O patamar só é alcançado pela curva de forma assintótica, ou seja, teoricamente quando $h = \infty$. O modelo de Gauss ou parabólico, nas vizinhanças da origem, reflete uma grande continuidade espacial.

O modelo escolhido para especificar matematicamente a variabilidade espacial dos conjuntos de dados camada I foi o modelo esférico, cuja fórmula é:

$$Y(h) = C_0 + C_1 \left\{ \left[\frac{3}{2} * \frac{R}{a} \right] - \left[\frac{1}{2} * \left(\frac{R^3}{a^3} \right) \right] \right\} \quad 7:11$$

onde, C_0 = efeito pepita, $C_1 = (Sill - C_0)$, a = alcance e $R=2/3 a$ (ponto em que a tangente à origem intercepta a linha do patamar no gráfico do variograma).

Sabe-se que as camadas sedimentares em geral apresentam um alto grau de continuidade, como por exemplo, uma camada de carvão como a camada I. Seria de se esperar que o modelo adotado seria do tipo gaussiano, pois é o que apresenta maior

continuidade na origem. Mas face ao afastamento de 500 m dos furos de sondagem, isto é, pela escala dos dados adotou-se o tipo esférico.

As equações ajustadas para os casos dos semivariogramas onidirecional, direcional de 45° e direcional de 135° são as seguintes:

$$\gamma(h)_{(oni)} = 0,04125 + 0,0918 * ((3/2 * 1727,63/2591,43) - (1/2 * (1727,63/2591,43)^3))$$

$$\gamma(h)_{(45-\text{mín})} = 0,0413 + 0,0917 * ((3/2 * 926,606/1389,91) - (1/2 * (926,606/1389,91)^3))$$

$$\gamma(h)_{(135-\text{máx})} = 0,0415 + 0,0916 * ((3/2 * 1925,51/2888,27) - (1/2 * (1925,51/2888,27)^3))$$

As equações de mínima e máxima continuidade do modelo esférico foram utilizadas para o processo estimativa por krigagem.

7.1.3 – Estimativas

Os processos de estimativas geralmente envolvem uma combinação linear, (Issacks & Srivastava op. cit.) sendo o valor estimado (\hat{e}) calculado através da seguinte fórmula:

$$\hat{e} = \sum_{i=1}^n w(i) * v(i) \quad 7:12$$

Onde $v_1, v_2, \dots, v_n, v(i)$ são os valores dos dados amostrais disponíveis e $w(i)$ são os n pesos consignados aos valores de $v(i)$. Desta forma, podemos estimar qualquer

ponto onde não temos amostras, usando uma combinação linear ponderada com as amostras conhecidas.

A relação das amostras disponíveis com o restante dos valores desconhecidos será dada por um tipo de modelo: geológico, probabilístico ou determinístico.

Poucos problemas em geociências são suficientemente entendidos de modo a permitir um estudo determinístico para a estimação. Os fenômenos em geociências envolvem processos muito complexos, e nosso entendimento sobre eles é de tal forma tão pobre, que sua complexidade nos parece um comportamento aleatório (randômico), mas na realidade, eles não são gerados de forma aleatória.

Existe uma grande incerteza sobre o que acontece nos locais não amostrados. Por esta razão os processos geoestatísticos de estimação são baseados em modelos probabilísticos que reconhecem esta inevitável incerteza. O modelo probabilístico permite incorporar a incerteza por considerar as amostras como resultado de um processo aleatório.

7.1.3.1 - O conceito de função e variável aleatórias

Journel & Huijbregts (1978) definem variável aleatória (VA) como uma variável que assume certos números ou valores numéricos de acordo com uma certa distribuição de probabilidade. Por exemplo, o resultado do evento 'jogar um dado não tendencioso e verificar o valor', pode ser considerado como uma VA. Esta VA que pode assumir um entre seis valores com iguais probabilidades (1/6). Se um resultado do evento for, por exemplo 5, então, por definição, nós dizemos que este valor 5 é o resultado da realização particular da VA.

Similarmente, por exemplo, considerando o teor de cobre = 1,5% como $z(x_1)$ em um local particular de um depósito de cobre. Este teor pode ser considerado como uma realização de uma certa VA $Z(x_i)$ definida no ponto x_1 . Então o conjunto de teores em

todos o outros pontos $x(s)$ do depósito, i. é, a Variável Regionalizada de $z(x)$ pode ser considerada como uma realização de um conjunto de $V A\{Z(x), x \in \text{ao depósito de cobre}\}$. Este conjunto de VA é chamado de função aleatória (FA), e escrita como $Z(x)$. Podemos afirmar, então, de outra forma que FA é um conjunto de VA com alguma localização espacial e com uma distribuição específica associada, concluem os autores.

Uma FA tem muitas realizações e cada uma das quais passa pelos valores das amostras disponíveis e tem um padrão de continuidade espacial especificado pelo modelo variográfico, (variograma).

Cada possível realização de uma VA tem sua probabilidade de ocorrência, chamando:

$v(1), v(2), \dots, v(n)$ os prováveis resultados das realizações (espaço amostral) e $p(1), p(2), \dots, p(n)$ as probabilidades correspondentes.

O valor esperado, $E\{V\}$, que é semelhante a média em um conjunto de dados, representa uma média ponderada por n realizações, com cada realização sendo ponderada por sua probabilidade ($p(i)$) de ocorrência.

$$E\{V\} = \tilde{m} = \sum_{i=1}^n p(i) * v(i) \quad 7:13$$

Ao se estimar um valor em um determinado local $\hat{e}(x_0)$, (equação 7:12), sendo $w(i)$ e $v(x_i)$ respectivamente o peso e valores dos dados amostras existentes pode-se cometer um erro nesta posição.

$$\hat{e}(x_0) = \sum_{i=1}^n w(i) * v(x_i) \quad 7:14$$

O erro residual $\delta(x_0)$ será dado pela seguinte fórmula:

$$\delta(xo) = \hat{e}(xo) - v(xo) \quad 7:15$$

Que é a diferença entre o valor estimado $\hat{e}(xo)$ e o valor real ($v(xo)$). Expressando a equação 7:15 em termos da equação 7:14, resulta:

$$\delta(xo) = \sum_{i=1}^n w(i) * v(xi) - v(xo) \quad 7:16$$

Então calcula-se o erro médio (A) para n localizações:

$$A = 1/n \sum_{i=1}^n \delta(xo) \quad 7:17$$

O que se deseja é que o erro médio para o conjunto de dados seja zero. A dificuldade aparece pois desconhece-se o valor verdadeiro $v(xo)$. Então é necessário usar-se um modelo e para este modelo se estabelece que o valor esperado do erro é zero.

$$E\{\delta(xo)\} = E\left\{\sum_{i=1}^n w(i) * v(xi) - v(xo)\right\} \quad 7:18$$

$$E\{\delta(xo)\} = \sum_{i=1}^n w(i) * E\{v(xi)\} - E\{v(xo)\} \quad 7:19$$

Para qualquer ponto que se tenta estimar um valor desconhecido, o modelo de função aleatória é assumido como **estacionário**, pois terá uma mesma lei de probabilidade, e o valor esperado para cada VA é $E\{V\}$. Tendo assumido a estacionaridade da função aleatória, pode-se expressar a equação 7:19 desta forma :

$$E\{\delta(xo)\} = \sum_{i=1}^n w(i) * E\{V\} - E\{V\} \quad 7:20$$

O valor esperado do erro em qualquer localização particular é, geralmente, referido como tendencioso (**enviesado**). Estabelecendo-se que o valor esperado do erro seja zero, para garantir a não tendenciosidade, resulta a seguinte conclusão:

$$E\{\delta(xo)\} = 0$$

$$E\{\delta(xo)\} = \sum_{i=1}^n w(i) * E\{V\} - E\{V\}$$

$$0 = \sum_{i=1}^n w(i) * E\{V\} - E\{V\}$$

$$\sum_{i=1}^n w(i) = 1$$

7 : 21

Portanto, ao se desejar uma estimativa não tendenciosa (“unbiased”), deve-se restringir a combinação linear ponderada de forma que os pesos **somem 1**.

