



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A MODELAGEM NUMÉRICA COMO INSTRUMENTO DE APOIO À AVALIAÇÃO AMBIENTAL

22/2003

Dissertação apresentada Faculdade de Engenharia
Mecânica / Instituto de Geociências, como requisito
para obtenção do grau de Mestre em Ciências e
Engenharia de Petróleo.

Autor: Rui Cesar Sansonowski

Orientador: Professor Doutor Armando Zaupa Remacre

Campinas – São Paulo
Abril, 2003.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

A MODELAGEM NUMÉRICA COMO INSTRUMENTO DE APOIO À AVALIAÇÃO AMBIENTAL

**Autor: Rui Cesar Sansonowski
Orientador: Armando Zaupa Remacre**

**Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, Presidente.
Instituto de Geociências – UNICAMP**

**Prof. Dra. Mara Akie Iritani
Instituto Geológico de São Paulo**

**Prof. Dra. Adalene Moreira Silva
Instituto de Geociências – UNICAMP**

Campinas, 01 de abril de 2003.

*A todos os brasileiros que não tiveram
as mesmas oportunidades de educação que
tive e a quem espero poder servir.*

AGRADECIMENTOS

À Petróleo Brasileiro S/A – Petrobras – pela oportunidade e confiança depositada em mim.

Ao professor Armando Zaupa Remacre por sua orientação, sugestões e apoio às minhas idéias e à pesquisa.

A todos meus colegas de curso, em particular, Sérgio Sacani, Frederico Carmo, Anelise Friedrich, Pedro Gonçalves, Sérgio Luís Netto e Marcos Pinho, pela grandiosa colaboração e pelo clima amigável de nossa convivência.

Ao colega de Petrobras, Ari Costa, pelo grandioso apoio no processamento dos dados de GPR.

Aos funcionários do IG e DEP – UNICAMP, em especial ao Moacir Cornetti, sempre disposto a auxiliar a todos.

Aos professores Adalene Moreira Silva, Giorgio Basílici, Rodrigo Portugal, Sueli Yoshinaga Pereira, Luiz Augusto Milani Martins e Mara Iritani, pelas revisões e sugestões durante a elaboração do trabalho.

À minha esposa Daniele e aos meus filhos Ana Vitória e Vinícius, pelo inesgotável amor, compreensão e incentivo dispensado em toda esta jornada.

A Deus, por me conduzir até o final em mais essa etapa de construção da minha carreira profissional.

RESUMO

SANSONOWSKI, Rui Cesar. *A Modelagem Numérica como Instrumento de Apoio à Avaliação Ambiental*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica/Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 115p. Dissertação (mestrado).

Em julho de 2000, em um dos maiores acidentes ambientais da Região Metropolitana de Curitiba, ocorreu um derramamento de petróleo em uma área próxima à Refinaria Presidente Vargas (Petrobras/REPAR), designado Alagado 4. O objetivo deste estudo é apresentar uma metodologia científica capaz de auxiliar a compreensão e avaliação de impactos ambientais, com base nos levantamentos realizados na área do Alagado 4, de modo que sua aplicação e resultados sirvam de suporte à tomada de decisões quanto à necessidade e urgência de intervenções. Para tanto, foram utilizadas imagens aéreas, dados de uma aquisição 3D de GPR (radar de subsolo), a descrição geológica e análises de TPH da rede de poços de monitoramento implantados nesta área. Estas informações foram integradas a partir de algoritmos geoestatísticos visando à construção do modelo geológico mais representativo da área. Técnicas como Krigagem Ordinária (KO) e Simulação Gaussiana Seqüencial revelaram os primeiros contornos do modelo geológico. A integração das informações de natureza geológica e geofísica foi realizada utilizando-se da Krigagem com Deriva Externa (KDE) e Cokrigagem Colocalizada. Construído o modelo geológico da área contaminada, procurou-se quantificar o fluxo e o transporte de massa nas águas subterrâneas, importantes na definição da técnica de remediação mais econômica e eficaz a ser implantada. A modelagem numérica de fluxo e transporte se serve de um simulador que emprega as equações diferenciais para descrever o escoamento em meios porosos. Os resultados revelam as áreas de maior risco ambiental à exposição humana e a evolução da pluma de contaminação ao longo dos próximos 50 anos na área denominado Alagado 4.

Palavras Chaves: Krigagem Ordinária; Krigagem com Deriva Externa; Cokrigagem Colocalizada; Simulação Gaussiana Seqüencial; Modelagem de Fluxo e Transporte de Massa.

ABSTRACT

SANSONOWSKI, Rui Cesar. *Numerical Modeling as an Instrument to Support Environmental Evaluation*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica/Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 115p. Dissertação (mestrado).

In July 2000, a prominent environmental accident, involving oil leakage occurred in the Curitiba Metropolitan Area, nearby the Petrobras/REPAR President Vargas refinery, within an area assigned as 'Alagado' 4. The main purpose of this study is to present a scientific methodology that may help understanding the environmental impact caused by such accident. The results of this work are important to support the decisions as regard the need and urgency of interventions. Airborne imagery, 3D Ground Penetrating Radar survey data plus geological description and analyses of TPH from a set of monitoring wells, were integrated and used to create a representative geological model for the study area. Techniques such as Ordinary Kriging and Sequential Gaussian Simulation revealed the first contours of the geological model. In order to combine geophysical and geological data, algorithms of Kriging with External Drift (KDE) and Collocated Cokriging were employed. After the geological model of the contaminated area was envisaged, the next step was aimed at quantifying the run off and the mass transportation in groundwater area. This was important to establish which remediation technique is more efficient and economic to be adopted. A numerical modeling was used to predict the behaviour of groundwater flow and mass transport with the advent of future simulator packages based in finite-difference grid. The final results revealed areas with relatively larger environmental risk to the human exposition and the evolution of the contamination plume in 50 years in the area called 'Alagado' 4.

Key Words: Ordinary Kriging; Kriging with External Drift (KDE); Collocated Cokriging; Sequential Gaussian Simulation; Groundwater Flow and Mass Transport Modeling.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO ACIDENTE	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA	7
2.3. REINTERPRETAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO	10
2.4. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DO SISTEMA SEDIMENTAR	12
CAPÍTULO 3 MODELAGEM GEOFÍSICA	16
3.1. INTRODUÇÃO	16
3.2. A GEOFÍSICA E A GEOFÍSICA APLICADA	16
3.3. CARACTERÍSTICAS DO GPR OU GEORADAR	18
3.4. PRINCÍPIOS TEÓRICOS DA INTERAÇÃO DA ONDA EM COM O MEIO	19
3.5. PENETRAÇÃO EM PROFUNDIDADE DO SINAL DE RADAR	22
3.6. AQUISIÇÃO DOS DADOS DE GPR	23
3.7. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR	25
3.8. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	31
CAPÍTULO 4 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA	35

4.1.	INTRODUÇÃO.....	35
4.2.	ASPECTOS TEÓRICOS DA KRIGAGEM.....	35
4.3.	KRIGAGEM SIMPLES (KS).....	36
4.4.	KRIGAGEM DA MÉDIA (KM).....	39
4.5.	KRIGAGEM ORDINÁRIA (KO).....	40
4.6.	KRIGAGEM COM DERIVA EXTERNA (KDE).....	42
4.7.	COKRIGAGEM COLOCALIZADA (<i>COLLOCATED COKRIGING</i>).....	43
4.8.	MODELAGEM DOS DADOS DO ALAGADO 4.....	46
4.9.	MODELAGEM DOS DADOS UTILIZANDO O ATRIBUTO DE DERIVA EXTERNA.....	58
4.10.	SIMULAÇÃO GAUSSIANA SEQÜENCIAL (SGS).....	66
4.11.	SIMULAÇÃO GAUSSIANA SEQÜENCIAL (SGS) APLICADA AOS DADOS DE TPH...	69
CAPÍTULO 5 MODELAGEM DE FLUXO E TRANSPORTE.....		74
5.1.	INTRODUÇÃO.....	74
5.2.	CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS.....	74
5.3.	EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO.....	77
5.4.	MODELAGEM DE FLUXO DO ALAGADO 4.....	81
5.5.	MODELAGEM DE TRANSPORTE DE MASSA DO ALAGADO 4.....	89
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		97
ANEXOS.....		101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo, destacando os limites de municípios da Região Metropolitana de Curitiba	3
Figura 1.2: Mosaico aéreo, escala 1:15.000 (Esteio Engenharia, 2000) que mostra o sítio contaminado. Em destaque (vermelho), à área do Alagado ou Banhado 4.	4
Figura 2.1: Mapa geológico com a localização da área do acidente, Mineropar (1996).	8
Figura 2.2: Seção transversal do Alagado 4 entre os poços de monitoramento 68 e 48.	11
Figura 2.3: Mosaico aéreo na escala 1:10.000 (Engefoto/Hidrotec, 2000) da área do Alagado 4, que identifica elementos arquiteturais do ambiente de sedimentação fluvial meandrante. ...	13
Figura 2.4: Modelo arquitetural definido para sistemas meandantes compostos predominantemente por elementos arenosos (modificado de Miall, 1996).	14
Figura 2.5: Modelo arquitetural para sistemas meandantes compostos predominantemente por elementos pelíticos (modificado de Miall, 1996).	14
Figura 3.1: Principais métodos geofísicos de investigação aplicados à área ambiental (modificado de Reynolds, 1997).	17
Figura 3.2: Diagrama esquemático do princípio de aquisição dos dados de GPR (modificado do manual do RAMAC/GPR, 1997).	18
Figura 3.3: Relação entre velocidade e frequência para diferentes valores de condutividade elétrica (modificado de Davis & Annan, 1989).	20
Figura 3.4: Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades (modificado de Davis & Annan, 1989).	23
Figura 3.5: Imagem da área estudada mostrando o sentido de aquisição das linhas do levantamento 3D de SW para NE.	24
Figura 3.6: Ilustração conceitual da técnica common offset utilizada no levantamento.	24
Figura 3.7: Imagem aérea de localização do programa 3D na área do Alagado 4, realizada 30 dias após o acidente em sobrevôo de helicóptero.	25
Figura 3.8: Fluxograma de processamento das linhas de GPR utilizado nesta pesquisa.	26
Figura 3.9: Radargrama de campo referente à linha 49, normalizada no número de <i>scans</i>	27

Figura 3.10: Espectro de amplitude da linha 49 obtida com a antena de 250 MHz blindada.	28
Figura 3.11: Pré-processamento, linha 49, referentes à etapa de AGC mais filtragem no domínio da frequência.....	29
Figura 3.12: Pré-processamento, linha 49, após a deconvolução preditiva.	30
Figura 3.13: Seção resultante do processamento final, linha 49.....	31
Figura 3.14: Seção interpretada referente à linha 49.	32
Figura 3.15: Feições radar estratigráficas diferenciadas na linha 49.	33
Figura 3.16: Mapa do tempo duplo de trânsito do contato entre os corpos geológicos de argila e areia da área do levantamento 3D de GPR.	34
Figura 4.1: Histogramas de frequência de distribuição das variáveis estudadas.	47
Figura 4.2: Mapa base de distribuição dos poços de monitoramento na área do Alagado 4.....	48
Figura 4.3: Variogramas experimentais e ajustados das variáveis estudadas.	49
Figura 4.4: Exemplo do raio de pesquisa estabelecido na modelagem do Topo da Camada 1.	51
Figura 4.5: Validação cruzada do Topo da Camada 1	53
Figura 4.6: Validação cruzada do Topo da Camada 2	53
Figura 4.7: Validação cruzada do Topo da Camada 4	54
Figura 4.8: Validação cruzada da indicatriz TPH.....	54
Figura 4.9: Mapa de estimativa dos Topos das Camadas modeladas.....	56
Figura 4.10: Mapa de distribuição da contaminação na área do Alagado 4	57
Figura 4.11: Mapas de espessura dos corpos geológicos de argila e areia dominantes na área do Alagado 4.	58
Figura 4.12: (A) Mapa base de distribuição dos valores interpretados das seções de GPR, (B) Histograma de frequências dos dados.....	59
Figura 4.13:(A) Mapa de distribuição dos Pontos de Monitoramento e da área de aquisição dos dados de GPR,(B) Diagrama de dispersão entre TDT e espessura de sedimentos argilosos.	60
Figura 4.14: Mapa de estimativa do TDT empregando-se todo o banco de dados disponível da interpretação das seções de radar.....	61
Figura 4.15: (A) Área do levantamento de GPR e poços utilizados para a estimativa com Deriva Externa; (B) Mapa de estimativa do topo da camada 4 e (C) Mapa de estimativa do Tempo Duplo de Trânsito (TDT) correspondente ao contato argila/areia na área do levantamento 3D de GPR.	62
Figura 4.16: Mapa de estimativa do Topo da Camada 4 através do algoritmo de KDE.	63

Figura 4.17: Mapa de estimativa do Topo da Camada 4 através do algoritmo de cokrigagem colocalizada.	64
Figura 4.18: Variogramas das superfícies estimadas (A) Topo da Camada 4 através da KO, (B) Topo da Camada 4 através da KDE, (C) Topo da Camada através da cokrigagem colocalizada e (D) Tempo Duplo de Trânsito, atributo de deriva externa.....	65
Figura 4.19: Representação variográfica de KO, KDE e cokrigagem colocalizada das superfícies geradas.	65
Figura 4.20: Mapas de espessuras estimados a partir da deriva externa (A) espessura de argilas KDE, (B) espessura de argilas colocalizada, (C) espessura de areias KDE e (D) espessura de areias colocalizada.....	66
Figura 4.21: Histogramas (A) dado condicionante – TPH, (B) simulação número 125.	69
Figura 4.22: Variogramas de 42 simulações (verde) e do variograma modelado (vermelho)	70
Figura 4.23: Conjunto de 4 realizações equiprováveis do cenário de contaminação de TPH na área do Alagado 4	71
Figura 4.24: Diferentes cenários probabilísticos da contaminação na área do Alagado 4.	72
Figura 4.25: Diferentes cenários: Otimista, Normal e Pessimista de distribuição da contaminação na área do Alagado 4.	72
Figura 4.26: Imagem representativa a média das 200 simulações condicionais realizadas.	73
Figura 5.1.: Esboço para demonstrar o experimento de Darcy (originalmente o experimento de Darcy posicionava o equipamento verticalmente, modificado de Fetter, 2001).	75
Figura 5.2: Volume Elementar Representativo (VER) usado na derivação da equação do escoamento (modificado de Loureiro, 2002).....	78
Figura 5.3: Fluxograma representativo das etapas básicas na construção de um modelo numérico representativo das condições hidrológicas de uma área (modificado de Loureiro, 2002)....	81
Figura 5.4: Malha regular construída para representar o modelo hidrológico do Alagado 4.	82
Figura 5.5: Seção vertical do modelo KDE composta por duas camadas (argilas depositadas sobre areias).....	83
Figura 5.6: Mapa da condutividade hidráulica relativa à camada de argila.	84
Figura 5.7: Mapa de estimativa da cota do nível de água na área do Alagado 4.....	86
Figura 5.8: Mapa potenciométrico do Alagado 4, conforme modelagem de fluxo.	86
Figura 5.9: Mapa de vetores de velocidade de fluxo e de rastreamento de partículas lançadas no PM-76.....	87

Figura 5.10: Gráfico de dispersão entre cargas hidráulicas observadas e calculadas.....	88
Figura 5.11: Mapa de vetores de velocidade de fluxo e de rastreamento de partículas resultante da modelagem realizada no modelo geológico obtido sem deriva.	89
Figura 5.12: Evolução da pluma de contaminação (TPH) na área do Alagado 4: acima à esquerda, cenário inicial; acima à direita, cenário após 5 anos; abaixo à esquerda cenário após 10 anos; abaixo à direita, cenário após 50 anos.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resumo estratigráfico da Bacia de Curitiba (modificado de Salamuni & Salamuni, 1999).....	9
Tabela 3.1: Típicos valores de constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação comumente observados em alguns materiais geológicos a 100 MHz (modificado de Davis & Annan, 1989 e RAMAC/GPR, 1997).....	21
Tabela 4.1: Tabela estatística dos valores utilizados na modelagem geológica.	46
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na modelagem dos variogramas.	50
Tabela 4.3: Valores dos raios de vizinhanças definidos.	50
Tabela 4.4: Quadro estatístico comparativo dos valores dos dados de entrada e dos resultados da modelagem geoestatística (krigagem ordinária).	55
Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na modelagem hidrológica	84

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Nos últimos anos, a sociedade brasileira vem assistindo a um grande número de ocorrências de acidentes ambientais, o que tem tornado as ações contra as agressões ao meio ambiente muito mais criteriosas.