7.1.3.2 – Processos de estimativa de pontos

Para estimar um valor em um ponto com localização específica, usa-se ainda uma combinação linear ponderada, mas os pesos necessitam levar em conta não somente uma possível clusterização, mas também a distância de separação à amostras próximas. Abordou-se os quatro métodos mais comuns de estimação.

7.1.3.2.1 - Processo dos polígonos

Em torno do ponto amostral é criado um polígono de influência que mantém dentro de sua superfície o atributo do ponto. O polígono é criado através de linhas

mediatrizes que separam medianamente o ponto de seus vizinhos mais próximos. O ponto desconhecido receberá o atributo do polígono onde ele estará inserido. Este método também pode ser referido como método do vizinho mais próximo, pois, o polígono delimita as menores distância ao ponto que lhe deu origem.

7.1.3.2.2 - Processo da triangulação

Método estabelece vários triângulos com vértices em três pontos amostrais, que definirão planos de interpolação. Existem várias possibilidades para escolher os triângulos em um conjunto de dados. Um processo bem conhecido de triangulação, o processo denominado triangulação de Delaunay é facilmente calculado e é baseado na propriedade de produzir triângulos que sejam o mais equiláteros possíveis.

Tendo como exemplo a figura 7.13, para se determinar o atributo “d” ponto D a ser interpolado pelo método da triangulação, usa-se a seguinte fórmula:

$$d = (a * \text{área do } \Delta DBC + b * \text{área } \Delta DCA + c * \text{área } \Delta DAB) / (\text{área do } \Delta ABC)$$

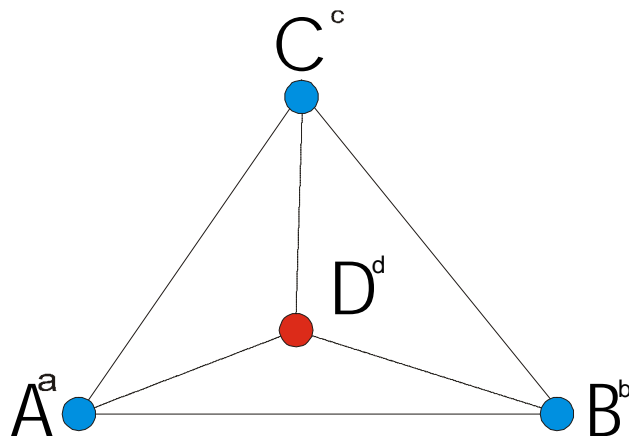


FIGURA 7.13 - Interpolação por triangulação. Pontos em azul são pontos amostrais e em vermelho é o ponto a ser interpolado. A letra maiúscula indica o nome do ponto e a letra minúscula sobrescrita é o atributo do ponto.

7.1.3.2.3 - Processo do inverso da distância

Método que se baseia na continuidade espacial pois aplica maior peso às amostras mais próximas e menor peso àquelas mais afastadas.

$$\hat{e} = \left(\sum_{i=1}^n (1/d_i) * v_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n (1/d_i) \right) \quad 7 : 22$$

Sendo \hat{e} o valor do ponto a ser estimado, $d(i)$ as distâncias de separação dos pontos amostrais ao ponto a ser estimado e $v(i)$ os valores dos pontos amostrais. Este método ainda possibilita que a ponderação da distância seja elevada a uma potência. A potência mais comumente usada é a de 2ª ordem, por esta razão o método também é conhecido como inverso do quadrado da distância.

7.1.3.2.4 - Processo da krigagem ordinária

Por ser o método adotado para se fazer as estimativas da variável estudada neste trabalho, este processo foi abordado com maior intensidade.

Como foi destacado inicialmente no capítulo 2, este método de interpolação é conhecido pelo acrônimo B.L.U.E., que representa “best linear unbiased estimator”. Sendo linear porque suas estimativas são uma combinação linear ponderada; ‘unbiased’ (não tendencioso) pois que tenta ter **média do erro residual igual a zero**, e ‘best’ porque almeja **minimizar a variância do erro residual**. É esta última característica que distingue a krigagem ordinária dos outros métodos de interpolação. Na prática o erro médio e a variância do erro médio são sempre desconhecidos.

Então é construído um modelo de probabilidade no qual a tendenciosidade (“bias”) e a variância do erro podem ser ambos calculados. Escolhe-se os pesos para pontos amostrais próximos que asseguram que o erro médio do modelo seja exatamente zero e que a variância do erro do modelo seja minimizada. Journel & Huijbregts (1978) e Isaaks & Sirivastava (1989) apresentam o desenvolvimento do cálculo do sistema da krigagem e da variância do erro de estimativa.

O sistema de krigagem leva em conta a geometria do domínio estudado, as distâncias entre o estimado e os estimadores, a geometria interna da formação e a estrutura do fenômeno estudado pois utiliza a função variograma ou a função covariância.

Os valores otimizados para os pesos podem ser encontrados pela solução de um conjunto de equações simultâneas, as quais incluem valores de variogramas ou funções covariâncias das variáveis estudadas. Portanto, o método da krigagem usa as informações do variograma para encontrar o melhor conjunto de pesos que usa na estimativa.

A minimização de uma função de n variáveis usualmente se desenvolve pelo estabelecimento das n derivadas parciais iguais a zero. Isto produz um sistema de n equações e n incógnitas que pode ser resolvido por métodos de solução de sistemas de equações lineares. O sistema de equações resultante é referido como sistema de krigagem ordinária e pode ser descrito na notação de matrizes por:

$$\begin{bmatrix} Y(h_{11}) & Y(h_{12}) & \dots & Y(h_{1n}) & 1 \\ Y(h_{21}) & Y(h_{22}) & \dots & Y(h_{2n}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y(h_{n1}) & Y(h_{n2}) & \dots & Y(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(h_{1e}) \\ Y(h_{2e}) \\ \dots \\ Y(h_{ne}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ou, resumidamente:

$$\mathbf{C} \mathbf{x} = \mathbf{D}$$

Onde \mathbf{C} é uma matriz quadrada com diagonal principal positiva, que representa a função variograma (pode ser também a função coovariância) da distância h que separa os pontos amostrais entre si.

\mathbf{W} é o vetor com os pesos de ponderação e o termo lagrangeano (μ).

E \mathbf{D} é um vetor que representa a função variograma da distância h que separa os pontos amostrais e o ponto estimado.

Em termos de matrizes a variância minimizado do erro (σ_r^2) é escrita:

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 - \mathbf{W} * \mathbf{D} \quad 7 : 23$$

Sendo (σ^2) a variância a total dos dados. O desenvolvimento do sistema passa pela determinação da matriz inversa \mathbf{C}^{-1} .

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}^{-1} * \mathbf{D} \quad 7 : 24$$

Conhecendo-se todos os n pesos, então pode-se calcular o valor do ponto estimado ($\hat{e}(x_0)$) e a variância minimizado do erro (σ_r^2).

$$\hat{e}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i y_i$$

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n w_i Y_{hie} + \mu \quad 7 : 25$$

A krigagem ordinária é executada pelo programa kt3d da GSLIB.

Uma vez que tenham sido realizados os processos estimativa por krigagem ordinária, é necessário fazer a validação do processo. A primeira etapa da validação é verificada pela plotagem do histograma dos erros de estimação. A média do erro de estimativa do modelo deve ser zero. A figura 7.14 mostra o histograma da distribuição do erro.

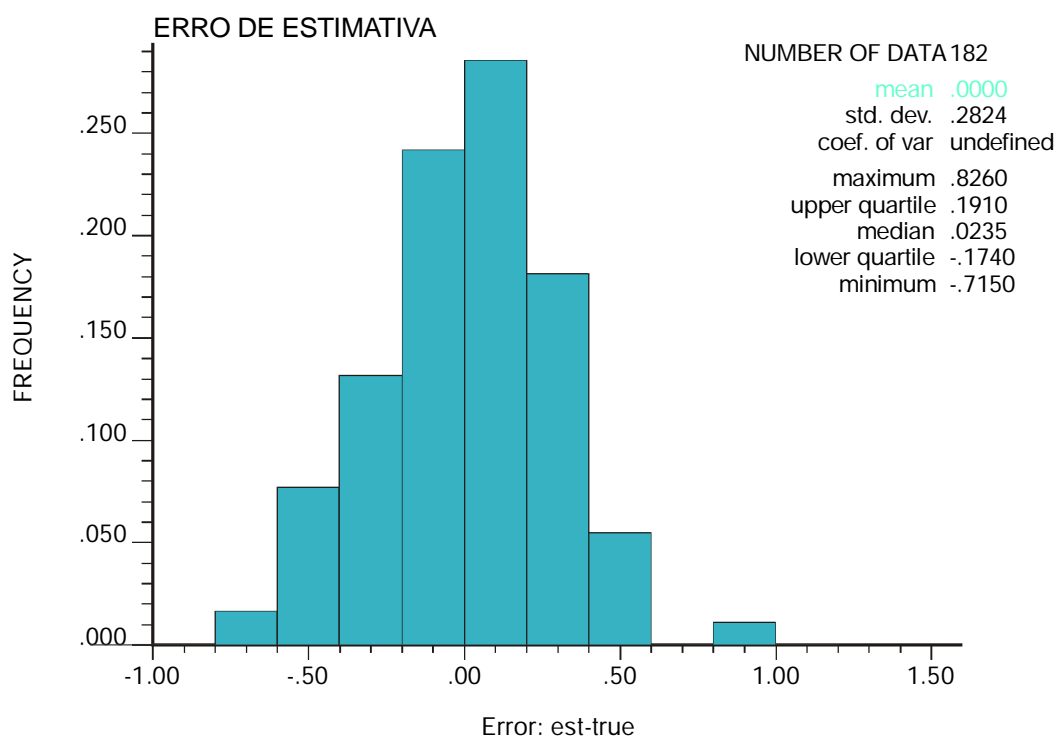


FIGURA 7.14 - Histograma do erro de estimativa da krigagem ordinária (erro residual). A figura é uma das formas da validação do processo, pois mostra que a média do erro é zero.

A segunda maneira de validarmos o processo é através da rotina de validação cruzada existente no programa Kt3d do GSLIB. Esta rotina executa o seguinte procedimento: um ponto amostral é retirado do conjunto e usando as demais amostras estima-se este mesmo ponto por krigagem ordinária usando o mesmo modelo variográfico. O procedimento é executado para todos os demais pontos amostrais. O valor esperado

deverá ser o mais próximo possível do valor verdadeiro. Uma maneira de se visualizar a comparação entre o valor estimado e o valor verdadeiro é através de “scatterplot”. A disposição próxima a linha de 45° indica que o modelo variográfico reproduz adequadamente a continuidade espacial, (figura 7.15).

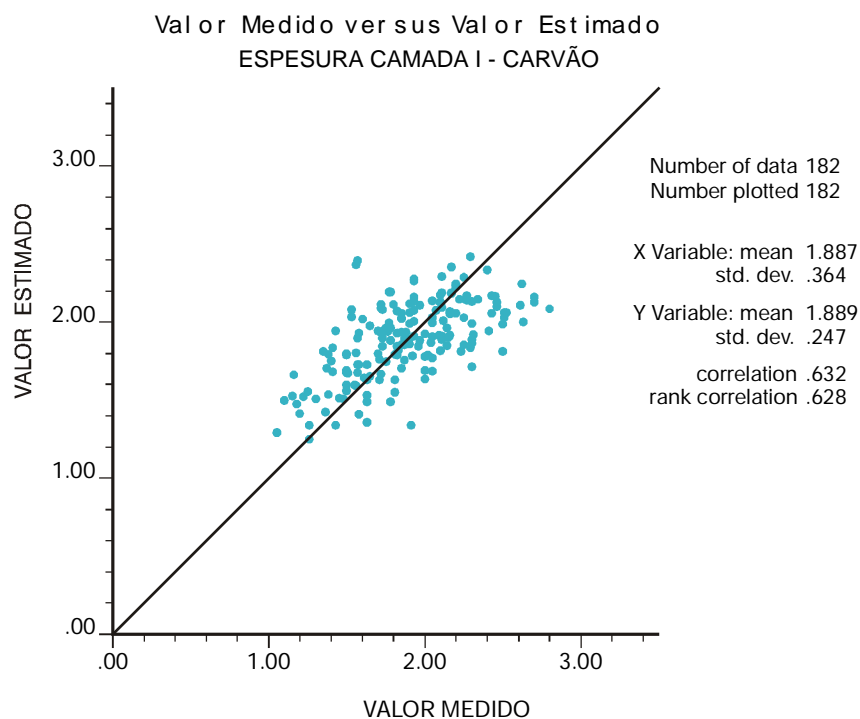


FIGURA 7.15 - Visualização do modelo através de um “scatterplot” do valor estimado e o valor medido (real). A proximidade dos pontos em torno da reta de 45° valida o processo.

7.2 - Cubagem da camada I

Para obter a estimativa do volume e posteriormente a cubagem da camada I, foi necessário, inicialmente, a determinação da área pesquisada. Borba & Correa (1994) salientam, que para a estatística, a área deve ser considerada rigorosamente aquela circunscrita à poligonal convexa delimitada pelos furos de sondagem.

Para o cálculo da área da camada de carvão I no local pesquisado, utilizou-se o modelo de variograma determinado anteriormente e realizou-se uma krigagem ordinária por blocos. Cada bloco medindo 250 por 250 metros com 16 pontos por bloco. Assim foram criados 1710 blocos com área individual de 62500 metros quadrados, resultando numa área total de **106.875.000,00 metros quadrados** (Figura 7.16).