A partir da promulgação da Lei nº 9.605/1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas para condutas lesivas ao meio ambiente, os responsáveis pela defesa ambiental passaram a contar com um instrumento de responsabilização criminal da pessoa jurídica e penalizações de corporações que atuam em detrimento do meio ambiente.

Neste novo contexto, os acidentes ambientais devem ser cuidadosamente diagnosticados e avaliados, quanto aos impactos, através de estudos de natureza geoquímica, geofísica e da modelagem de fluxo e transporte de contaminantes em solos e águas subterrâneas, procurando descortinar medidas mitigadoras e alternativas para a correta implementação dessas ações junto aos órgãos ambientais.

1.2. Objetivos e motivação da dissertação

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um estudo de caso especialmente desenvolvido para auxiliar a compreensão e avaliação de uma área impactada por derramamento de petróleo e analisar o risco ambiental, propiciando subsídios para a elaboração de um projeto de descontaminação. O estudo não revela uma nova metodologia, pois na literatura congênera se encontram diversos trabalhos apresentando modelagens numéricas em áreas contaminadas. Contudo esta dissertação se propõe a integrar e interpretar: fotografias aéreas, dados de GPR

(*Ground Penetrating Radar*) e dados geológicos, para, finalmente, propor um modelo geológico da área e modelar o fluxo e o transporte do contaminante na zona saturada.

Secundariamente, demonstrar que, por meio dos atuais recursos de modelagem numérica, as avaliações quantitativas podem ser precisas, mensurando corretamente a extensão de um acidente e, assim, contribuindo com os responsáveis pela gestão ambiental, tais como gerentes, auditores, peritos judiciais ou representantes do Ministério Público que estejam envolvidos com o acidente.

Todo este processo de entendimento dos diversos aplicativos de natureza geológica, geofísica, geoestatística e de modelagem de fluxo e transporte serviram de fonte de motivação para a realização deste trabalho.

1.3. Localização e identificação do acidente

Os dados utilizados nesta dissertação foram, gentilmente, disponibilizados pela PETROBRAS/REPAR, Refinaria Presidente Getúlio Vargas (PR), e se referem ao acidente ambiental ocorrido no dia 16 de julho de 2000 naquela unidade industrial. Nesse dia, após o rompimento de uma junta de expansão no ponto de recebimento de petróleo proveniente do oleoduto São Francisco do Sul (SC)/REPAR, ocorreu o vazamento de 3.939 milhões de litros de petróleo, que, inicialmente, atingiu a drenagem secundária denominada arroio Saldanha e, após 1.800 m, atingiu o rio Barigüi, afluente do rio Iguaçu. O petróleo caracterizava-se por ser de origem colombiana, base parafínica, densidade $0,81 \text{ g/cm}^3$, grau API 41, sendo considerado de baixa toxicidade (Neto & Caicedo, 2000).

A Figura 1.1 localiza a área no contexto da Região Metropolitana de Curitiba. Em destaque, a área ocupada pelas instalações industriais da Refinaria Presidente Getúlio Vargas.

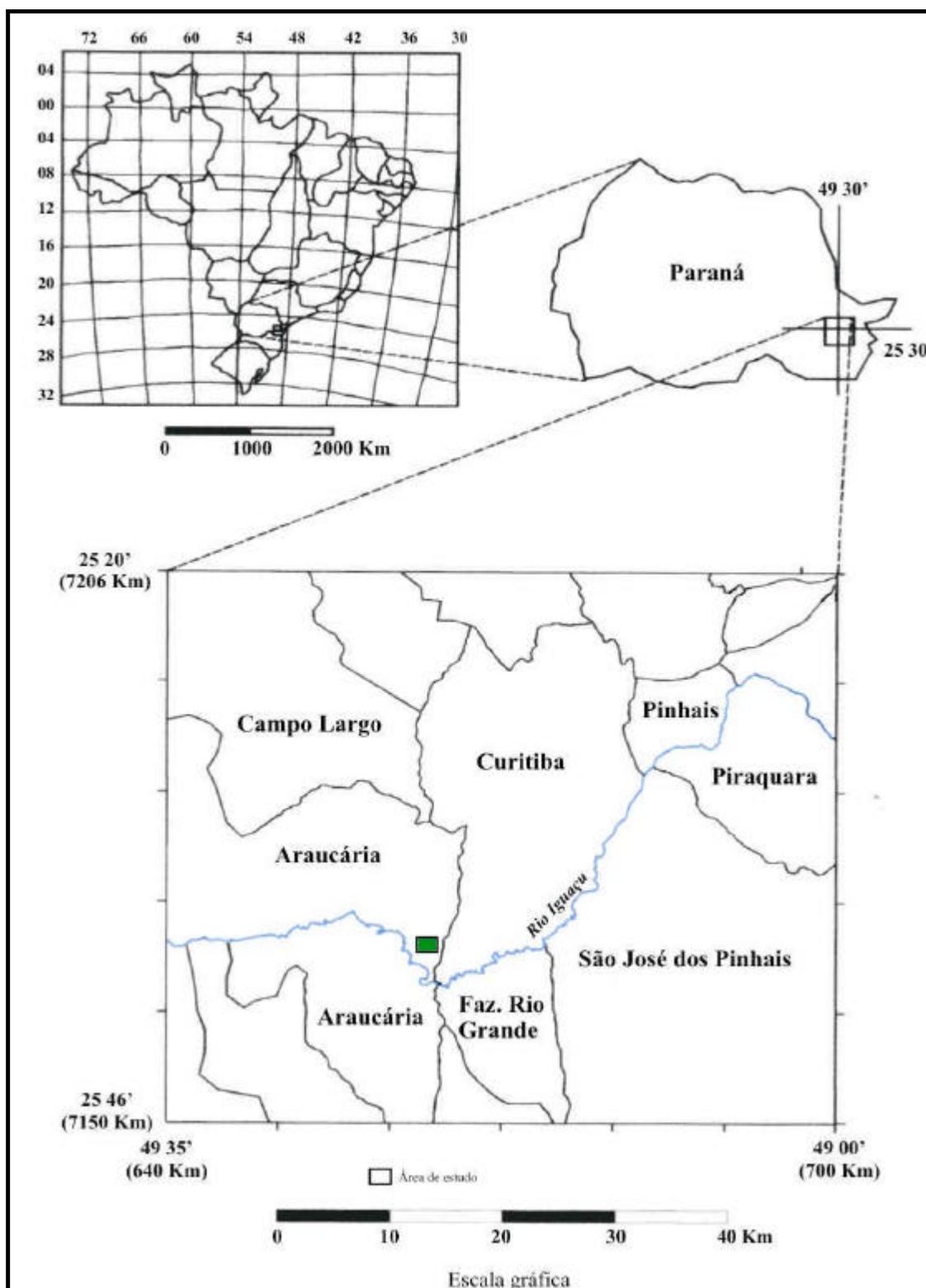


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo, destacando os limites de municípios da Região Metropolitana de Curitiba

Em particular, é importante localizar a área do Alagado ou Banhado 4 no contexto do acidente. O mosaico aéreo da Figura 1.2 identifica boa parte da área afetada pelo derramamento, desde o ponto de chegada do oleoduto nas instalações industriais da refinaria até a confluência do arroio Saldanha com o rio Barigüi. Destaque para a área do Alagado 4, escolhida neste estudo por representar a maior extensão horizontal da contaminação e, por conseguinte, receber um número maior de poços de monitoramento e estudos.

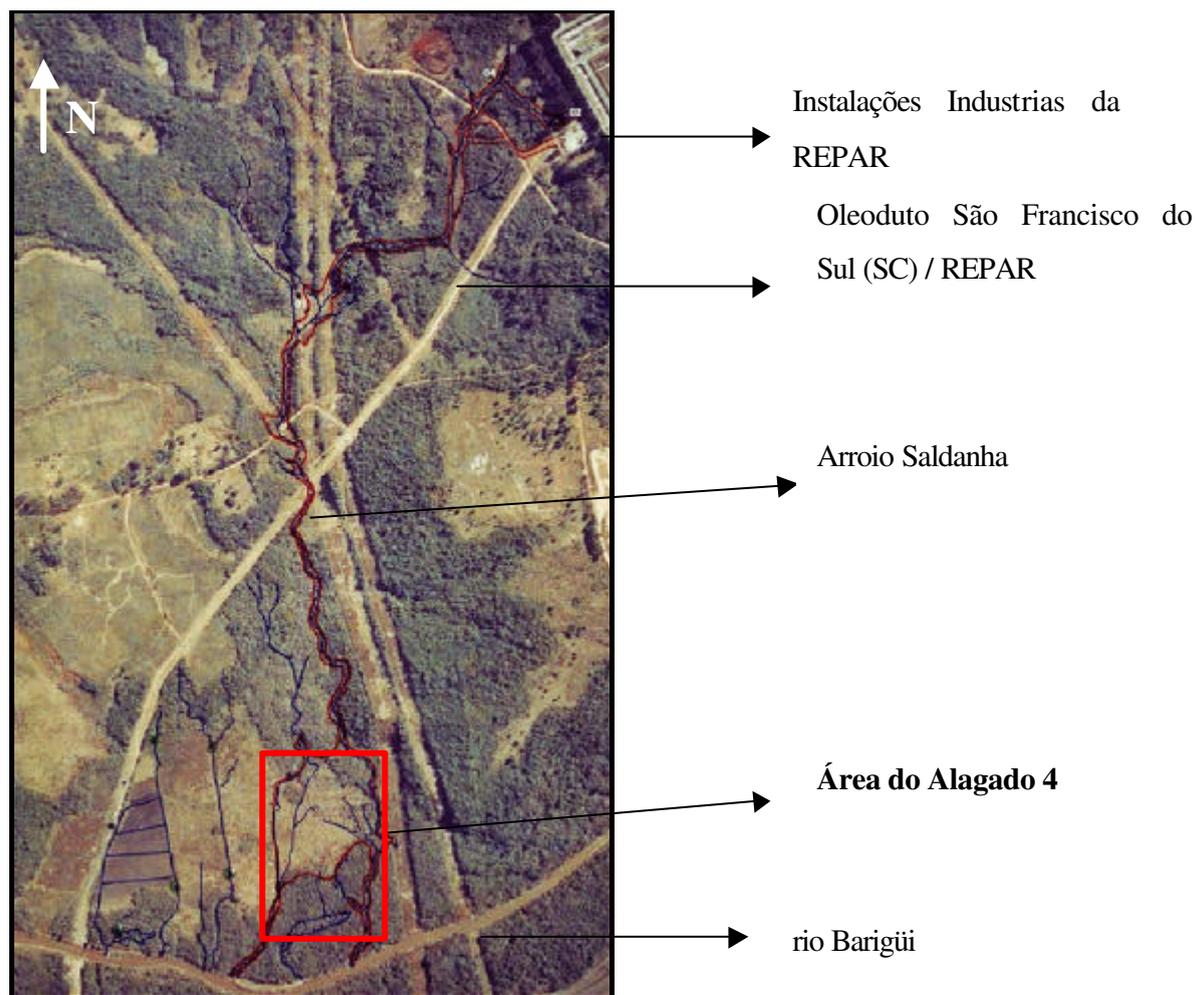


Figura 1.2: Mosaico aéreo, escala 1:15.000 (Esteio Engenharia, 2000) que mostra o sítio contaminado. Em destaque (vermelho), à área do Alagado ou Banhado 4.

Nos dias seguintes ao acidente, diversos técnicos e instituições estiveram trabalhando na avaliação do acidente e planejamento das ações para a recuperação da área, sendo fruto destas atividades, os relatórios produzidos pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul e pela empresa Brain Tecnologia. Os dados obtidos servem de fonte às modelagens desenvolvidas nesta dissertação de mestrado.

É importante definir o que é TPH (*Total Petroleum Hydrocarbon*), abreviação largamente utilizada nesta pesquisa. Trata-se de um indicador analítico do total de petróleo extraído de uma determinada amostra, podendo ser utilizada diferentes técnicas para esta extração. O resultado de TPH de uma determinada amostra não representa em si um bom indicador para se concluir o grau de contaminação de uma determinada área (o mais apropriado é encontrar referências através de BTEX, por exemplo), porém para efeitos de remediação ambiental seus valores podem ser utilizados como referência. O Instituto Americano do Petróleo (*American Petroleum Institute-API*) reconhece, através de sua publicação número 4.709, que valores superiores a 10.000 mg/kg identificam um determinado sítio como contaminado. Contudo, valores muito mais baixos são estabelecidos quando se trata de águas contaminadas.

1.4. Organização da dissertação

A dissertação está estruturada de maneira que a ordem dos capítulos representa a seqüência de atividades propostas como uma rotina para realizar um diagnóstico de uma área contaminada por derramamento de hidrocarbonetos ou, até mesmo, por qualquer outra substância ou resíduo.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução acerca dos assuntos que serão abordados no decorrer da dissertação, situa a área geograficamente, descreve o acidente que originou o banco de dados, enumera os objetivos que se pretende alcançar e relata a motivação que levou ao seu desenvolvimento.

O Capítulo 2 descreve a geologia da área, situando-a no contexto da Bacia Sedimentar de Curitiba, apresenta o método utilizado na interpretação dos dados de poços e imagens da área do acidente, e caracteriza as principais feições arquiteturais resultantes do sistema sedimentar instalado na área alvo.

O Capítulo 3 descreve a etapa de caracterização geofísica da área impactada. Faz-se, portanto, uma revisão teórica da ferramenta GPR (*Ground Penetrating Radar*) de investigação geofísica, seguida das descrições das etapas de aquisição, processamento e interpretação dos

dados. Ao término, são apresentados e analisados os resultados destas etapas e que, fundamentalmente, servem de banco de dados para o trabalho descritivo no Capítulo 4. As etapas de processamento e interpretação são realizadas com o emprego do *software* RADAN para *Windows NT*.

O Capítulo 4 apresenta um conjunto de técnicas de geoestatística utilizadas na construção do modelo geológico da área. Inicialmente, faz-se uma revisão conceitual das principais técnicas que direta ou indiretamente foram empregadas. Segue-se a modelagem dos dados, onde são descritas as etapas de trabalho até a apresentação dos resultados e avaliação. Todas as atividades são realizadas com o *software* ISATIS, da *Geovariance*.

O Capítulo 5 apresenta a etapa de modelagem de fluxo e transporte da contaminação em água subterrânea referente ao Alagado 4. Uma sucinta revisão conceitual das principais leis que regem o escoamento em meios saturados, seguida das descrições das principais etapas de trabalho desenvolvidas utilizando-se dos recursos do *software* MODFLOW, versão 2000, são realizadas ao longo da seção.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões resultantes desta pesquisa, bem como as algumas sugestões para trabalhos futuros e correlatos.

Capítulo 2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

2.1. Introdução

Este capítulo apresenta uma descrição da geologia da área, procurando situá-la no contexto da Bacia Sedimentar de Curitiba, seguido da reinterpretação geológica de 34 poços de monitoramento realizados pela equipe de técnicos do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que, em convênio com a Petrobrás, executou o projeto de monitoramento hidrológico da área, e, finalmente, a interpretação do ambiente de sedimentação ao qual está associada à área caracterizada como Alagado ou Banhado 4. Descreve, ainda, o método utilizado na interpretação dos dados (poços e imagens da área do acidente) e que buscaram revelar elementos característicos dos corpos sedimentares associados.

2.2. Descrição geológica

A área do acidente está inserida na denominada Bacia Sedimentar de Curitiba, localizada na porção centro-sul do primeiro planalto de Curitiba, ou, simplesmente, planalto de Curitiba e que abrange a totalidade do município homônimo e parte dos circunvizinhos.