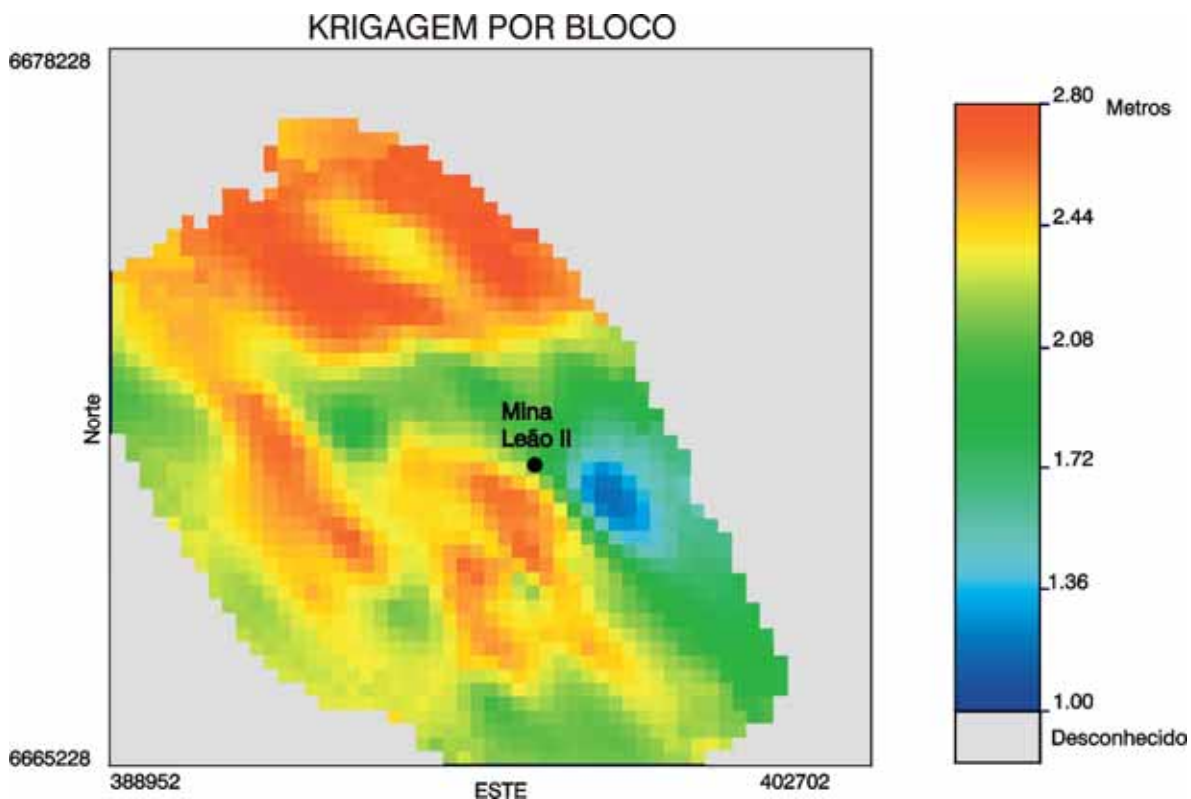


FIGURA 7.16 - Imagem do resultado da krigagem ordinária tipo bloco da camada de carvão I. A escala de cores se refere a espessura da camada. Cada bloco mede 62.500 m². Área total de 106.875 .000 m².

Verificou-se na figura 7.16 que os blocos situados no terço superior, ao norte, apresentam as maiores espessuras da camada. Também são importantes as espessuras próximas à metade da área, principalmente nos setores sudoeste e sudeste. Os blocos com menores espessuras situam-se na metade inferior no lado leste.

Esta mesma krigagem por blocos efetuada acusou os seguintes resultados:

Média (m) : 1,8812 m, Desvio Padrão(σ) : 0,2414 m e Variância (σ^2) : 0,0583.

A imagem dos erros de estimativa corresponde a figura 7.17. As maiores variâncias do erro de estimativa se encontram no extremo norte da área. Considerando as medidas da espessura da camada I como tendo distribuição normal, a obtenção do volume requer o conhecimento da área e a medida da espessura média da camada, que o programa kt3d do GSLIB, opção de krigagem por bloco acusou o valor de **1,8812 metros**. Esta média da espessura se refere a camada total de carvão (CT). Segundo DNPM (1996), o carvão contido na camada (CC) para o estado do RS corresponde a 80% do camada total (CT). Efetuando $1,8812 * 0,80$ tem-se a espessura média de carvão na camada que será **1,50496 m**.

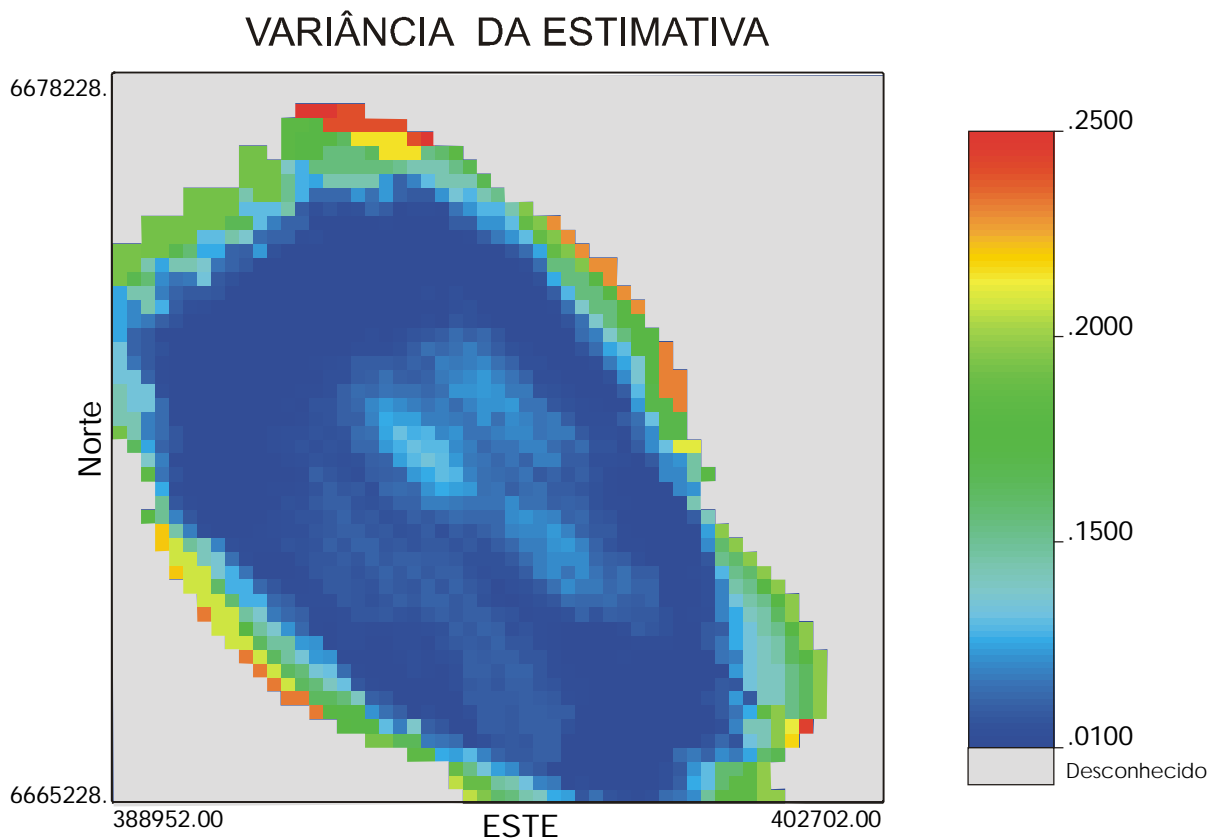


FIGURA 7.17 - Imagem da variância de estimativa pelo processo de krigagem por blocos para os dados da espessura da camada I.

Freitas (1985) comenta que no cálculo de uma reserva mineral, o que se faz é uma estimativa, por meio de tratamento estatístico dos valores amostrados de uma ocorrência mineral. E seria, portanto, mais correto adotar a terminologia de estimativa de reserva em vez de cálculo de reserva.

Para Borba (op. cit.) ao se multiplicar a área por a média da espessura, cerca de 50% do volume está sendo superestimado e 50% do restante estará sendo subestimado, ocorrendo uma perfeita compensação.

O volume total de carvão pode ser estimado simplesmente pela multiplicação da média de todos os valores de espessura ao longo da malha pelo somatório das áreas das unidades que o compõem. E o volume de carvão pode ser convertido de uma medida cúbica para tonelagem usando para tal a densidade do minério (Costa, 1991).

Então, $106.875.000,00 \text{ m}^2 * 1,50496 \text{ m} = \mathbf{160.842.600 \text{ m}^3}$ que é o volume total estimado de carvão na camada .

Ao se considerar o peso específico de **1,75 ton/m³** conforme DNPM, (1996) para o carvão existente na camada I, na área amostrada, chega-se ao resultado de **281.474.550 toneladas**, ou seja, **281,5 milhões de toneladas** como sendo a estimativa total de carvão "in situ" da camada I na área estudada.

Ao realizar estimativa deve-se indicar a margem de erro associada a nossas estimativas.

Hoel (1977) assinala que há dois tipos de estimativas de parâmetros de uso comum na estatística. Um é chamado estimativa por ponto e o outro, estimativa por intervalo. Uma estimativa por ponto é a espécie familiar de estimativa, i. é., um número obtido por operações sobre os valores da amostra, que serve como uma aproximação do parâmetro estimado. Por exemplo, a média da amostra é uma estimativa por ponto da média da população.

Uma estimação por intervalo para um parâmetro é um intervalo determinado por dois números obtidos de operações sobre os valores amostrais que se espera contenha o valor do parâmetro, no seu interior. A estimativa por intervalo é usualmente construída da tal maneira que a probabilidade do intervalo conter o parâmetro possa ser especificada. A vantagem da estimativa por intervalo é que ela mostra quão precisamente o parâmetro está sendo estimado. Se a extensão do intervalo é muito pequena, uma alta precisão foi atingida. Tais estimativas por intervalo são chamadas de intervalos de confiança.

Fonseca & Martins (1996) afirmam que a partir de intervalos de confiança, construídos a partir dos elementos amostrais, pode-se inferir sobre um parâmetro populacional. O cálculo do intervalo de confiança quando conhecida a variância amostral é efetuada pela seguinte fórmula:

$$P[m - z(\alpha/2)(\sigma/\sqrt{N}) \leq \mu \leq m + z(\alpha/2)(\sigma/\sqrt{N})] = 1 - \alpha \quad (7:25)$$

P = probabilidade

m = média amostral

z = variável reduzida normal

α = nível de significância

σ = desvio padrão amostral

μ = média da população

N = tamanho da amostra

Aplicando a fórmula acima para a média da krigagem por blocos com um nível de significância de 95%, obtém-se:

$$P[1,50496 - 1.96 * (0,2414/\sqrt{182}), \mu, 1,50496 + 1.96 * (0,2414/\sqrt{182})] = 95\%$$

$$P[1,50496 - 0,0351, \mu, 1,50496 + 0,0351] = 95\%$$

[1,4699 ; 1,5401] é o intervalo, portanto, que contém a média da população com 95% de confiança. Para um nível de confiança de 68,26 % o cálculo foi o seguinte:

$$P[1,50496 - 1 * (0,2414/\sqrt{182}) , \mu , 1,50496 + 1 * (0,2414/\sqrt{182})] = 68,26\%$$

$$P[1,50496 - 0,0179 , \mu , 1,50496 + 0,0179] = 68,26\%$$

[1,4871 ; 1,5229] é o intervalo que contém a média verdadeira com 68,26% de confiança.

Desta forma, a partir dos intervalos de confiança da média da espessura da camada I de carvão, pode-se estender o intervalo de confiança para as variáveis volume e tonelagem da reserva, sem considerar, entretanto, os erros na medida da densidade do carvão (tabelas 7.4 e 7.5).

TABELA 7.4 - Estimativa da tonelagem para espessura mínima e máxima com intervalo de confiança de 95 %.

Intervalo de confiança = 95 %			
Área (m ²)	Espessura (m)	Volume (m ³)	Tonelagem (ton)
106.875.000	1,4699 (mín)	157.095.562	274.917.234 (mín)
106.875.000	1,5401 (máx)	164.598.188	288.046.829 (máx)

TABELA 7.5 - Estimativa da tonelagem para espessura mínima e máxima com intervalo de confiança de 68, 26 %.

Intervalo de confiança = 68,26 %			
Área (m ²)	Espessura (m)	Volume (m ³)	Tonelagem (ton)
106.875.000	1,4871 (mín)	158.933.812	278.134.171 (mín)
106.875.000	1,5229 (máx)	162.759.938	284.829.892 (máx)

8 - CONCLUSÕES

As ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica, utilizadas neste trabalho, para a identificação e classificação de áreas para depósitos de rejeitos de carvão, geraram um mapa temático com cinco classes, assim denominadas: área de restrição, área péssima, área regular, área boa, e área ótima. As extensões de cada classe em quilômetros quadrados são as seguintes: área de restrição = 24,5349, péssima = 2,335, regular = 9,81540, boa = 24,5862 e ótima = 20,8674.

O sítio escolhido para o local de depósito reúne varias características consideradas adequadas: apresenta uma área contínua de 7 hectares situada sobre a classe ótima, dista 500 metros em média da boca da mina e o acesso se dá livremente sem passar através de drenagem.

A análise do mapa de aptidões para depósito de rejeitos, revela que a classe do terreno definida como “ótima” tem uma relativa coincidência com a área da ocorrência da Formação Rio do Rastro. Isto ocorre, porque no espaço geográfico de ocorrência desta formação, temos predominância de campos, declividades baixas e um pequeno a médio afastamento da boca da mina. Desta forma, 50% da extensão de ocorrência da Formação Rio do Rastro se situa na classe “ótima”.

O estabelecimento das rotas de menor custo, entre o ponto de saída (boca da mina) e os pontos de destino (BR290 e porto no Rio Jacuí), sobre a imagem de custo (ou superfície de atrito) é realizado através de representações vetoriais. A primeira, entre a mina e a BR290 mede 7.143,8 metros e a segunda entre a mina e o porto mede 15.226,8 metros.

Os traçados das vias de menor custo entre a mina Leão II e BR 290 e entre a mina Leão II e o porto no Rio Jacuí, seguiram, preferencialmente, devido às ponderações das superfícies de atrito adotadas nesta etapa, dentro da classe de campos, contornando as classes de florestas, corpos de água, áreas urbanizadas e solos arados. Isto significa, que mesmo aumentando o percurso, ainda foi mais compensador executar os desvios, devido às ponderações atribuídas.

Através das técnicas utilizadas, pôde-se verificar de uma forma simples, as áreas mais adequadas ao objetivo proposto, áreas estas que devem ser consideradas em caso de futuros planejamentos. O método utilizado contempla a vantagem de apresentar o rigor matemático associado a uma forma simples e acessível de visualização, possibilitando mesmo a leigos compreender os resultados.

A metodologia adotada para o cruzamento de diferentes planos de informações, sejam eles fatores absolutos como a zona de proteção de drenagem, zonas de proteção em torno dos falhamentos e zonas com declividades superiores a 8 %, ou sejam fatores relativos, tais como as classes de uso e cobertura do solo, a função fuzzy da declividade de 0 a 8%, o substrato litológico e distância a partir da boca da mina, através de sistemas de informação geográfica, com os seus pesos relativos assinalados, se demonstrou útil para localizar e classificar os sítios mais adequados para depósito dos rejeitos de carvão.

As ponderações atribuídas aos fatores relativos, utilizadas neste trabalho, bem como os critérios absolutos considerados foram os responsáveis pelos resultados obtidos na definição dos locais para depósito de rejeitos. O cenário seria diferente se fossem considerados outros valores de ponderações que não aqueles consignados.

A técnica de geoprocessamento, utilizada neste trabalho, pode ser realizada em outras atividades que necessitem processar e integrar dados do espaço geográfico e ter como resultado a definição e a classificação de sítios adequados para um determinado objetivo.