A caracterização geológica da área acidentada foi realizada através de trabalhos de campo por geólogos e técnicos de geologia envolvidos no projeto de delimitação inicial da contaminação ao longo do arroio Saldanha e complementada, pelo autor, em duas visitas à área.

Descrições geológicas detalhadas da Bacia de Curitiba são realizadas nos trabalhos de Salamuni & Salamuni (1999) e pela Mineropar – Minerais do Paraná S.A., Mapeamento Geológico – Geotécnico das folhas COMEC A137, A138, A139 e A140. Em particular, a área está situada na folha A137, conforme representado na Figura 2.1.

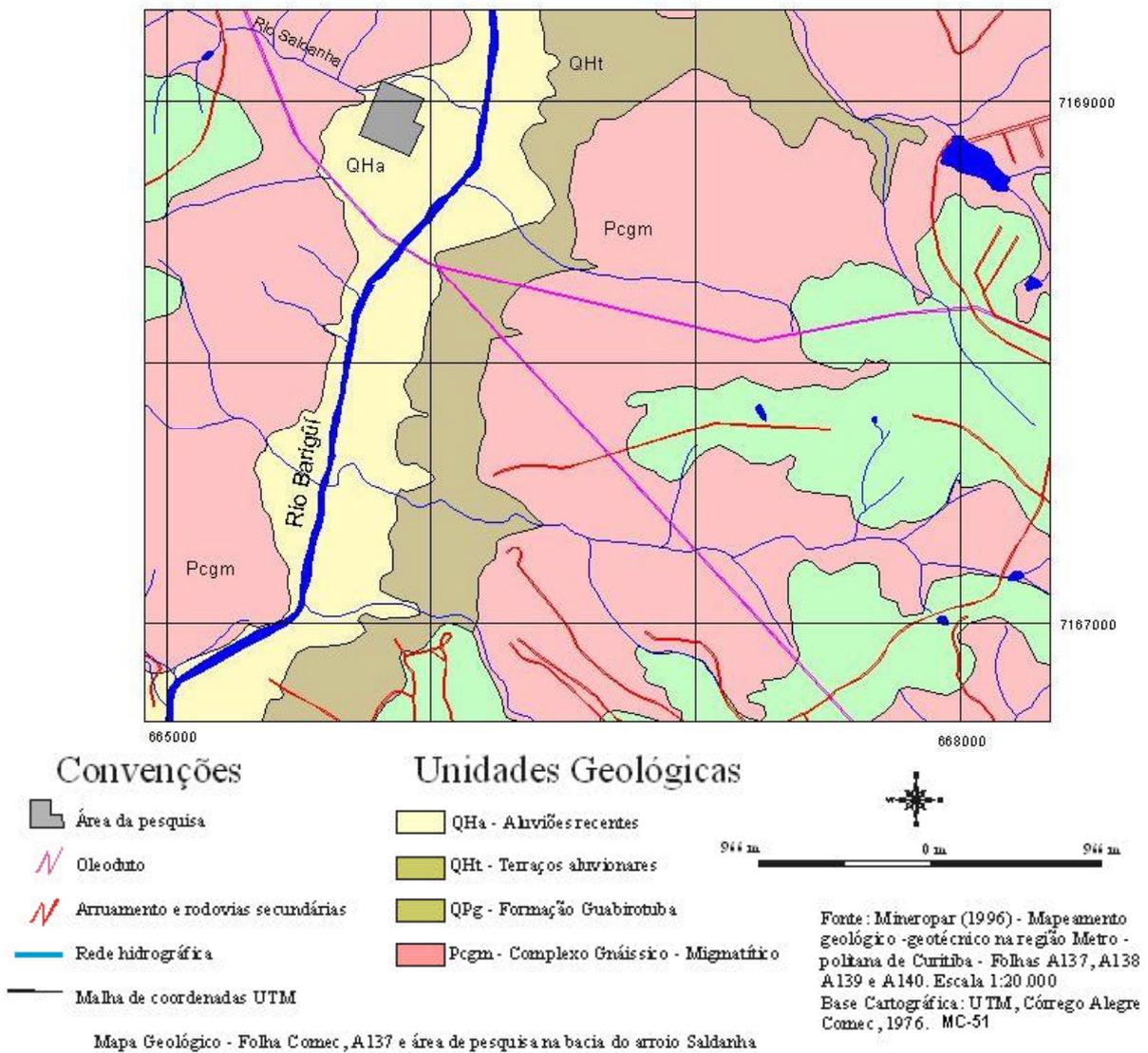


Figura 2.1: Mapa geológico com a localização da área do acidente, Mineropar (1996).

A região de Curitiba é composta por unidades litoestratigráficas distintas que são representadas, em parte, pelo embasamento e, em parte, pelos sedimentos sobrepostos (Salamuni & Salamuni, 1999).

O embasamento é caracterizado pela presença de xistos, quartzitos, anfibolitos e principalmente gnaisses e granitóides, em parte migmatizados, de idade Paleoproterozóica, porém rejuvenescidos no Meso e Neoproterozóico. Já as unidades sedimentares são representadas pelas

formações Guabirota e Tinguis, além dos terrenos aluvionares. A Tabela 2.1 resume as informações estratigráficas das diversas unidades geológicas que compõem a Bacia de Curitiba.

Tabela 2.1: Resumo estratigráfico da Bacia de Curitiba (modificado de Salamuni & Salamuni, 1999).

IDADE	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA PRINCIPAL
Quaternário Holoceno	Aluviões e depósitos coluvionares secundários (QHa)	Depósitos arenosos de pouca a média seleção, friáveis e em parte com matriz argilosa.
Quaternário Pleistoceno-Holoceno	Formação Tinguis	Colúvios argilosos, cascalheiras e lentes de areias arcossianas.
Terciário Mioceno-Plioceno	Formação Guabirota (QPg)	Argilas, areias arcossianas, cascalheiras em meio a sedimentos areno-argilosos, lentes de areias quartzosas.
Jurássico-Cretáceo	Formação Serra Geral	Diques de diabásio e dioritos
Paleoproterozoico e Nearqueano	Complexo Gnáissico-Migmatítico (Pcgm)	Migmatitos, ortognaisses, xistos, quartzitos restritos e granitos orogênicos deformados.

O embasamento cristalino é representado pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico constituído por gnaisses quartzo-feldspáticos migmatizados, de composição granodiorítica a tonalítica, localmente com veios de quartzo e zonas de alteração hidrotermal, granulação média, apresentando coloração cinza esbranquiçada a cinza escura, com bandas de espessura centimétrica a métrica (Mineropar, 1996).

As unidades sedimentares são representadas pelas formações Guabirota e Tinguis, esta última não ocorrente na área ou próximo a área de estudo, além dos terrenos aluvionares recentes. A unidade de maior abrangência, a Formação Guabirota, apresenta espessura máxima de 80 m, sendo essencialmente formada por argilas pouco consolidadas, areias arcossianas e depósitos rudáceos basais. A Formação Tinguis é composta por sedimentos retrabalhados da Formação Guabirota, porém com pouco transporte (Salamuni & Salamuni, 1999).

A Formação Guabirota ocorre nas porções mais elevadas da topografia, e é nela que estão implantadas as instalações industriais da REPAR. Esta unidade geológica é a matriz dos solos existentes ao longo do arroio Saldanha. Caracteriza-se por sedimentos argilosos de cor

cinza, contendo grãos de quartzo e feldspato, intercalados com lentes e camadas de areias arcossianas de granulação média a grossa, mal selecionada. Localmente, ocorrem brechas sedimentares com fragmentos de gnaisses, granitos, quartzitos, junto ao contato com as rochas do complexo subjacente (Mineropar, 1996).

Salamuni & Salamuni (1999) identificam terraços aluvionares de origem fluvial, formados em épocas mais antigas que a de deposição dos rios atuais da região. Normalmente, são encontrados entre as planícies aluviais e as encostas, principalmente ao longo dos rios Barigüi e Iguaçu. Por vezes, são encontrados nas cabeceiras das drenagens menores, preenchendo antigos canais escavados no embasamento gnáissico-migmatítico. Nessa situação, muitas vezes se confundem com os sedimentos da Formação Guabirotuba, tal como na região em apreço.

A unidade de sedimentos aluvionares recente está representada por depósitos assentados na maior parte sobre o embasamento gnáissico-migmatítico ao longo do vale do rio Iguaçu. Para Salamuni & Salamuni (1999), esses sedimentos ocupam uma área de 500 km² e correspondem a 20% da superfície da bacia. São constituídos principalmente por areias finas a grossas e cascalhos, com matriz siltico-argilosa e siltico-arenosa. O pacote areno-rudáceo apresenta estruturas sedimentares tais como estratificações plano-paralelas e cruzadas. Os depósitos aluvionares são capeados por solos hidromórficos com espessura de cerca de 1 m. A espessura média da seqüência total pode atingir 5 m. A área de estudo está assentada sobre estes depósitos aluvionares.

Os solos encontrados na área são caracterizados como hidromórficos, designação esta conferida a solos mal drenados ou muito mal drenados, regidos pela influência da água em função do relevo e do material originário. Esses solos são representados pelos aluviões e terraços da bacia do Rio Iguaçu e outros curso d'água principais. Caracterizam-se por apresentar cor negra, por vezes turfoso, porosos, textura argilosa e baixa permeabilidade.

2.3. Reinterpretação dos poços de monitoramento

A etapa seguinte do trabalho foi analisar e interpretar as descrições de 87 poços de monitoramento perfurados pelo grupo de técnicos da UFRGS no projeto de monitoramento hidrogeológico da microbacia do arroio Saldanha e que consta do relatório da fase de avaliação,

projeto IGEO/REPAR (Neto & Caicedo, 2000). Nesse relatório, os técnicos descrevem os poços de forma detalhada, classificando as camadas por intermédio da cor, composição granulométrica, plasticidade, textura e estrutura, além de caracterizações subjetivas quanto à quantidade de matéria orgânica (restos vegetais) e presença de hidrocarbonetos (odor). É importante destacar que esses poços possuem uma profundidade média de 2,0 m, sendo que em nenhum caso foi atingido o embasamento cristalino.

Foram então selecionados 34 poços de monitoramento perfurados na área do Alagado 4. O mapa de localização dos poços no contexto do Alagado 4 encontra-se como Anexo 2.

Em seguida, procurou-se reinterpretar os perfis desses 34 poços individualizando-os em um número menor de camadas, buscando uma correlação. Para este fim foram observadas a composição mineralógica, cor, presença de matéria orgânica, aspectos texturais, estruturais, plasticidade, etc. O resultado foi a caracterização de 4 diferentes camadas que se estendem na totalidade da área acidentada. No Capítulo 4 buscar-se-á a modelagem destas camadas, o que deverá permitir um melhor entendimento do sistema deposicional.

A Figura 2.2 representa os perfis de seis poços alinhados transversalmente ao Alagado 4, permitindo uma correlação entre as camadas geológicas individualizadas (ver planta no Anexo 2).

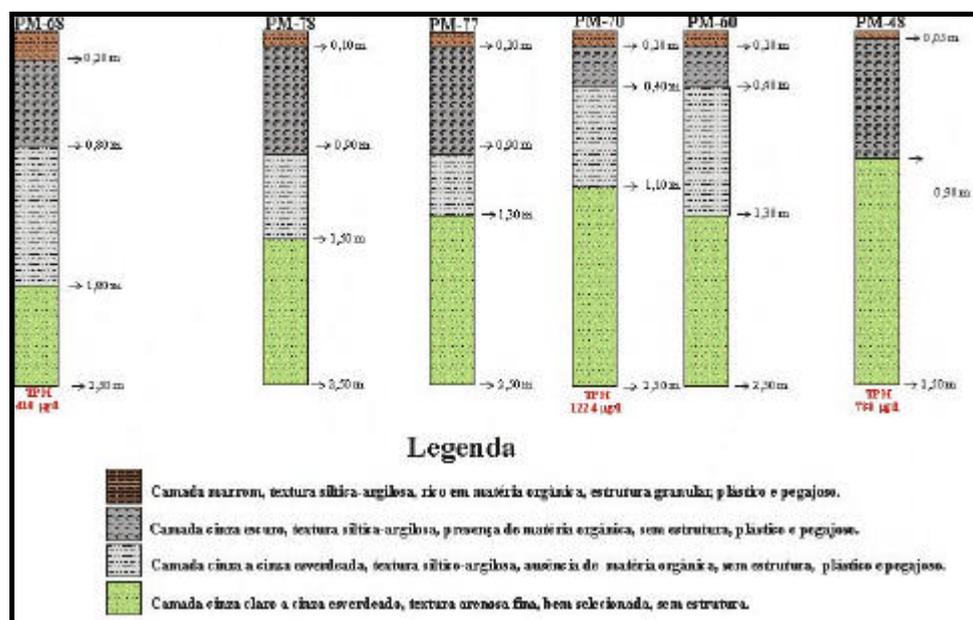


Figura 2.2: Seção transversal do Alagado 4 entre os poços de monitoramento 68 e 48.

2.4. Interpretação geológica do sistema sedimentar

A próxima etapa foi caracterizar a geometria das camadas geológicas mediante o estudo do sistema sedimentar associado, com o auxílio de fotos aéreas. Três pares de fotos foram utilizados. O primeiro, corresponde ao vôo ITC-PR, datado de 06/1980, fotos 49725 e 49726, escala 1:25.000; o segundo vôo, UNIBASE- COMEC, datado de 07/1985, fotos 8B-2676 e 8B-2677, escala 1:8.000. Um terceiro par, vôo Engefoto/Hidrotec, faixa 04, fotos 09 e 10, escala 1:10.000, feito dois dias após o acidente ambiental, produziu o mosaico representado na Figura 2.3.

A fotointerpretação realizada na escala 1:25.000 identifica o sistema fluvial meandrante instalado nessa porção da bacia de drenagem do rio Barigüi. Embora o que se evidencie seja um canal retilíneo, fruto de modificações de natureza antrópica, o sistema fluvial é marcadamente meandrante, sendo identificadas feições deste sistema. Também evidentes, são as extensões da planície de inundação associada. A própria área em apreço é conhecida como alagado ou várzea na toponímia local.

A planície de inundação é definida como a faixa do vale fluvial composta de sedimentos aluviais e que bordejia o curso de água, sendo periodicamente inundada pelas águas de transbordamentos provenientes do rio. Essas planícies funcionam como bacias de decantação de materiais em suspensão. O canal meandrante, em geral, situa-se em um nível superior ao das baixadas marginais adjacentes, tal como é revelado na Figura 2.3.

A migração do canal do rio faz com que muitos aspectos topográficos relacionados com a erosão e sedimentação integrem a configuração da planície de inundação, como, por exemplo, os meandros abandonados. Todavia, há formas de relevo desenvolvido por processos e sedimentação que ocorrem fora do canal, na superfície da planície de inundação, constituindo também elementos arquiteturais característicos de sua composição: depósitos de diques marginais, de rompimento de diques marginais e da própria planície de inundação. Algumas destas formas estão evidenciadas na Figura 2.3.

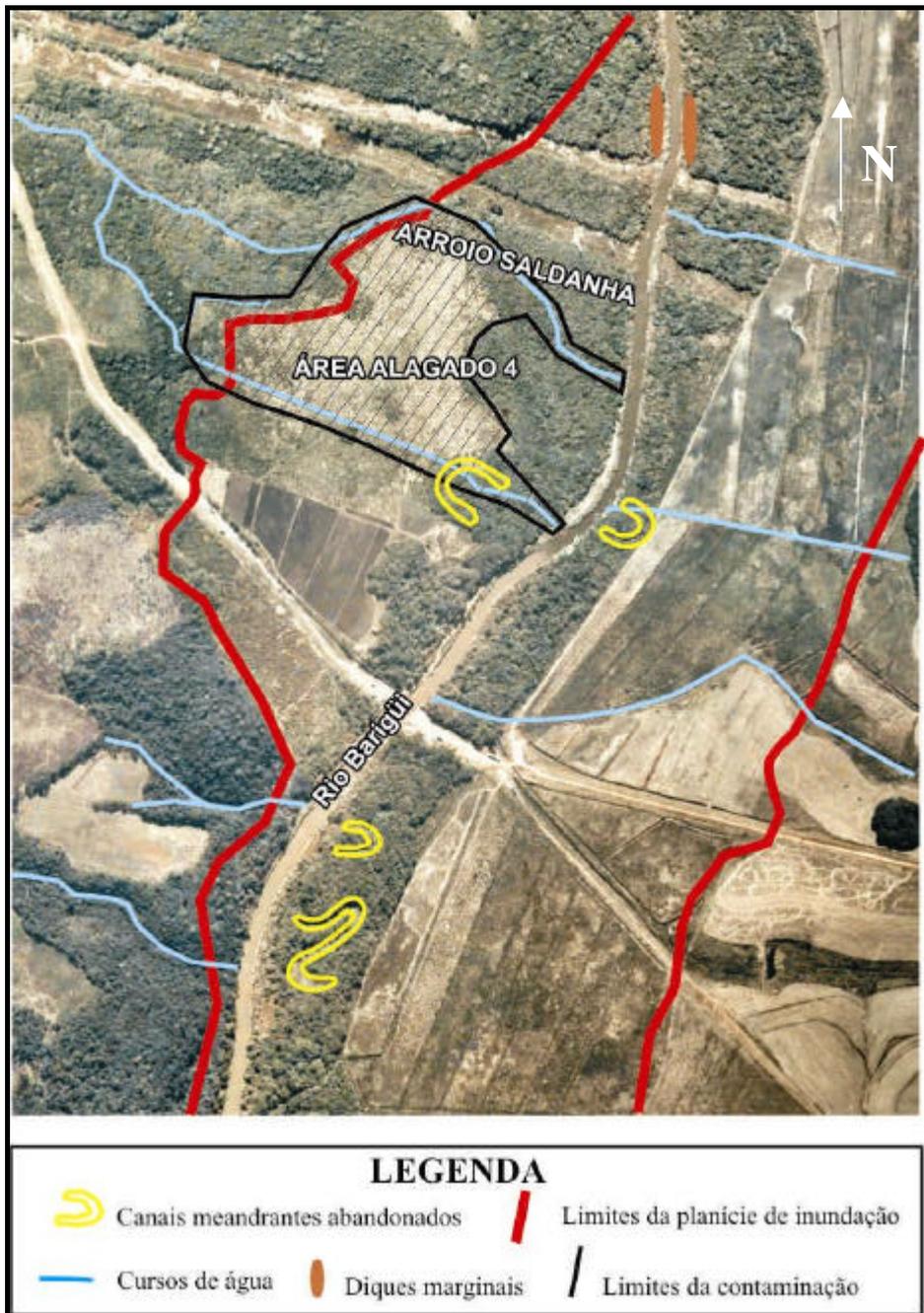


Figura 2.3: Mosaico aéreo na escala 1:10.000 (Engefoto/Hidrotec, 2000) da área do Alagado 4, que identifica elementos arquiteturais do ambiente de sedimentação fluvial meandrante.

Uma forma de compreender a arquitetura dos sistemas fluviais é através da associação com modelos propostos por Miall (1996), que caracteriza a arquitetura de dezesseis estilos fluviais distintos, diferenciando-os, basicamente, pelo tipo de sedimento transportado, sinuosidade do

canal e grau de entrelaçamento. Desta classificação, as melhores associações com os elementos evidenciados na fotointerpretação e descrição dos poços do Alagado 4 foram com os modelos arquiteturais definidos como *sand-bed meandering stream* e *fine-grained meandering stream*, definidos para rios de alta sinuosidade e dominados, seja por elementos arenosos, como no primeiro caso, ou pelíticos, segundo caso. Os modelos citados estão apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5.

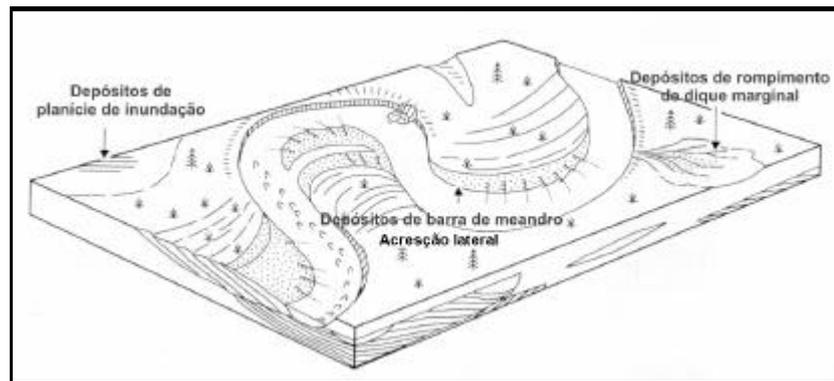


Figura 2.4: Modelo arquitetural definido para sistemas meandrantes compostos predominantemente por elementos arenosos (modificado de Miall, 1996).

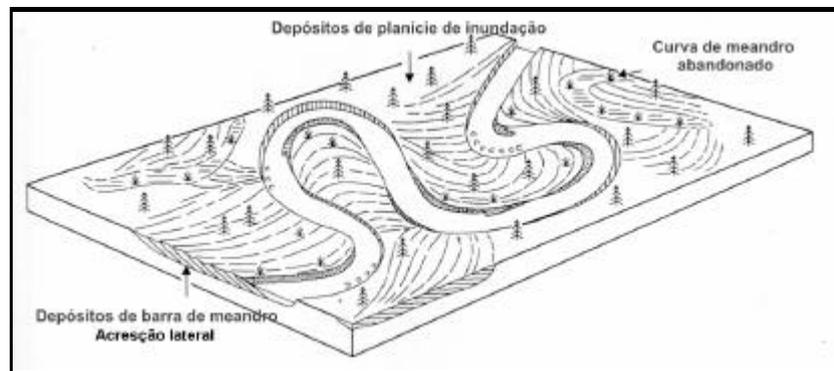


Figura 2.5: Modelo arquitetural para sistemas meandrantes compostos predominantemente por elementos pelíticos (modificado de Miall, 1996).

Geomorfologicamente, os depósitos dos diferentes sub-ambientes fluviais podem ser subdivididos nos de acreção lateral, aqueles que resultam na redistribuição lateral dos sedimentos, sendo típicos das barras de meandro, e os de acreção vertical, que denotam uma

aglomeração da deposição de sedimentos em suspensão, tal como ocorre na planície de inundação.

Destaca-se que no sistema fluvial, os principais depósitos estão associados aos de canal, aos de rompimento dos diques marginais e aos da planície de inundação. Dentre os depósitos originados pela atividade do canal deve-se destacar os associados aos de barras de meandro, que se constituem na parte principal do sistema fluvial, e formam feições conspícuas no lado convexo dos meandros (acresção lateral). Neste caso, os sedimentos, geralmente de natureza mais grosseira, formam estruturas de cordões e representam fases de migração do canal durante as enchentes. Miall (1996) destaca a grande variedade de formas geométricas e estruturas geradas por esses depósitos. Estratificações cruzadas acanaladas, de corte e preenchimento, plano-paralelas e tangenciais, devem suas formações às variadas condições de regime de fluxo do sistema.

Os depósitos associados ao rompimento de diques naturais, ou seja, aqueles formados quando o excesso de água da enchente ultrapassa os diques, possuem uma arquitetura diferenciada. Depósitos típicos consistem de arenitos finos a médios, ricos em estruturas sedimentares de origem hidrodinâmica, além de evidências de raízes de plantas e bioturbações, (Miall, 1996). Predominam acamamentos cruzados acanalados e laminações cruzadas (*ripple marks*). Marcadamente, esses depósitos mostram um decréscimo da granulometria dos sedimentos à medida que se afastam do canal (*finning upward*).

Finalmente, os depósitos de planície de inundação são formados nas regiões planas que margeiam os canais fluviais através das águas que ultrapassam os diques marginais. Estas planícies funcionam como verdadeiras bacias de decantação dos materiais em suspensão, sendo basicamente constituídos por sedimentos mais finos, em geral siltico-argilosos. Estratificações ou laminações plano-paralelas são as estruturas evidenciadas, porém comumente apresentam-se destruídas devido à bioturbação (Suguio, 1980).

É importante evidenciar as principais feições arquiteturais resultantes do sistema fluvial meandrante, pois se busca caracterizar nas seções de radar interpretadas no Capítulo 3, elementos geométricos que confirmem os modelos apresentados.

Capítulo 3 MODELAGEM GEOFÍSICA

3.1. Introdução

Este capítulo descreve a etapa de caracterização geofísica da área do Alagado 4. Um resumo conceitual da ferramenta de investigação geofísica utilizada, seguido das descrições das etapas de aquisição, processamento e interpretação dos dados, é apresentado. Ao término, faz-se a apresentação e análise dos resultados que deverão fazer parte da construção do modelo geológico proposto no próximo capítulo.

3.2. A Geofísica e a Geofísica Aplicada

A Geofísica é definida como a ciência que estuda a estrutura, composição e processos atuantes na Terra, bem com as propriedades físicas dos materiais que a compõem, a partir de dados coletados por instrumentos adequados, os quais utilizam diversos métodos físicos para a obtenção das informações a serem analisadas.

Chama-se de Geofísica Aplicada o ramo da Geofísica que, por meio da realização e interpretação de medidas de propriedades físicas da Terra, busca determinar as condições de subsuperfície, com objetivos acadêmicos, tecnológicos e, principalmente, econômicos.

Mais recentemente foi introduzido o conceito de Geofísica Ambiental, que trata da aplicação dos métodos de Geofísica na investigação de fenômenos de caráter físico-químicos que ocorrem em subsuperfície e que estejam afetando o meio ou implicando em impactos ambientais (Reynolds, 1997).

A Geofísica Aplicada, em particular na investigação de problemas ambientais, pode ser classificada em diferentes métodos de prospecção. Um quadro resumo ilustrativo dos principais métodos geofísicos aplicados na área ambiental é representado na Figura 3.1.

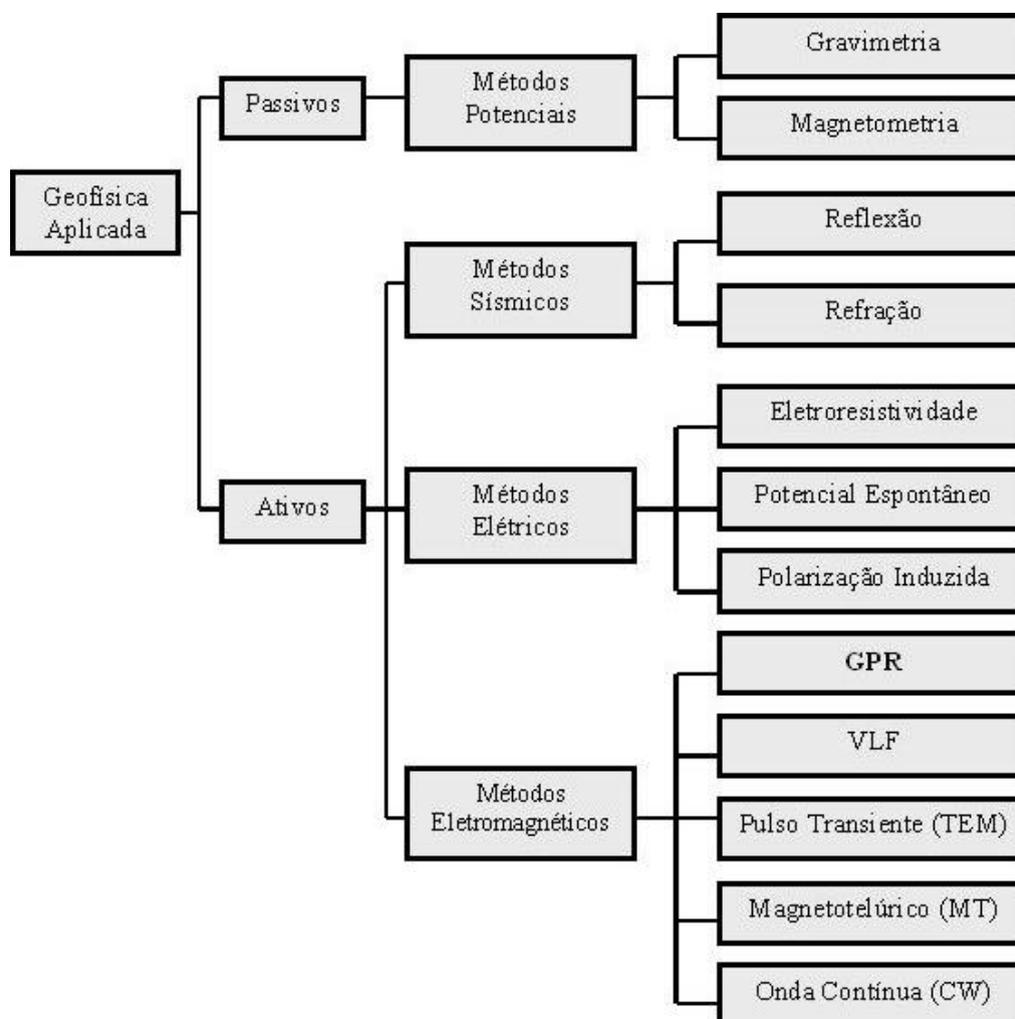


Figura 3.1: Principais métodos geofísicos de investigação aplicados à área ambiental (modificado de Reynolds, 1997).

Este capítulo trata da aplicação de uma ferramenta classificada como eletromagnética (Parasnis, 1997), conhecida como GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou georadar, que estuda os contrastes das propriedades eletromagnéticas do meio em subsuperfície. Em particular, busca-se avaliar a potencialidade desta ferramenta em áreas de sedimentação quaternária, predominantemente argilosas, tal como a área do Alagado 4.

3.3. Características do GPR ou georadar

O GPR ou georadar é um dispositivo de prospecção geofísica que se utiliza dos fenômenos de geração e propagação de ondas eletromagnéticas de altas frequências, tipicamente na faixa de 10 a 1000 MHz, e que serve para identificar estruturas rasas em sub-superfície.

Pulsos de alta frequência são emitidos para o subsolo por meio de uma antena transmissora, sofrendo reflexões, refrações e difrações na subsuperfície, sendo captadas por uma antena receptora. Esses sinais são gravados digitalmente como valores de intensidade, convertidos em sinais analógicos por *softwares* de exibição e podem ser visualizados como “sinais de voltagem contra o tempo duplo”. O eixo vertical descendente no ponto de medida representa o tempo duplo e o eixo horizontal, a intensidade do sinal. Esta representação gráfica do sinal adquirido é denominada “traço”. Armazenados digitalmente, os sinais podem ser processados em uma etapa posterior. O funcionamento do sistema é representado de forma esquemática no diagrama da Figura 3.2.

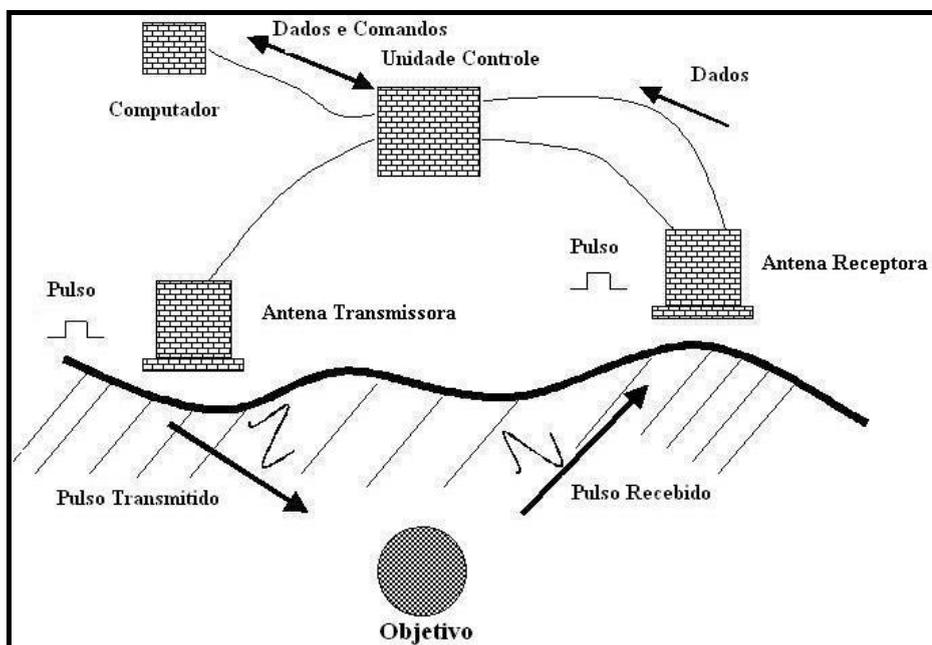


Figura 3.2: Diagrama esquemático do princípio de aquisição dos dados de GPR (modificado do manual do RAMAC/GPR, 1997).