Em relação aos estudos geoestatísticos sobre a amostragem de dados da espessura da camada "T", as observações dos variogramas direcionais, permitem

identificar a existência de direções preferenciais para a continuidade espacial. Verifica-se uma maior continuidade espacial na direção de 135° e uma menor continuidade espacial na direção de 45° .

Existe uma coincidência entre o azimute da direção de máxima continuidade espacial da espessura da camada “I”, verificada no variograma de 135° , e a direção do esforço principal gerador do sistema de partição do carvão (cleat system), que é de 140° e que pode ter sido a última estrutura de origem tectônica do carvão.

O método de estimativa da variável espessura da camada inferior I, utilizado neste trabalho, adota um modelo de probabilidade na qual escolhe-se os pesos para pontos amostrais que asseguram que o erro médio do modelo seja exatamente zero e que a variância do erro do modelo seja minimizada. Através do processo de validação cruzada, o modelo variográfico foi testado com os dados amostrais e considerado adequado, graficamente, para reproduzir a continuidade espacial da variável estudada.

A imagem da krigagem por blocos mostrou que os blocos situados no terço superior, ao norte da área estudada, apresentam as maiores espessuras da camada, embora no extremo norte, também tenhamos elevada variância nas medidas do erro de estimativa. Também é evidenciado que são importantes as espessuras próximas à porção central sudeste e sudoeste. Os blocos com menores espessuras situam-se na metade inferior do lado este da área.

O processo de krigagem por blocos acusou para a camada total de carvão as seguintes medidas: média (m): 1,8812 m, desvio padrão (σ): 0,2414 e variância (σ^2): 0,0583. Considerando o carvão da camada como sendo 80% da camada total de carvão, estimamos a tonelagem de carvão dentro do intervalo de 274.917.234 a 288.046.829 toneladas com nível de confiança de 95%.

A observação da modelagem digital do terreno (MDT) evidencia que as maiores elevações se situam no sul da área estudada, principalmente no sudeste. O terreno pode ser classificado, segundo os tipos de relevo adotados por Garcia & Piedade (1978), como sendo do tipo ondulado, pois os desníveis em sua maioria não ultrapassam os 20 metros. As encostas são do tipo planas a levemente convexas.

As maiores declividades se concentram em faixas com direções predominantemente N/NE, direções estas que coincidem com a alongação das elevações.

As correções geométricas, por georreferenciamento, efetuadas nas imagens orbitais da região de estudo, apresentaram um erro médio quadrático na ordem de 14,86 metros. Este valor é considerável aceitável, uma vez que é menor que a resolução espacial das imagens TM, a qual é de 30 metros.

Através da classificação não supervisionada foram identificadas oito classes espectrais da área de estudo coberta pela imagem: campo 1, campo 2, mata nativa e plantada, solo exposto, culturas agrícolas, água com sedimentos, represas e solo exposto úmido.

Utilizando-se o processo de classificação digital não supervisionada aliada às verificações de campo e ainda aplicando-se operações com imagens, foi elaborado o mapa de uso e cobertura do solo para a região de estudo, com as seguintes classes: campos, mata nativa, solo arado/exposto, corpos de água, rejeitos de carvão/solo exposto, urbano e floresta plantada.

Tanto as técnicas de classificação digital e as operações aplicadas às imagens de sensoriamento remoto, para obter mapa de uso e cobertura do solo e mapa de proteção da faixa de drenagem, assim como os processos de transformação dos dados analógicos da altimetria do terreno em dados digitais para a modelagem numérica do terreno e determinação do mapa de declividades, foram consideradas eficientes neste trabalho.

9 - RECOMENDAÇÕES

As escolhas dos critérios, fatores e ponderações nos projetos que envolvam tomadas de decisões sobre o espaço físico, em geoprocessamento, devem ser feitas por uma equipe multidisciplinar, agregando conhecimentos e interesses de diferentes áreas: tecnológica, ambiental e econômica.

Neste trabalho, as faixas de proteção em torno da drenagem e dos planos de falhas foram estabelecidas com valores na ordem de 100 e 50 m respectivamente para ambos os lados. Estes valores foram definidos com larga margem de segurança, uma vez que os rejeitos de carvão apresentam compostos altamente poluentes, como sulfetos que ao entrarem em contato com o meio ambiente na presença de oxigênio e água produzem ácido sulfúrico, causando a diminuição do ph e aumento da acidez. O estabelecimento da largura das faixas de proteção requer um estudo detalhado do produto depositado.

O software Idrisi foi considerado eficiente para a realização das tarefas de geoprocessamento neste trabalho. A começar pelo preparo dos fatores absolutos e relativos a partir dos dados disponíveis, passando pela ponderação dos mesmos e finalizando pelo cruzamento dos diferentes planos de informações. A imagem resultante do cruzamento ao ser equalizada em um número opcional de classes apresenta qualidade visual acentuada.

O fator substrato litológico utilizado baseou-se nos dados disponíveis que continham informações a nível de formações estratigráficas. As formações existentes no local de estudo foram reclassificadas e ponderadas em função do ambiente de deposição e da conseqüente probabilidade do ambiente ser gerador de rochas impermeáveis. Assim as Formações Irati/Estrada Nova receberam uma ponderação

superior. Existindo o conhecimento bem detalhado de cada uma das diferentes formações ocorrentes na área de estudo, seja pela descrição dos furos de sondagens ou por outros meios, é possível identificar variações litológicas dentro de uma formação. E assim, identificar a ocorrência de níveis de seqüências finas e impermeáveis entre rochas permeáveis. Desta forma, pelo conhecimento do detalhe das variações litológicas dentro de uma formação, pode-se atribuir um ponderação mais coerente e menos generalizada.

Ao realizar um tratamento geoestatístico de uma variável geoposicionada deve-se efetuar quatro etapas diferentes: análise estatística básica, análise da continuidade espacial, estimativa e validação da estimativa. O processo de estimativa utilizando-se o método da krigagem ordinária é aconselhado pelo fato de representa uma estimativa não tendenciosa e que apresenta ainda uma variância minimizada do erro residual.

10 - BIBLIOGRAFIA

- AB'SABER, N. A. 1969. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do rio grande do sul. Geomorfologia. Universidade de São Paulo. Instituto de Geografia. São Paulo, 15p.
- ASRAR, G. 1989. Introduction. In: ASRAR, G. Theory and application of optical remote sensing. John Wiley & Sons. p1-13.
- ANDRIOTTI, J. L. S. 1988. Introdução à geoestatística. Estudos Tecnológicos. Ata Geológica Leopoldensia 27. Universidade do Vale do Rio do Sinos. São Leopoldo, p. 7-82.
- BARROS, W. D. 1956. A erosão no Brasil. Ministério da Viação e Obras Públicas. Serviço de Documentação. Coleção Mauá. Rio de Janeiro. 350 p.
- BEAL, C. R.; FILHO, J. C.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. 1994. Estimativa de recursos de carvão por análise geoestatística. Egatea. Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, v 22, n.1, p. 46-56.
- BINOTO, R. B. 1997. Avaliação do Grau de Contaminação das águas subterrâneas em áreas de influência de resíduos do processamento do carvão. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Porto Alegre, 184 p.
- BORBA R. F.; CORREA, T. 1994. Uso da estatística na avaliação preliminar de uma área carbonífera - exemplo de Leão-Norte/RS. Egatea. Escola de Engenharia. Porto Alegre, v 22, n.1, p. 39-45.