Finalmente, os dados são apresentados em forma de seções onde cada posição de medida em superfície corresponde a um traço, que representa o tempo duplo de percurso do sinal refletido/difratado em descontinuidades presentes no subsolo. A grande facilidade na aquisição do dado GPR permite que uma coleção grande de traços produza uma seção final de alta definição denominada radargrama.

A propagação das ondas de radar depende das propriedades elétricas do meio que elas atravessam. Os contrastes de propriedades elétricas do meio interferirão nos fenômenos de propagação de onda (reflexão e refração), permitindo o delineamento das interfaces em subsuperfície. Nesse aspecto, e somente nesse, o dispositivo de georadar possui semelhanças nas propriedades cinemáticas com o método sísmico de reflexão de ondas elásticas.

3.4. Princípios teóricos da interação da onda EM com o meio

As propriedades eletromagnéticas dos materiais geológicos relacionam-se basicamente à sua composição e à presença de água, ambos os fatores exercendo controle na velocidade de propagação e atenuação de ondas eletromagnéticas (Davis & Annan, 1989).

A velocidade de uma onda eletromagnética (EM) é dada por:

$$\text{para o meio material, } v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}; \quad (3.1)$$

$$\text{para o ar (espaço livre), } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}; \quad (3.2)$$

onde : ϵ = permissividade dielétrica do meio;

ϵ_0 = permissividade dielétrica do espaço livre = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m;

μ = permeabilidade magnética do meio;

μ_0 = permeabilidade magnética do espaço livre = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m;

c = velocidade da onda eletromagnética no vácuo = 0,3 m/ns.

As ondas eletromagnéticas (EM) propagam-se pela matéria sempre com velocidade (v) menor que sua velocidade no espaço livre (c) como pode ser observada nas equações a seguir, pois $\epsilon > \epsilon_0$ e $\mu \geq \mu_0$ para a maioria dos materiais geológicos.

Como o GPR opera com altas frequências (da ordem do MHz) os efeitos relativos ao deslocamento (polarização) predominam sobre os condutivos (Gandolfo, 1999). Assim, para a maioria das aplicações práticas, pode-se afirmar que as reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais com distintos valores de permissividade dielétrica. É comum expressar esta grandeza por meio de um número adimensional denominado constante dielétrica ou permissividade relativa (K), que é a razão entre a permissividade do material e a permissividade do espaço livre, isto é,

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}; \quad (3.3)$$

A propagação de uma onda EM de alta frequência no terreno pode ser descrita pela sua velocidade e a atenuação sofrida durante o percurso. A permissividade dielétrica é o principal fator que influencia a velocidade, enquanto a condutividade elétrica tem influência direta na atenuação do sinal. Assim, a penetração do pulso de radar é limitada principalmente pela condutividade elétrica do terreno sendo que a eficácia de um levantamento pode ser comprometida em solos muito condutivos (Gandolfo, 1999).

A Figura 3.3 ilustra a relação entre velocidades e frequências para diversos valores de condutividades e serve como base para a compreensão da técnica.

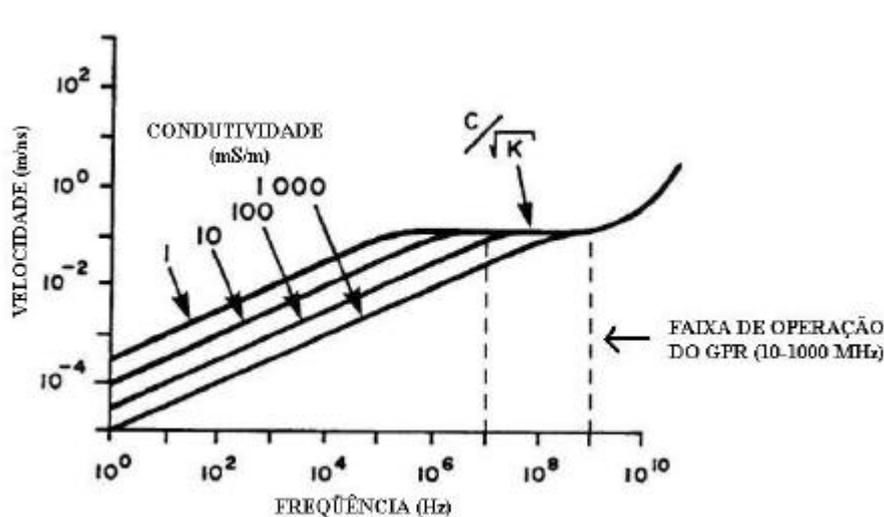


Figura 3.3: Relação entre velocidade e frequência para diferentes valores de condutividade elétrica (modificado de Davis & Annan, 1989).

Na faixa de operação do GPR (10-1000MHz), a velocidade da onda permanece constante sob condutividades menores que 100mS/m e o seu valor é dado pela equação 3.1. Assim, esta não apresentará dispersão (não dependerá da frequência) e eventuais mudanças no seu valor estarão relacionadas apenas às características do ambiente de propagação, isto é, do meio geológico. Como os contrastes de velocidade podem produzir reflexões da energia eletromagnética, estas irão ocorrer nas interfaces de materiais ou camadas que apresentem distintos valores de constante dielétrica (Davis & Annan, 1989).

Por sua vez, as propriedades elétricas dos materiais geológicos são fortemente influenciadas pela presença da água. As moléculas de água têm um dipolo natural intrínseco, e, por isso, conferem ao material uma permissividade relativa elevada à baixa frequência. O solo pode ser imaginado como um sistema constituído pela mistura de três fases: matriz do solo, ar e água. Dependendo da quantidade de água e de ar nos poros da matriz do solo, há uma grande variação nas propriedades elétricas do material (Davis & Annan, 1989). Essas variações estão expostas para diferentes materiais na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Típicos valores de constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação comumente observados em alguns materiais geológicos a 100 MHz (modificado de Davis & Annan, 1989 e RAMAC/GPR, 1997).

Material	Constante dielétrica K*	Condutividade elétrica σ (mS/m)	Velocidade V (m/ns)	Atenuação, α (dB/m),
Ar	1	0	0,30	0
Água doce	80-81	0,5	0,033	0,1
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Calcário	4-8 (7-16)	0,5-2	0,12 (0,075-0,113)	0,4-1
Folhelho	5-15	1-100	0,09 (0,077-0,134)	1-100
Siltito	5-30 (9-23)	1-100	0,07 (0,063-0,100)	1-100
Argilito	5-40 (4-16)	2-1000	0,06 (0,074-0,150)	1-300
Granito	4-6 (5-7)	0,01-1	0,13 (0,113-0,134)	0,01-1

* Valores entre parênteses, segundo RAMAC (1997). Os maiores valores de velocidade se aplicam aos meios não saturados.

3.5. Penetração em profundidade do sinal de radar

A capacidade de penetração da onda de radar em um meio específico depende da potência do equipamento, do espectro de frequência da antena, das características da antena e das propriedades eletromagnéticas do meio em subsuperfície, como já exposto. A atenuação, ou perda, do sinal é causada por diversos fatores: conversão de energia radiada em energia calorífica devido às perdas por condução elétrica; perdas por relaxação dielétrica das moléculas de água; e/ou difusão química em minerais de argila. Além disso, o efeito de espalhamento do sinal por heterogeneidades de pequena escala também pode aumentar a atenuação com o aumento da frequência (Davis & Annan, 1989). Materiais de alta condutividade, tal como solos ricos em argila, podem reduzir drasticamente a profundidade de penetração.

A atenuação, segundo Davis & Annan (1989), é usualmente expressa por:

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3 \sigma}{\sqrt{K}}, \quad (3.4)$$

onde : α = atenuação elétrica do meio;

K = constante dielétrica do meio;

σ = condutividade elétrica expressa em mS/m.

A Figura 3.4 mostra a relação entre a atenuação e a frequência em diferentes condutividades para materiais com constante dielétrica igual a 4. O radar opera em frequências onde as propriedades capacitivas dominam as propriedades condutivas, fazendo com que a atenuação permaneça essencialmente constante em diferentes condutividades. A atenuação aumenta rapidamente para as frequências acima de 100 MHz.

Por sua vez, o contraste na constante dielétrica entre as camadas do subsolo gera as reflexões da radiação incidente. Quanto maior o contraste, maior será a energia de radiação eletromagnética refletida. A proporção de energia refletida, dada pelo coeficiente de reflexão (R), é determinada pelo contraste nas velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas e, mais fundamentalmente, pelo contraste na constante dielétrica.

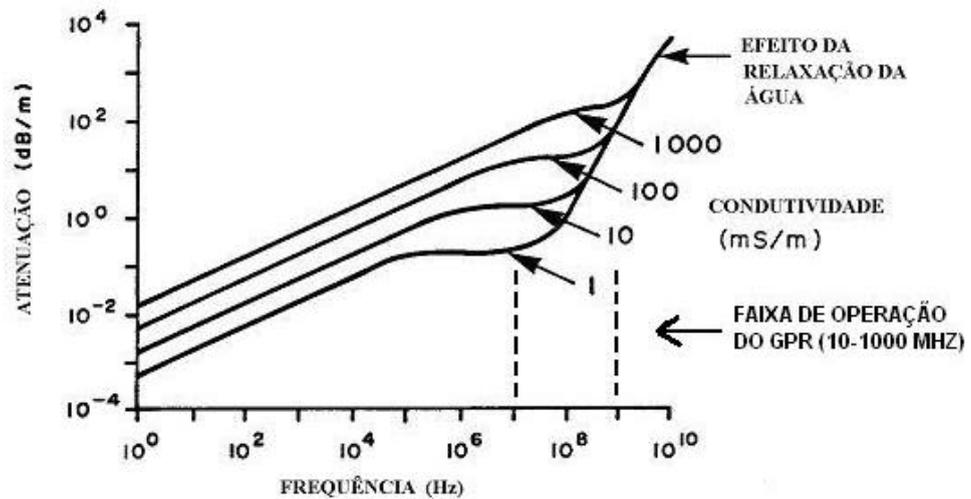


Figura 3.4: Relação entre atenuação e frequência em diferentes condutividades (modificado de Davis & Annan, 1989).

A expressão do coeficiente de reflexão para campos eletromagnéticos é bastante complexa. Porém, pode ser simplificada supondo que o meio não seja condutivo, ou seja, que a condutividade elétrica (σ) tenda a zero, e supondo ausência de materiais magnéticos, ou seja, permeabilidade elétrica (μ) semelhante entre os materiais. Desta forma, o coeficiente de reflexão de um semi-espaço para um sinal incidente normal é expresso por:

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}}; \quad (3.5)$$

onde : K_1 e K_2 são as constantes dielétrica dos meios 1 e 2, respectivamente.

3.6. Aquisição dos dados de GPR

O levantamento de campo foi realizado em agosto de 2000, pela empresa Brain Consultoria Ltda, em trabalho contratado pela Petrobrás, visando avaliar a extensão do acidente ambiental. A imagem abaixo, Figura 3.5, mostra a área de realização do projeto 3D.

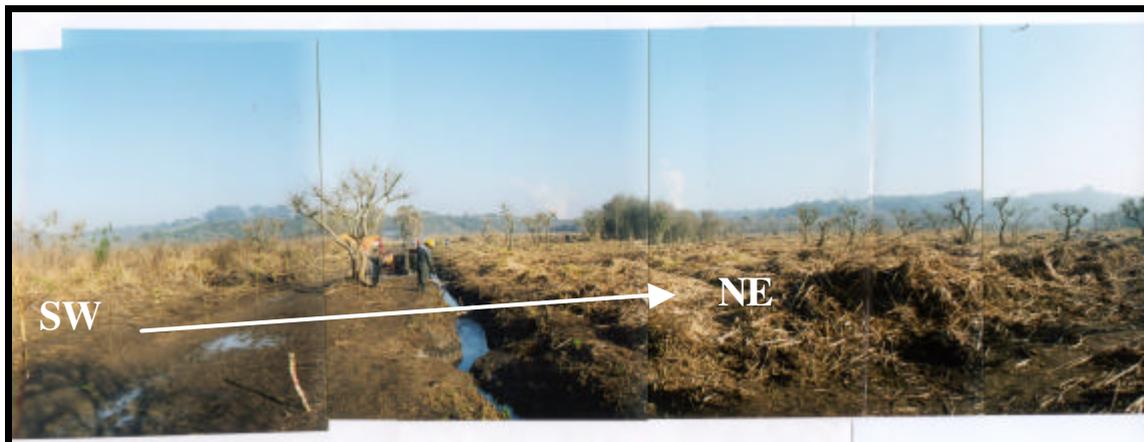


Figura 3.5: Imagem da área estudada mostrando o sentido de aquisição das linhas do levantamento 3D de SW para NE.

A aquisição de dados GPR seguiu a técnica conhecida como afastamento comum (*common offset*). Nesta técnica, mantém-se o afastamento constante, isto é, o espaçamento entre as antenas é mantido constante durante a aquisição dos dados. O equipamento é deslocado ao longo de um perfil efetuando-se diversas medidas, cada qual correspondendo a um traço na seção gerada (Figura 3.6). Este tipo de aquisição tem analogia com as técnicas empregadas na sísmica de reflexão, porém neste último caso o termo significa a distância entre fonte e recepção adotadas no levantamento.

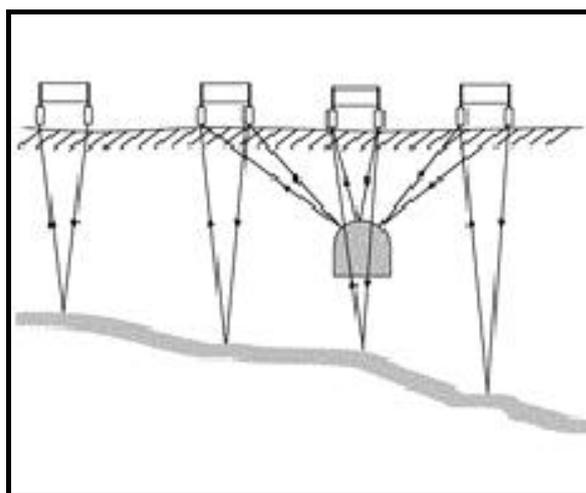


Figura 3.6: Ilustração conceitual da técnica common offset utilizada no levantamento.

O equipamento de GPR utilizado neste trabalho foi o RAMAC/MALÄ GeoScience com um conjunto de antenas blindadas de 250 MHz. A janela de tempo foi definida para 900 amostras por traço, sendo a frequência de amostragem de 3596,5 MHz. Esta última, por sua vez, está relacionada à frequência da antena utilizada. Cada ponto de medida constitui uma somatória de várias medidas produzindo um traço (*stack*). O número de medidas (16 em nosso caso) pode variar, sendo que um valor elevado possibilita uma maior razão sinal/ruído causando, porém, um aumento considerável no tempo de aquisição de cada traço.

O levantamento 3D constituiu-se de 106 linhas de aquisição paralelas, sendo 85 linhas com comprimento de 230,0 m e 21 linhas com 130,0 m, perfazendo uma área total de 43.840 m². O espaçamento entre traços foi de 0,3 m e entre linhas de, aproximadamente 2,0 m. A Figura 3.7 situa o levantamento 3D de GPR no contexto do Alagado 4.

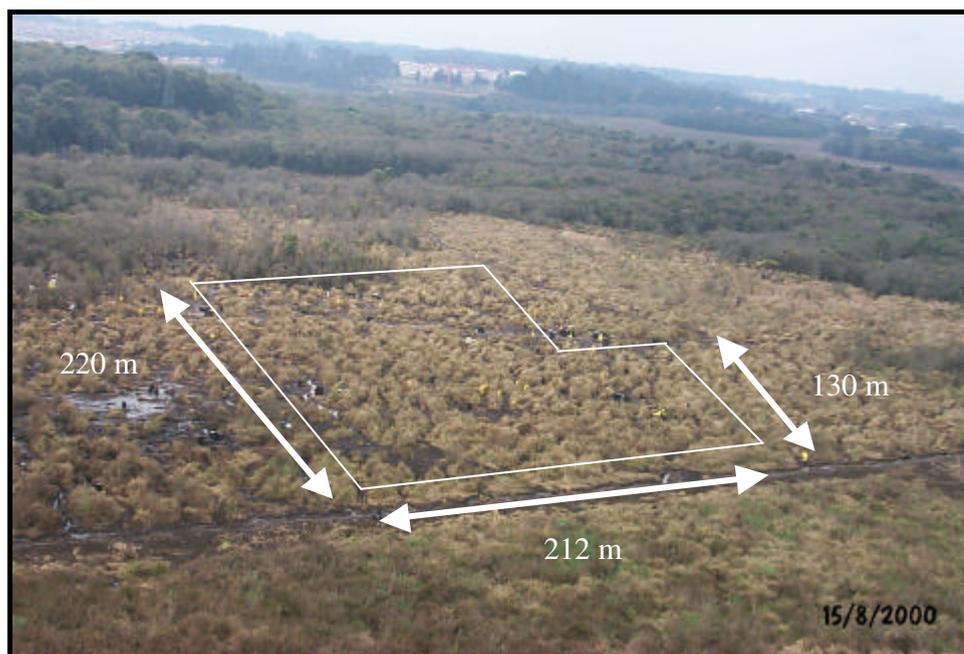


Figura 3.7: Imagem aérea de localização do programa 3D na área do Alagado 4, realizada 30 dias após o acidente em sobrevôo de helicóptero.

3.7. Processamento dos dados de GPR

A etapa seguinte no processo de investigação com GPR é a obtenção de uma seção de reflexão. Para tanto, o tratamento ou processamento dos dados deve seguir uma série de etapas que, em conjunto, objetivam eliminar os eventos indesejáveis (ruídos) e corrigir distorções,

realçando aqueles de real interesse (sinais). As rotinas computacionais procuram melhorar significativamente o aspecto de um dado, porém estes algoritmos jamais transformam um registro de qualidade ruim em dado de boa qualidade.

Nesta Seção são abordadas e descritas as principais etapas de processamento dos dados adquiridos na área do Alagado 4. O programa de processamento utilizado foi o RADAN para Windows NT, versão 4.0, licenciado pela GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*). O pacote possui, basicamente, todas as ferramentas usuais de processamento de dados sísmicos, tais como ferramentas de edições, restauração e aplicação de ganhos, filtragens no domínio do espaço e frequência, deconvolução, correções estáticas, migração etc.

Um fluxograma das principais etapas de processamento está apresentado na Figura 3.8. No que se segue, explica-se em detalhes o resultado obtido de cada etapa.

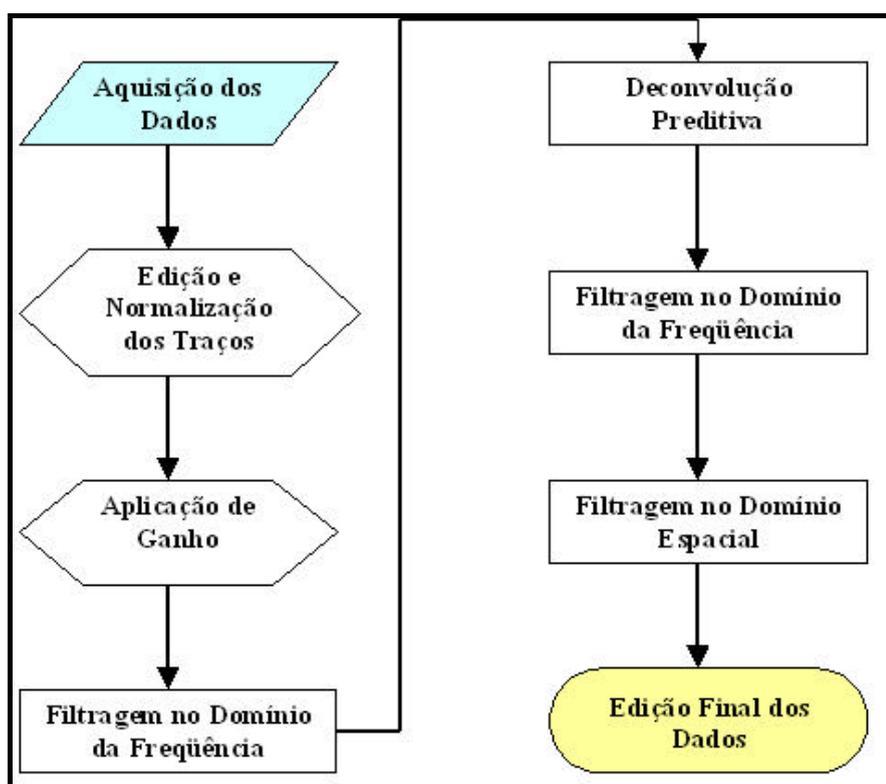


Figura 3.8: Fluxograma de processamento das linhas de GPR utilizado nesta pesquisa.

Inicialmente, foram carregadas e transformadas as linhas adquiridas de seu formato de *.RAD* para *.DZT*, este último próprio para o processamento no pacote RADAN.

A etapa seguinte consistiu em editar os dados deixando todas as linhas com o mesmo número de traços. Para tanto, foram utilizadas as seguintes ferramentas do software: *Editing File Header*, *Editing the Data*, *Editing the Markers* e *Horizontal Scale Adjustments/Distance Normalization*.

Após esta fase, usualmente de grande demanda de tempo, resultou que as primeiras 85 linhas ficaram com 766 traços e as demais, com 433 traços. Para ilustrar as fases de processamento escolheu-se a linha 49 como referência. Assim, abaixo está representada na Figura 3.9 a seção bruta de campo apenas editada em seu número de traços.

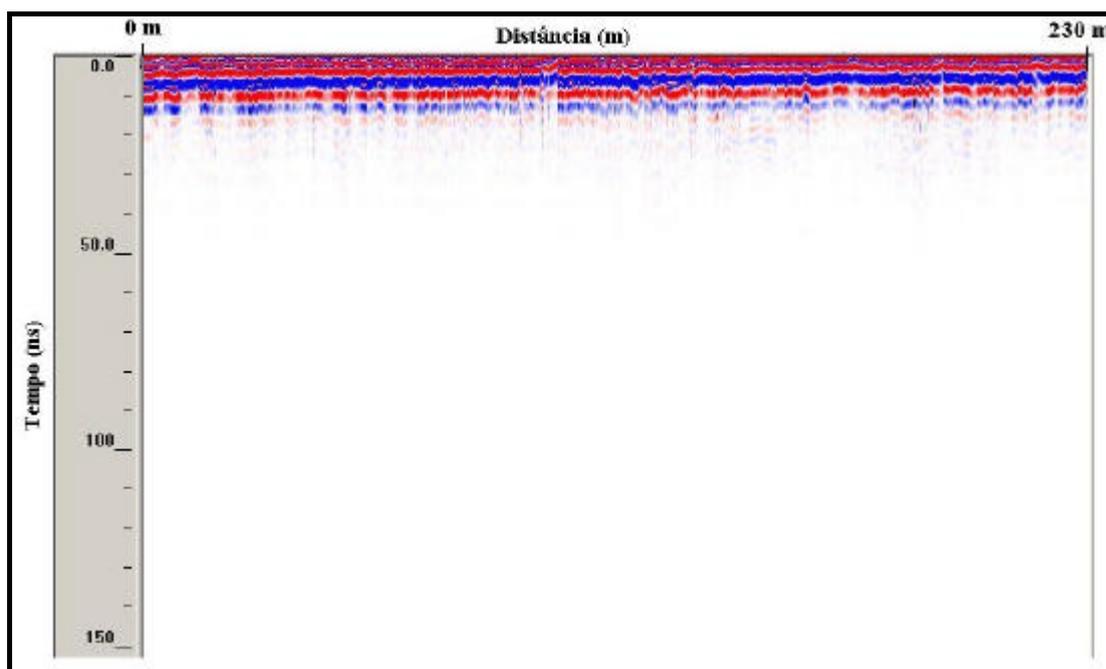


Figura 3.9: Radargrama de campo referente à linha 49, normalizada no número de *scans*.

Após a regularização dos dados, iniciou-se o processamento dos dados propriamente dito. Assim, aplicou-se ganho visando restaurar as atenuações sofridas pela onda eletromagnética inerentes ao levantamento. Dentre os programas de ganhos oferecidos pelo pacote RADAN NT

optou-se pela aplicação do ganho AGC (*Automatic Gain Control*), cujo ganho envolve o cálculo da amplitude média dentro de janelas deslizantes traço abaixo, derivando-se daí multiplicadores que equalizam janelas do traço individualmente. Assim, foram definidas 16 janelas ou nós onde o operador de ganho atuou, definindo-se um fator de ganho de 3 dBs.

Na etapa seguinte foi escolhida uma filtragem no domínio da frequência. O tipo de filtro empregado foi o passa-banda, onde se seleciona uma parte das frequências contidas no traço. O sinal eletromagnético é confinado dentro de uma faixa de frequências totalmente dependentes do sinal emitido (250 MHz). O espectro de amplitude representativo da linha 49 é apresentado na Figura 3.10, onde se deve notar o deslocamento do pico (aproximadamente 180 MHz) em relação a frequência central do sinal emitido, o que ilustra o efeitos da Terra como filtro corta-altas.

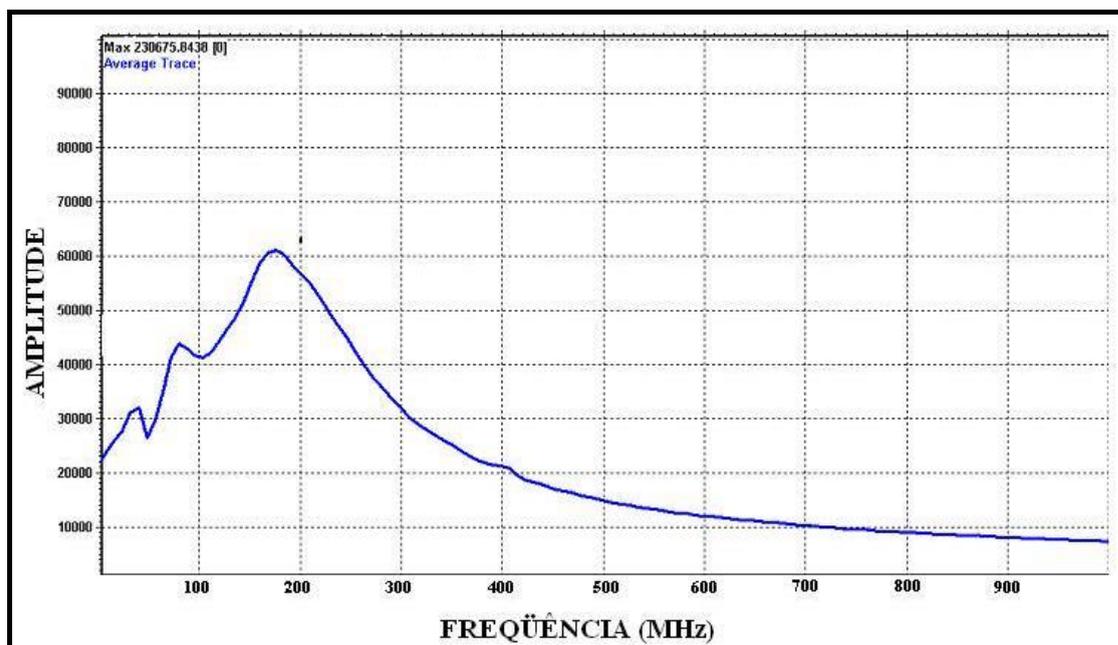


Figura 3.10: Espectro de amplitude da linha 49 obtida com a antena de 250 MHz blindada.

Após a análise no espectro de frequências do dado optou-se pela filtragem entre 150 e 350 Mhz, forma recomendada de filtragem de uma oitava acima e outra abaixo da frequência do sinal emitido. O resultado desta etapa está demonstrado na Figura 3.11, sendo, ainda, aplicada uma função aritmética multiplicadora para realçar as baixas amplitudes muito presentes nas seções.

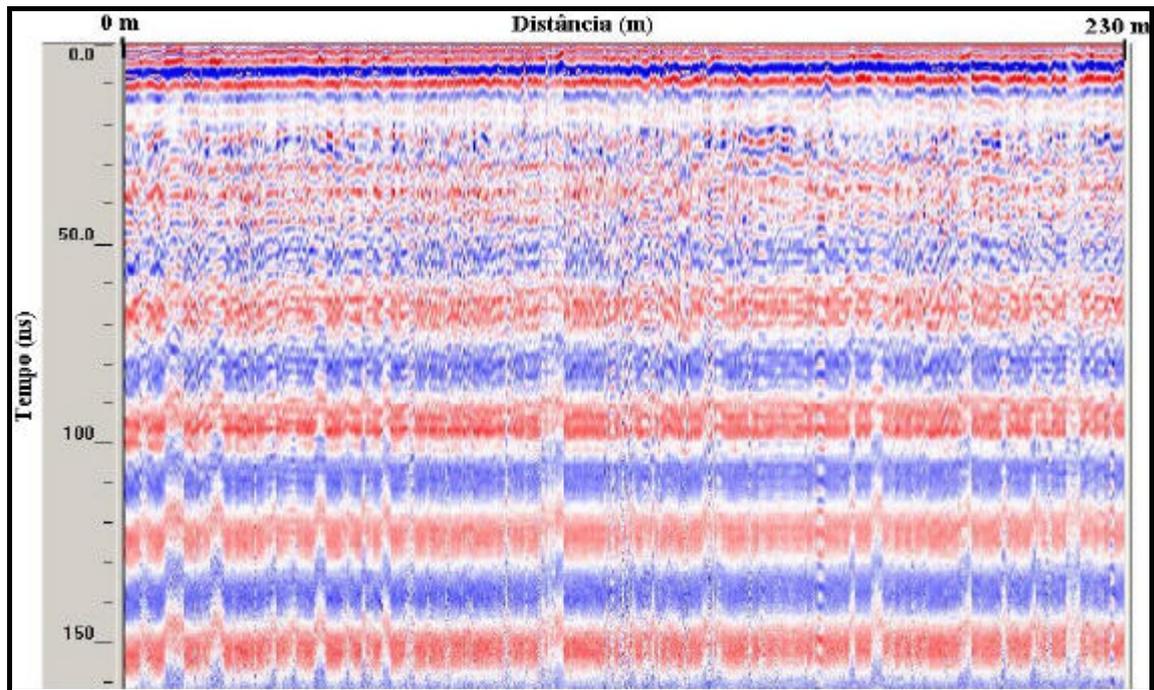


Figura 3.11: Pré-processamento, linha 49, referentes à etapa de AGC mais filtragem no domínio da frequência.

A etapa seguinte foi atuar com o operador de deconvolução eficaz na atenuação de eventos de *ringing* ou múltipla. A deconvolução é um processo de aumento de resolução temporal dos eventos por meio da uma compressão da forma de onda básica ou assinatura da fonte (*wavelet*). O pacote RADAN NT utiliza o método conhecido como Deconvolução Preditiva, no qual é contemplada tanto a melhora da resolução temporal quanto à redução do *ringing* de múltiplas, este último fundamental para eliminar a sobreposição do ruído ao sinal, que é uma característica fortemente presente no dado, devido ao nível de água presente no sistema permoporoso. Vários testes foram realizados a fim de se encontrar o valor ótimo entre comprimento do operador, distância de predição e a porcentagem de ruído branco, todos parâmetros do operador de deconvolução. Teoricamente, quanto maior o comprimento do operador, melhor é a resposta da deconvolução. Os seguintes valores foram especificados nesta fase: Comprimento do operador, 25 ns, distância de predição 5 ns, porcentagem de ruído branco de 10 %. O resultado desta etapa está exibido na Figura 3.12.