- BORROUG, P. A. 1985. Principles of geographical information system of land resources assesment. Claredon Press. Oxford. 280 p.
- CÂMARA, G., MEDEIROS, J. S. 1996. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador.150p.
- CASTANEDA, F., R. 1989. Fatores determinantes na implantação de um sistema de informação geográfica. In: IX Congresso Brasileiro de Cartografia. Sociedade Brasileira de Cartografia. Gramado, RS. Anais, p. 625-635.
- CÉSAR, S. B. 2000. Carvão Mineral. Sumário Mineral 2000. Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM. Brasília, v 18, p. 37-38.
- CORRÊA DA SILVA, Z. C. 1987. Jazidas de carvão no Rio Grande do Sul, Brasil.In: III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Anais. Curitiba, v.2, p.677-687.
- COSTA, J. F. L. 1991. Análise do erro de modelos gráficos gerados em computador e sua influência no cálculo de reservas minerais. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. 95 p.
- CRM.1978. Carta topográfica plani-altimétrica. Companhia Riograndense do Carvão. Porto Alegre. [Publicação interna].
- CRM.1980. Aspectos geológicos. Companhia Riograndense do Carvão. Porto Alegre, RS. 98 p.[Publicação interna]
- CRÓSTA, Á.P.1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Instituto de Geociências. Unicamp. Campinas. Brasil.170p.
- DAEMON, R. F.; QUADROS, L. P. 1969. Bioestratigrafia do neopaleozóico da bacia do paraná. In: XXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Brasília.p355-412.

- DAEMON, R. F.; CASSALETTI, P.; CIGUEL, J. H. G. 1991. Biopaleogeografia da bacia do paraná. Curitiba, Petrobrás. Relatório interno.
- DANI, N.; LOPES, E. B.; SILVA, J. L. B. 1996. Técnica de constru o de mapas de declividade com auxilio do computador. In: 2^o Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Anais. Florianópolis, p. 337-344.
- DEUTSH, C. V.; JOURNEL, A. G. 1996. GSLIB: geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press. New York, 340 p.
- DNPM. 1996. Informativo anual da indústria carbonífera. Ministério das Minas e Energia. Brasília, set/96, 211 p.
- EASTMAN, J. R. 1998. Manual do usuário Idrisi for windows 2.0. Introdu o e exercícios tutoriais. Porto Alegre, UFRGS. Centro de Ecologia. 235 p.
- EASTMAN, J. R.; KYEM, P. A. K.; Toledano, J.; JIN, W. 1993. GIS and decision making. Geneva, Unitar.
- EKLUND, P.W.; KIRKBY, S. D.; SALIM, A. 1998. Data mining and soil salinity analysis. International Journal of Geographical Information Science. London, v. 12, n.3, p. 247 –268.
- FEPAM. 1992. Recomenda es técnicas para sele o de área para a deposi o de resíduos sólidos em aterro. Divisão de avalia o de impacto ambiental - DAIA. Porto Alegre.
- FELGUEIRAS, C. A.; ERTHAL, G. J. 1989. Aplica es de modelos numéricos de eleva o e integra o com imagens digitais. In: V S mpoio Brasileiro de Computa o Gráfica e Processamento de Imagens.  guas de Lindóia. P533-40.
- FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. 1996. Curso de Estatística. São Paulo. Atlas, 320 p.
- FREITAS, J. C. F. 1985. Métodos e técnicas de pesquisa mineral. DNPM.

- GARCIA, G. J.; PIEDADE, G.C. R. 1978. Topografia aplicada às ciências agrárias. Nobel. São Paulo, 256 p.
- GUSMÃO, R. P.; MAIO, S.R.; CARREIRA, M. E. S.; ESTEVES, M. G.; AMÊNDOLA P. L. 1990. Diagnóstico Brasil. A ocupação do território e o meio ambiente. IBGE. Rio de Janeiro, 170 p.
- HASENACK, H.; WEBER, Eliseu; VALDAMERI, R.1998. Análise de vulnerabilidade de um parque urbano através de módulos de apoio a decisão em sistemas de informação geográfica. In: GISBrasil - Congresso de Geoprocessamento da América Latina. Curitiba. Pr.
- HASENACK, H. 1995. O geoprocessamento no processo de tomada de decisão. Boletim Gaúcho de Geografia, v. 20.
- HOEL, P., G. 1977. Estatística elementar. Editora Atlas S. A. São Paulo, 430 p.
- HOLZ, M. 1997. Early sequences stratigraphy and paleophysiography of the paraná basin in northeastern rio grande do sul state, brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro. Vol. 69, núm. 4, p. 521-543.
- HUNT, G. R. 1980. Eletromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegal, B. & Gillespie, A. R. *Remote sensing in geology*. Jonh Wiley. New York p. 5 - 45.
- IBGE. 1986. Levantamento de recursos naturais. Folha SH.22 Porto Alegre. Uso Potencial da Terra. Vol. 33, p. 727 -730.
- ISAAKS & SRIVASTAVA, R. 1989. Introduction to applied geoestistics. Oxford University Press. New York, 600 p.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. 1982. Applied Multivariate Statistical analysis. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.320 p.

- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, CH. J. 1978. Mining geostatistics. Academic Press Inc. New York, 600 p.
- LICHT, O. A. B., SALAZAR Jr. O., FREITAS, J. P. T. 1996. O SIG no subsolo. Fator Gis, Curitiba. no. 18. p. 23-30.
- LOCZY, L., LADEIRA, E. A. 1976. Geologia estrutural e introdução à geotectônica. Edgar Blücher. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Rio de Janeiro. 528 p.
- LOPES, R. C. 1990. Estudo paleoambiental da formação rio bonito na jazida do leão-rs uma análise inicial.. Estudos Tecnológicos. Ata Geológica Leopoldensia 31. Universidade do Vale do Rio do Sinos. São Leopoldo, 21p.
- LOPES, R. C. 1986. Mapa geológico da folha sh 22-yb-1. Escala 1:100000. In: ABOARRAGE, A. M. & LOPES, R., C. - *Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: Interpretação Geológica e Avaliação Econômica*. Porto Alegre; DNPM/CPRM, 1986. 18V. (inédito).
- MACHADO, J. L. F. 1985. Mineração de carvão: contaminação e vulnerabilidade dos mananciais. Anais do II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia - Florianópolis. SC. p. 539 – 559.
- MARQUES, J. Q. A. 1971. Manual brasileiro para levantamento da capacidade de uso da terra. Escritório Técnico de Agricultura Brasil - Estados Unidos. Rio de Janeiro. IBGE. 435 p.
- MARQUES, T. M.; DIAS, F. M. E. M.; CAZZULO, K. M. 1982. Palynological and palaeocological characterization of santa rita coal field, rio grande sul, paraná basin, lower permian of southern brasil. Estudos Tecnológicos. Acta Geológica Leopoldensia 16. Universidade Vale do Rio Sinos. São Leopoldo, p.55-74.

- MILANI, E.J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. 1994. Boletim de Geociências da Petrobrás. Rio de Janeiro. V.8, no.1, jan-mar. 68-82.
- MORAES, E. C. 1996. Comportamento espectral. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 26 p.
- MOORE, G., K. & WALTZ, F. A. 1983. Objective procedures for lineament enhancement and extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Falls Church, Virginia. USA. Vol 49, núm. 5, p. 641-647.
- MULLER, A. A.; SANTOS, H. M.; SCHMITT, J. C. C.; MACIEL, L. A. C.; BERTOL, M. A.; CÉSAR, S. B. 1987. Perfil analítico do carvão. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Porto Alegre .Boletim 6, 140p.
- NIMER, E. 1990. Clima. In: Geografia do Brasil. Região Sul. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Rio de Janeiro. v. 2, p. 151-187.
- NOVO, E. M. L. M. 1992. Sensoriamento remoto: princípio e aplicações. 2ª. Edição. Edgar Blucher, São Paulo. 308p.
- PICCOLI, A .E. M.; LOPES, R. C.; CAMOZZATO, E. 1986. Análise paleoambiental das jazidas de carvão do estado do rio grande do sul. Estudos Tecnológicos. Acta Geológica Leopoldensia. São Leopoldo, número 22, vol X, p35-54.
- PRAKASH, A & GUPTA, R. K. 1998. Land-use mapping and change detection in coal mining area - a case study in the Jharia coalfield, India. International journal of remote sensing. London, V19, n 3, p.391-410.
- RIBEIRO M. 1980. Geossuturas do escudo do rio grande do sul. In: XXXI Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, vol. 5, p.2709-2717. Camburiu. SC.
- RICHARDS, J. 1993. A remote sensing digital image analysis - an introduction. The University of New South Wales. Springer Verlag. Campbell. Australia. 339p.