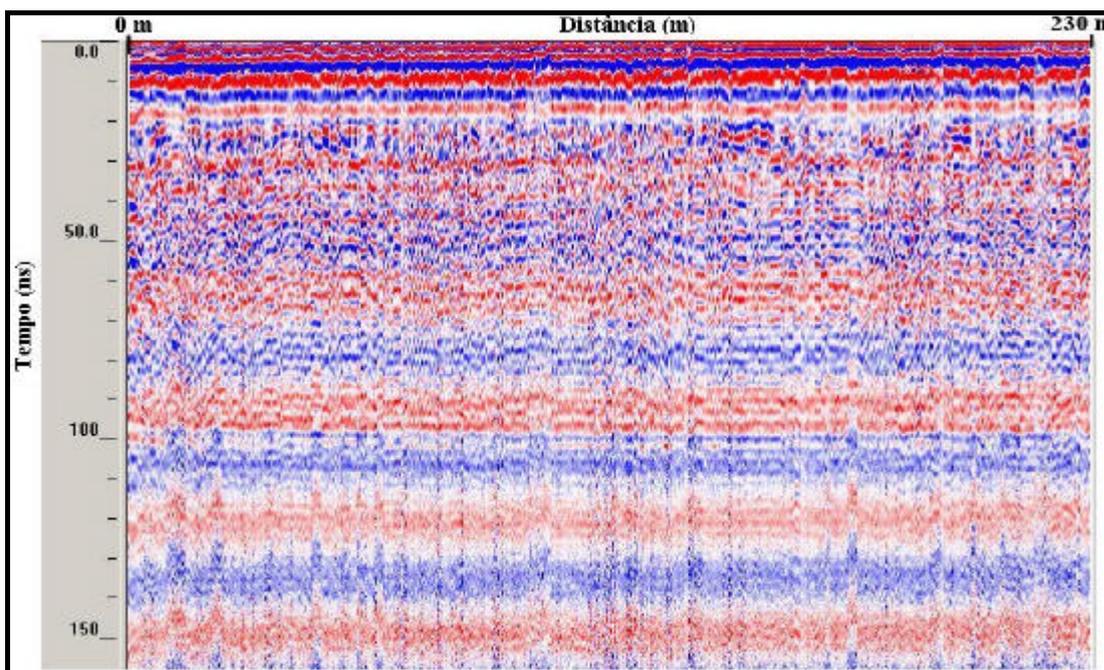


Figura 3.12: Pré-processamento, linha 49, após a deconvolução preditiva.

A persistência dos eventos de múltiplas aliada a baixa resolução dos eventos que se pretendem mapear (sinais) conduziram a uma nova filtragem, mesmo porque, o operador de deconvolução, por meio do *lag* de predição introduz novos ruídos indesejáveis. Assim, uma filtragem tipo *Boxcar*, entre 150 e 290 MHz, foi realizada, sendo este operador caracterizado por “janelar” uma parte do dado no domínio das frequências selecionadas, calcular a média e armazenar o resultado no centro da janela ativa, sendo o processo movimentado para a próxima amostra. Esta modalidade de filtro atribui pesos iguais às amostras do janelamento. Após a filtragem, novamente optou-se em realizar a deconvolução dos dados, sendo desta feita com os seguintes parâmetros: Comprimento do operador de 31 ns, *lag* de predição de 10 ns, e porcentagem ruído branco de 10%.

Na última etapa de processamento realizou-se filtragem no domínio espacial, empregando a opção de Filtragem de Resposta Impulsiva Infinita, que horizontalmente realizou um *stack* de 4 traços adjacentes procurando realçar a continuidade dos eventos horizontalmente. Finalmente, foi necessária uma correção na posição das linhas. Eleito um refletor guia, refrações da onda direta do solo, buscou-se normalizar este evento em todas as linhas. Correções de 1,5 a, mais raramente, 4 ns, foram impostas, sendo estes atrasos no sinal decorrentes, basicamente, dos efeitos de acoplamento da antena ao solo.

O resultado final da etapa de processamento está representado na Figura 3.13, onde já se podem notar alguns refletores contínuos ao longo da seção de radar.

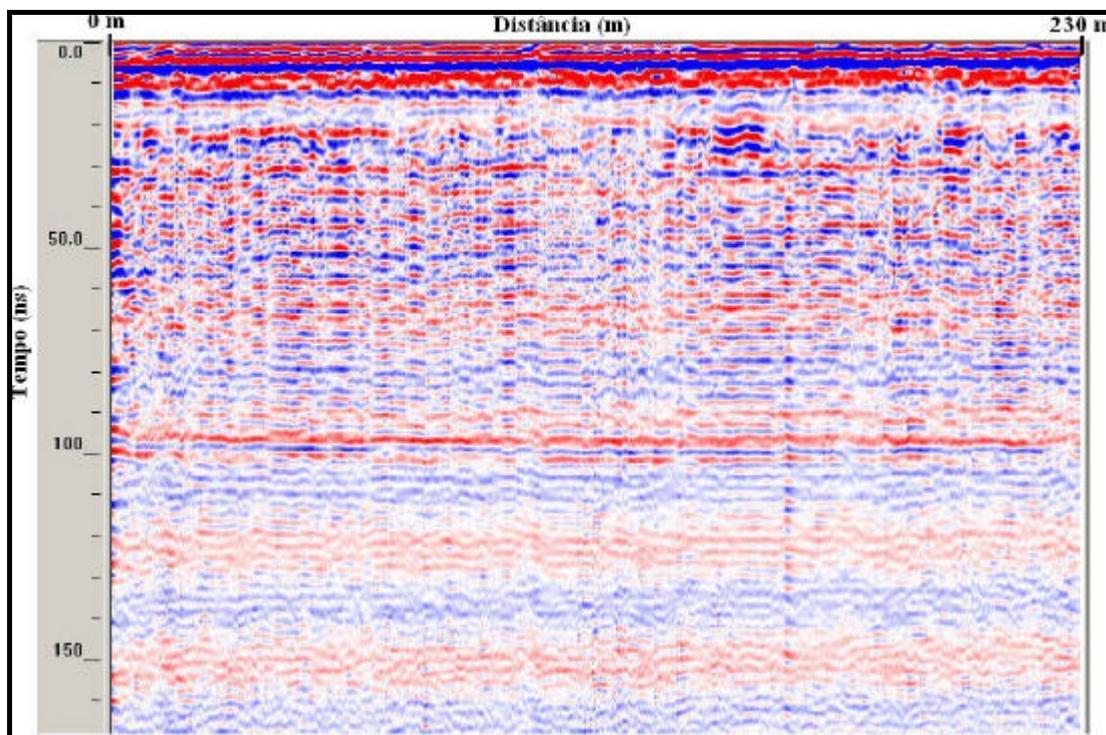


Figura 3.13: Seção resultante do processamento final, linha 49.

3.8. Interpretação dos dados

Esta etapa foi marcada pela correlação das informações dos poços com os refletores contínuos evidenciados nos dados de radar. Do conjunto de 34 poços de monitoramento realizados na área do Alagado 4, apenas os de número 42, 59, 60, 61, 67, 70, 71, 77 e 78 (Anexo 2), estão situados seja dentro do polígono de aquisição de GPR ou muito próximos. A descrição destes confere uma profundidade do contato entre o sistema de argilas e areias sotopostas variando entre 1,20 a 1,50 metros. Outra informação pertinente é relativa às cotas do nível de água deste sistema que varia entre 0,35 a até 1,10 metros, com média de 0,80 metros. Estes dois eventos, além de um terceiro que, pelas velocidades estimadas para o meio, deve representar o embasamento cristalino, são os principais eventos evidenciados na área. A Figura 3.14 mostra as suas posições na linha 49.

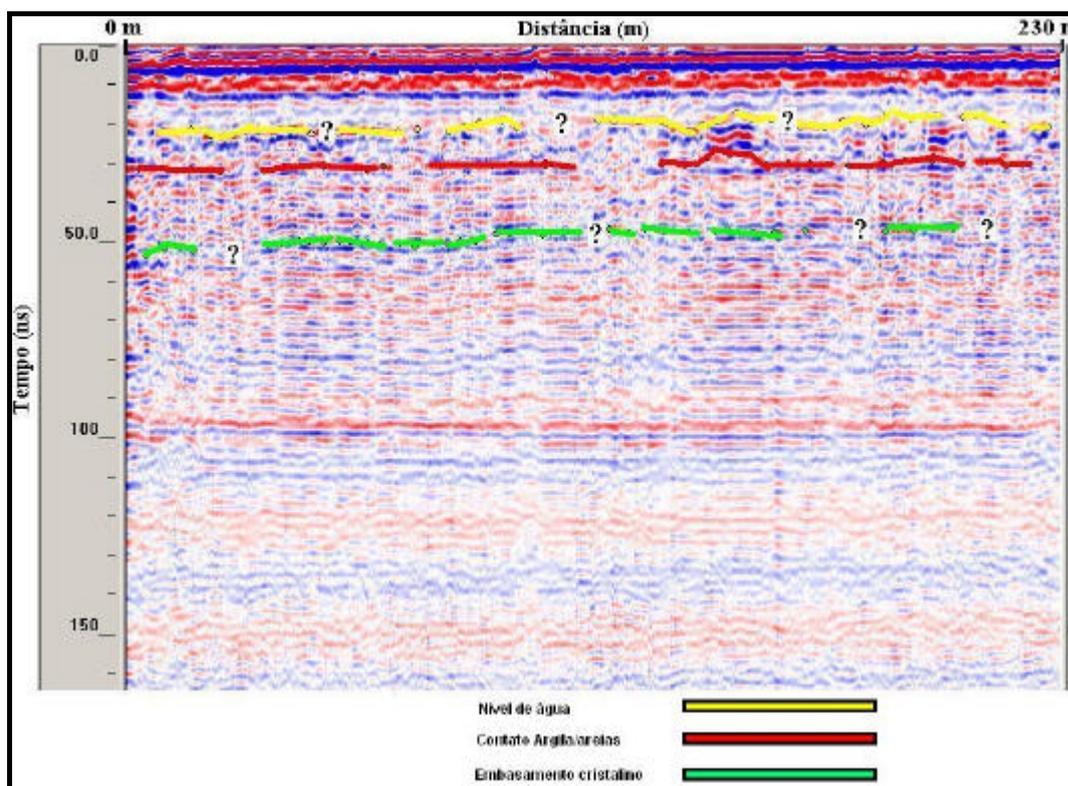


Figura 3.14: Seção interpretada referente à linha 49.

Os refletores evidenciados em amarelo e em verde relacionam-se ao nível de água e ao embasamento cristalino, respectivamente. Por sua vez, em vermelho, ao contato geológico entre argilas e areias. Tal assertiva se faz na correlação destes refletores com o poço de monitoramento número 78 e que, praticamente, é interceptado pela linha em questão. É conferida uma certa incerteza aos refletores relacionados ao nível de água e embasamento pois não se consegue interpretá-los de forma contínua em outras linhas, o mesmo não acontecendo com o contato argila/areia. A velocidade média estimada para o conjunto de corpos geológicos deste sistema foi de 0.082 m/ns, compatível com valores sugeridos para as argilas no manual do instrumento (RAMAC/GPR).

Pode-se destacar as distintas feições radar-estratigráficas, em boa parte das linhas, pelo contato definido em vermelho e que separam argilas de areias, Figura 3.15. Notar na região **A** refletores mais contínuos, sem estruturas aparentes, e com profunda atenuação do sinal eletromagnético a partir de 25 ns. Já em **B**, é possível notar algumas estruturas cruzadas,

destacadas em amarelo, características de corpos arenosos associados ao modelo deposicional estabelecido na área.

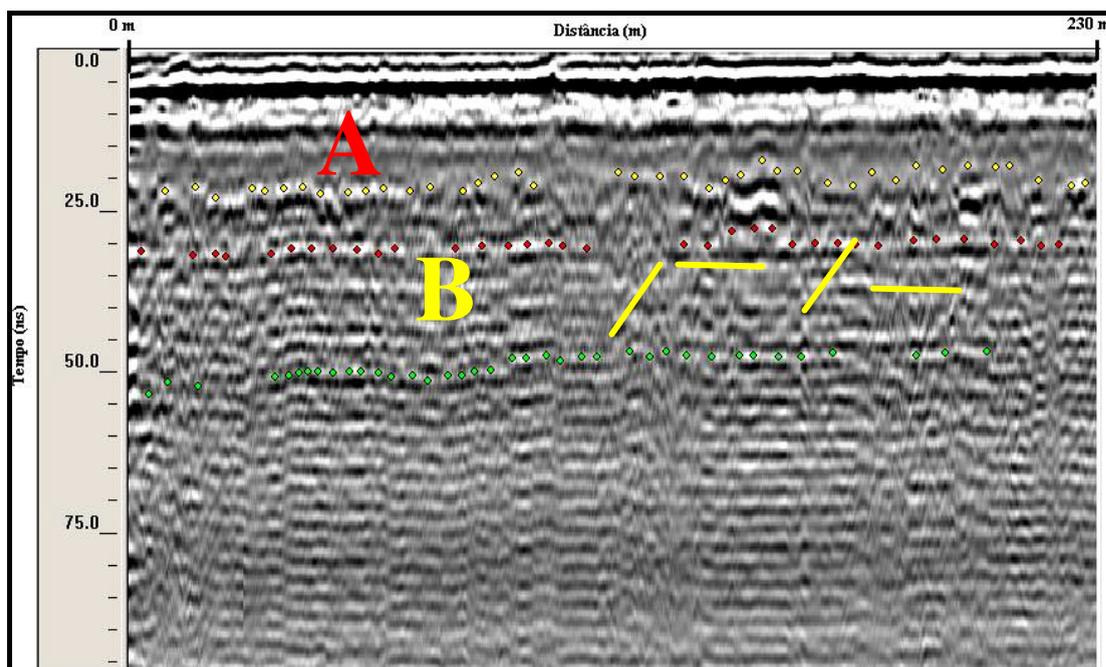


Figura 3.15: Feições radar estratigráficas diferenciadas na linha 49.

Para a construção da modelagem geológica e de fluxo subterrâneo pretendido no Capítulo 5, o limite entre os corpos geológicos de argila e areia, identificável em quase todas as linhas do levantamento 3D, é de fundamental importância, pois diferencia duas unidades de propriedades hidráulicas muito diferentes.

O resultado final da interpretação de 34 seções de radar está apresentado na Figura 3.16, que representa a interpolação de 780 pontos do atributo tempo duplo de trânsito (TDT) do contato entre os corpos geológicos de argila e areia na área do levantamento 3D.