- SALES, J. S. R. 1985. O sistema limb - I. In: XII Congresso Brasileiro de Cartografia. Sociedade Brasileira da Cartografia. Brasília. Anais, p. 301 - 315.
- SARAF, A. K. & CHOUDHURY, P. R. 1998. Integrated remote sensing and gis for groundwater exploration of artificial recharge sites. International journal of remote sensing. London, Vol. 19, núm. 10, p.1825-1841.
- SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da bacia do paraná. In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Porto Alegre, 1: 41-67.
- SCHUBERT, J. P. 1979. Groundwater contamination problems resulting from coal refuse disposal. In: First International Mine Drainage Symposium. San Francisco, EUA, p 757-780.
- SOARES, P. C.; BARCELOS, P. E.; CSORDAS, S. M.; MATOS, J. T.; BALIEIRO, M. G.; MENESES, P. R. 1982. Lineamentos em imagens de landsat e radar e suas implica es no conhecimento tectônico da bacia do paraná. In: II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. CNPQ.INPE. Brasília.
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. 1996. Radiometria  tica espectral. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 17 p.
- SWAIN, P. H., DAVIS, M. S. 1978. Remote sensing: the quantitative approach. McGraw-Hill. Purdue University. West Lafayette. Ind. USA.396p.
- ZALAN, P. V.; WOLF, S. ASTOFOLI, M. A M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. 1987. Tect nica e sedimenta o da bacia do paraná. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Curitiba. v. 1: 441-477.
- ZALAN, P. V.; WOLF, S. ASTOFOLI, M. A M.; VIEIRA, I. S.; CONCEI O, J.C.J. ; MARQUES, A. 1990. The paraná basin, Brasil. In: LEIGHTON, KOLATA, OLTZ & EIDEL(Eds), Interior cratonic basins. AAPG Memoir 51, p.681-701.

A N E X O S

Anexo 1

Camada I

3

X: Coordenada E, m

Y: Coordenada N, m

Z: Espessura, m

398518,6665353,1.51	397272,6669649,1.82
396182,6667070,2.31	392122,6669186,2.12
395768,6667417,2.3	392658,6668339,2.3
397021,6666456,1.58	394362,6669489,1.9
397157,6667144,1.53	397551,6669231,1.81
396598,6668978,2.4	398391,6667990,1.4
396047,6667008,1.72	396992,6670056,2.02
395489,6667829,2.1	396726,6668674,2.25
395073,6667552,1.74	397419,6668539,2.05
395352,6667139,2.3	395903,6668109,1.56
394938,6666861,2	396168,6669504,2.2
395633,6666726,1.5	395208,6668245,2.41
396744,6666856,1.78	396032,6668804,2.63
396330,6666594,2	395341,6668935,2.51
395915,6666312,1.16	396859,6669369,2.25
396460,6667288,2.11	396432,6670888,1.5
396878,6667563,2.25	396298,6670192,2.43
394379,6667689,1.57	395698,6670389,2.52
392988,6667960,1.85	396472,6669634,1.93
396209,6665880,1.58	396564,6671582,1.58
394794,6667970,1.71	397122,6670752,1.22
396888,6665750,1.5	395872,6671715,1.63
396617,6666164,1.61	394510,6668379,1.56
398809,6668273,1.26	394094,6668103,1.38
397140,6668955,1.53	394228,6668792,1.82
395453,6671439,1.81	393537,6668932,2.27
396019,6670608,1.72	393121,6668656,1.9
396578,6669782,2.34	393402,6668238,1.85
397003,6668258,2.1	393258,6669345,2.61
397853,6668832,1.81	392843,6669070,1.97
396152,6671298,1.48	392562,6669482,2.1
396847,6671167,1.36	396889,6671796,1.63
396711,6670472,1.63	395192,6670046,1.93
397109,6672556,1.43	394642,6669072,1.85
394922,6668659,1.8	393949,6669211,2
395323,6670742,1.9	392429,6668790,1.93
395060,6669352,1.82	392013,6668510,1.9
395621,6668528,2.46	391736,6668923,1.88
395888,6669916,2.27	391598,6668228,1.58
396444,6669088,2.62	397702,6668120,1.72
393813,6668518,2.1	394910,6672244,1.63

394082,6671683,1.5
393528,6672521,1.6
392684,6671958,1.71
395722,6672822,2.23
395170,6673652,1.93
396550,6673386,2.2
394338,6673091,1.93
396040,6674239,2.7
394611,6674488,1.93
392120,6672803,1.73
390487,6671687,1.57
391291,6672248,1.78
391558,6673632,2.16
395590,6672128,1.43
395176,6671852,1.78
395027,6672954,2.09
394749,6673368,2.43
395308,6672542,1.37
394486,6671982,1.55
393789,6672116,1.63
393380,6671839,1.38
394210,6672398,1.5
394614,6672676,1.41
393926,6672811,2.29
393096,6672254,1.85
396003,6672410,1.65
396042,6672694,1.7
394184,6674203,1.77
394468,6673788,2.46
395576,6673936,2.17
394058,6673505,2.8
391573,6671828,2.5
391987,6672111,1.73
391708,6672525,1.83
390879,6671965,2.14
389908,6672518,2
395442,6673235,2.16
395860,6673518,2.16
392267,6671692,1.87
393231,6672948,2.51
392816,6672672,2.11
392402,6672390,1.75
393646,6673231,2.17
392948,6673362,2.29
390732,6673073,2.15
392384,6674189,2.7
389077,6671957,1.35
394038,6675314,2.5
393216,6674750,1.93
394322,6674899,1.73
392418,6670572,2.17
391580,6670022,2.07
393004,6669784,2.11
391851,6671420,2.11
394780,6669769,1.97
394494,6670186,1.85
395044,6671158,1.82
394763,6671574,1.5
394218,6670600,2.16
393522,6670737,1.87
393392,6670042,1.87
394082,6669907,1.96
393672,6669628,1.77
393110,6670458,1.75
393657,6671424,1.1
392736,6670207,2.05
392284,6669898,2.26
393962,6671560,1.56
391871,6669618,2.11
392004,6670312,2.2
392548,6671281,1.78
392133,6671003,2.45
391722,6670722,2.3
392830,6670867,2.04
395098,6670602,2.05
395313,6671656,1.41
395511,6671822,1.25
395709,6672103,1.2
393487,6671311,1.3
396000,6672000,1.18
391000,6671000,1.76
394000,6675000,1.85
397251,6667927,1.9
398813,6668013,1.15
398371,6668730,1.45
396540,6669481,2.22
395783,6669204,1.57
394853,6670548,2.05
397567,6667417,2.3
398668,6667882,1.91
399156,6668206,1.26
397920,6666600,1.7
398275,6666621,1.92
393935,6671012,1.57
394350,6671292,2.05
394373,6671006,2.14
394174,6670758,2.05
393998,6671098,1.72
394502,6671126,1.65
399911,6668720,1.05