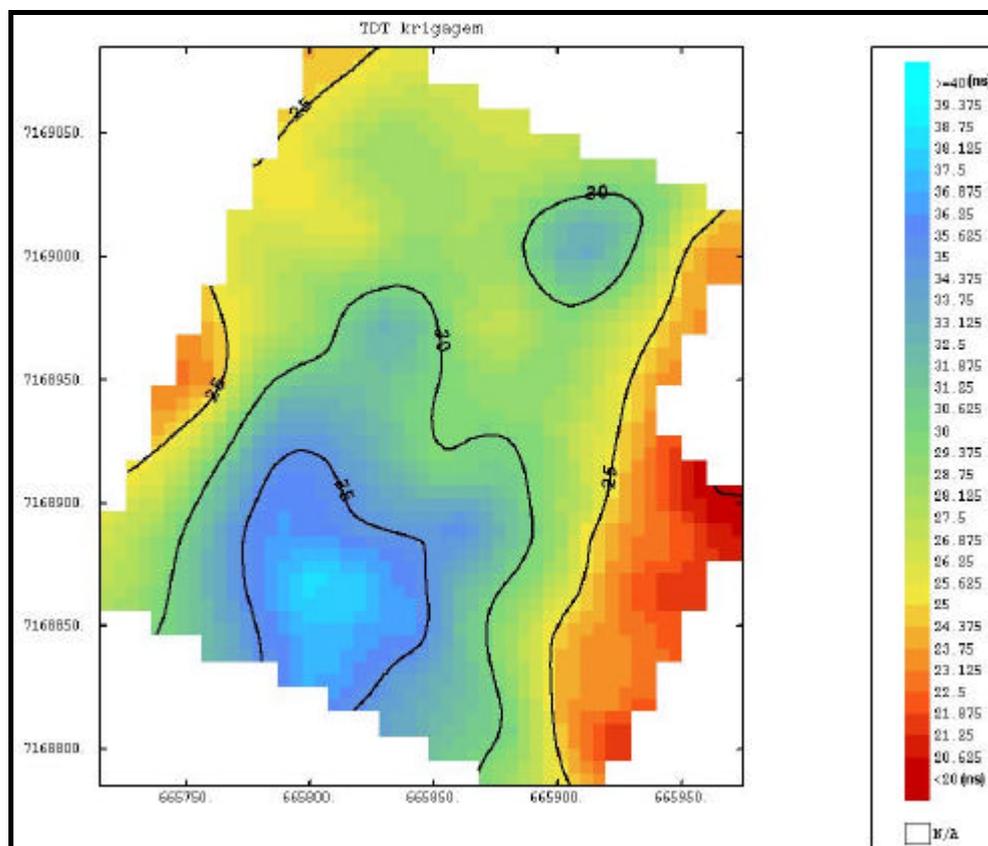


Figura 3.16: Mapa do tempo duplo de trânsito do contato entre os corpos geológicos de argila e areia da área do levantamento 3D de GPR.

Observa-se o mergulho do contato para o sul da área, uma importante informação que deve auxiliar na modelagem geoestatística pretendida no próximo capítulo.

Capítulo 4 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA

4.1. Introdução

Este capítulo demonstra a potencialidade de algumas técnicas da Geoestatística na construção do modelo geológico da área. A disponibilidade deste modelo é essencial para a próxima etapa do trabalho onde se deve modelar o fluxo e o transporte da contaminação ocorrida na área do Alagado 4.

A reinterpretação de 34 poços perfurados na área (Anexo 1), as análises de TPH, somados aos dados de natureza geofísica serviram como banco de dados para a modelagem estabelecida. Todo o conjunto de atividades é realizado utilizando-se o software *ISATIS*, da *Geovariances*.

Inicialmente, faz-se uma revisão conceitual das principais técnicas direta ou indiretamente empregadas (Krigagem da Média, Krigagem Simples, Krigagem Ordinária, Krigagem com Deriva Externa, Cokrigagem Colocalizada ou *Collocated Cokriging* e Simulação Sequencial Gaussiana); segue-se a modelagem dos dados, onde se descreve as etapas de trabalho, se faz a apresentação dos resultados e sua avaliação.

4.2. Aspectos teóricos da Krigagem

A krigagem é um procedimento geoestatístico avançado que gera uma superfície calculada de um conjunto disseminado de pontos com valores de Z . Envolve uma investigação interativa do comportamento espacial do fenômeno representado pelos valores de Z , antes do usuário selecionar o melhor método de estimação e gerar a superfície contínua (Kozciak et al, 1999).

O termo krigagem é derivado do nome de Daniel G. Krige, pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Matheron,

baseado nas observações de Krige, desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, em que assume que a variação no espaço, do fenômeno representado pelos valores de Z , é estatisticamente homogênea ao longo da superfície, isto é, os mesmos parâmetros estatísticos podem ser observados em todas as localizações na superfície. Uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, cujas variações têm continuidade aparente, mas não podem ser representadas por uma função matemática simples.

Na krigagem, o procedimento de interpolação é determinado através de pesos calculados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima, o que significa que, em média, a diferença entre os valores estimados e os verdadeiros para o mesmo ponto deve ser nula; e a variância mínima significa que estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos.

O que diferencia a krigagem de outros métodos é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (Kozciak et al, 1999).

4.3. Krigagem Simples (KS)

Trata-se de uma generalização da regressão linear. Assume-se que a média m seja conhecida e constante, isto é $E[Z(x)]$ é a mesma em qualquer ponto x do domínio. O estimador de Krigagem Simples é definido como (Corá, 1996):

$$Z_{KS}^*(x) = m + \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KS}(x)[Z(x_i) - m] \quad (4.1)$$

$$\text{ou, } Z_{KS}^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KS}(x)Z(x_i) + [1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KS}(x)]m \quad (4.2)$$

onde, λ_i^{KS} = ponderador de Krigagem Simples da amostra da variável Z no ponto i .

n = número de amostras selecionadas

x_i = locação de Z .

A média m não representa necessariamente a média das amostras, mas a esperança, $E[Z(x)]$. Esta média tem aqui um caráter global e não é, portanto, o resultado de uma estimativa.

O estimador de krigagem simples não estabelece restrições nos pesos das amostras, pois se tomando a esperança, tem-se:

$$\begin{aligned} E[Z_{KS}(x)] &= m + \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) E[Z(x_i) - m] \\ &= m + \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) E\{Z(x_i)\} - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) m \end{aligned} \quad (4.3)$$

(na condição estacionária, $E\{Z(x_i)\} = m, \forall x$), então:

$$= m + \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) m - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) m = m \quad (4.4)$$

o que representa o conhecimento prévio da média para a garantia de uma estimativa geoestatística não-tendenciosa, ou seja, com média do erro modelado igual a zero.

Apesar de não existir restrição na KS quanto aos pesos das amostras para a condição de não-viés, chama-se a atenção para o peso que recebe a média m em (4.2).

$$\lambda_m = 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KS} \quad (4.5)$$

o que significa que a soma dos pesos das amostras e da média é igual a 1.

Assim, os pesos das amostras são determinados sob a condição de que a variância do erro seja minimizada.

$$\sigma^2 = E\{[Z^*(x)_{KS} - Z(x)]^2\} = VarZ(x) - 2Cov(Z(x), Z^*(x)) + VarZ^*(x) \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = C(0) - 2\sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) \quad (4.7)$$

onde: $C(0)$ corresponde à covariância na origem ($var Z(x)$);

$C(x_i - x) = C_{i0}$ é a covariância entre a amostra e o ponto a estimar (x);

$C(x_i - x_j) = C_{ij}$ é a covariância entre as amostras.

Derivando-se (4.6) com relação ao termo de λ_i e igualando-se a zero, obtém-se o sistema de krigagem;

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^{KS}(x) C(x_i - x_j) = C(x_j - x), \quad i = 1, \dots, n \quad (4.8)$$

Em notação matricial, o sistema de krigagem simples pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{n0} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O valor da variância de estimativa minimizada ou variância da krigagem simples é dado por:

$$\sigma_{KS}^2 = Var\{Z_0 - Z_0^*\} = C(0) - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KS}(x) C(x_i - x) \quad (4.10)$$

O caráter altamente estacionário da krigagem simples não se adapta às tendências locais dos dados, uma vez que se baseia no valor da média m , assumida conhecida e constante em toda a área. Como esta condição pode não ser representativa localmente, recorre-se à krigagem da média pra o estabelecimento da média local.

4.4. Krigagem da Média (KM)

O valor médio de um conjunto de amostras pode ser calculado através da média aritmética se as amostras estiverem regularmente distribuídas ou através da krigagem da média que considera a configuração e, por conseguinte, a correlação espacial entre as mesmas. Desta forma, a estimativa da média m^* pode ser realizada através da combinação linear (Remacre, 1996):

$$m^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} Z(x_i) \quad (4.11)$$

onde, λ_i é o ponderador das amostras.

Para um erro esperado zero (não-viés), tem-se a seguinte restrição para a soma dos ponderadores:

$$\sum_i^n \lambda_i^{KM} = 1 \quad (4.12)$$

Como o interesse da krigagem é minimizar a variância do erro da estimativa:

$$\text{var}(m - m^*) = \text{var}[m^*] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i^{KM} \lambda_j^{KM} C(x_i - x_j) \quad (4.13)$$

onde $C(x_i - x_j)$ é a covariância estacionária entre as amostras i e j .

A restrição imposta em 4.12 adiciona uma equação a mais do que o número de incógnitas no sistema de equações da krigagem. Para que a minimização da variância do erro seja possível com esta restrição, adiciona-se uma constante denominada de parâmetro de Lagrange (μ). Assim:

$$\text{var}[m^*] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i^{KM} \lambda_j^{KM} C(x_i - x_j) - 2\mu_{KM} \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i^{KM} - 1 \right) \quad (4.14)$$

Derivando-se 4.14 em relação a λ_i^{KM} e igualando-se a zero, obtemos o sistema de krigagem da média:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu_{KM} = 0, & \forall j = 1, \dots, n \\ \sum_i \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (4.15)$$

Em notação matricial a equação 4.15 fica:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu_{KM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Por meio da resolução deste sistema de equações, obtêm-se os ponderadores que produzirão uma estimativa não tendenciosa e de variância mínima do erro. Observar que o multiplicador de Lagrange constitui-se na própria variância de estimativa da krigagem da média.

$$Var(m^*) = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) = \mu_{KM} \quad (4.17)$$

4.5. Krigagem Ordinária (KO)

A krigagem ordinária é o mais utilizado dos métodos de krigagem, e serve para estimar o valor em um ponto ou região onde o variograma é conhecido, utilizando-se os dados das vizinhanças do ponto a ser estimado (Wackernagel, 1995). Procura-se determinar um valor em uma determinada posição x_0 utilizando-se n dados vizinhos $Z(x_i)$ através de uma combinação linear dos ponderadores λ_i^{KO} .

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KO}(x_0) Z(x_i) \quad (4.18)$$

O sistema de krigagem ordinária é semelhante ao da krigagem da média, exceto ao pela existência do ponto a estimar, ausente na krigagem da média. O sistema de equações da KO é então representado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KO} C(x_i - x_j) - \mu_{KO} = C(x_i - x), \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KO} = 1 \end{array} \right. \quad (4.19)$$

Em notação matricial, o sistema de krigagem ordinária (4.18) fica:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^{KO} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n^{KO} \\ -\mu_{KO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

A variância da krigagem ordinária é igual a:

$$\sigma_{KO}^2 = C(0) - \sum_{j=1}^n \lambda_j^{KO} C(x_i - x_j) + \mu, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.21)$$

Entre as variâncias de estimativa dos três tipos de krigagem apresentados, tem-se a seguinte relação (Remacre, 1996):

$$\sigma_{KO}^2 = \sigma_{KS}^2 + (\lambda_m)^2 \sigma_{KM}^2 \quad (4.22)$$

Como se observa, a variância da krigagem ordinária é fortemente dependente do conhecimento da média. Ao usar um valor conhecido m por sua estimativa m^* , a krigagem ordinária paga um preço representado pelo parâmetro de Lagrange $\mu (\mu_{KO} = \lambda_m^2 \mu_{KM})$.

4.6. Krigagem com Deriva Externa (KDE)

Quando duas variáveis medidas de forma diferente refletem o mesmo fenômeno e sendo a variável primária exata, porém conhecida em poucas posições, enquanto a variável secundária não pode ser medida com muita exatidão, mas pode estar disponível em um grande domínio espacial, pode-se usar a variável secundária para compor a deriva (Corá, 1996).

$$[Z_1(x)]_{Ext.Drift}^* - m_1 = \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j [z_1(x_j) - m_1] \quad (4.23)$$

O sistema de equações apresenta as duas restrições requeridas para a condição de não-viés, a primeira representando a restrição da krigagem ordinária e a segunda, a que permite a especificação deriva externa Z_2 :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j C_1(x_j - x_i) + \mu_1 + \mu_2 z_2(x_i) = C_1(x - x_i), & i = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j = 1 \\ \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j z_2(x_j) = z_2(x) \end{cases} \quad (4.24)$$

Em termos matriciais, consideramos uma configuração com três pontos de dados para a variável principal:

$$\begin{bmatrix} C_{11}^{Z_1 Z_1} & C_{12}^{Z_1 Z_1} & C_{13}^{Z_1 Z_1} & 1 & z_2^1 \\ C_{21}^{Z_1 Z_1} & C_{22}^{Z_1 Z_1} & C_{23}^{Z_1 Z_1} & 1 & z_2^2 \\ C_{31}^{Z_1 Z_1} & C_{32}^{Z_1 Z_1} & C_{33}^{Z_1 Z_1} & 1 & z_2^3 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ z_2^1 & z_2^2 & z_2^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10}^{z_2^1} \\ C_{20}^{z_2^1} \\ C_{30}^{z_2^1} \\ 1 \\ z_2^0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

onde:

$$C_{11}^{Z_1Z_1}, C_{22}^{Z_1Z_1} \text{ e } C_{33}^{Z_1Z_1} = \text{covariância de } Z_1, C_1(0);$$

$C_{12}^{Z_1Z_1}, C_{13}^{Z_1Z_1}, C_{21}^{Z_1Z_1}, C_{31}^{Z_1Z_1}, C_{32}^{Z_1Z_1} \text{ e } C_{23}^{Z_1Z_1} =$ covariâncias de Z_1 para as distâncias entre as amostras, $C_1(h)$;

$$C_{10}^{Z_1Z_1}, C_{20}^{Z_1Z_1} \text{ e } C_{30}^{Z_1Z_1} = \text{covariâncias de } Z_1 \text{ na distância entre as amostras e o ponto a estimar};$$

$$z_2^1, z_2^2 \text{ e } z_2^3 = \text{valores de } Z_2 \text{ nas posições de } Z_1;$$

$$z_2^0 = \text{valor de } Z_2 \text{ no ponto a estimar, e}$$

$$\mu_1 \text{ e } \mu_2 = \text{parâmetros de Lagrange.}$$

Portanto, a krigagem com deriva externa não requer a inferência da covariância de Z_2 , $C_2(h)$, e da covariância cruzada, $C_{12}(h)$, ou seja, não se utiliza da relação estatística entre Z_1 e Z_2 , somente da relação espacial geométrica. Mas necessita, como dado de entrada, dos valores da variável secundária no ponto a estimar e na posição do dado primário.

Este sistema também não leva em consideração a magnitude de Z_2 , somente da forma da superfície da tendência sugerida pelos dados externos nas n locações dos dados primários. Ou seja, é assumido que a variabilidade espacial da variável secundária $Z_2(x)$ está relacionada linearmente às tendências locais da variável primária $Z_1(x)$ – hipótese básica, mas que não possui condições de ser validada no processo de estimativa.

4.7. Cokrigagem Colocalizada (*Collocated Cokriging*)

No universo da cokrigagem, o sistema do cokrigagem colocalizada é apresentado como uma solução mais simples, pois consiste em reter a cada locação a ser estimada somente a variável secundária (Xu et al., 1992).

Esta técnica é uma simplificação da cokrigagem, reduzindo o esforço de cálculo do sistema de cokrigagem. Considerando apenas uma variável secundária, o estimador de cokrigagem colocalizada pode ser escrito como:

$$z_1^*(x) - m_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i^{(1)} [z_1(x_i) - m_1] + \lambda^{(2)} [z_2(x) - m_2] \quad (4.26)$$

onde, $m_1 = E\{Z_1(x)\}$ e $m_2 = E\{Z_2(x)\}$ são as duas médias estacionárias;

O sistema de equações da cokrigagem colocalizada é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j^{(1)} C_1(x_j - x_i) + \lambda^{(2)} C_{21}(x - x_i) = C_1(x - x_i), \quad \forall i = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j^{(1)} C_{12}(x_j - x) + \lambda^{(2)} C_2(0) = C_{12}(0) \end{array} \right. \quad (4.27)$$

onde, $C_1(h), C_2(h), C_{12}(h) = C_{21}(h)$ são as autocovariâncias e as covariâncias cruzadas das variáveis primária e secundária, respectivamente. O sistema de equações não utiliza a covariância direta da variável secundária, mas necessita da inferência e modelagem da covariância cruzada $C_{12}(h)$. Uma aproximação para $C_{12}(h)$ é utilizar o modelo markoviano de correionalização. Considerando a hipótese markoviana:

$$E\{Z_2(x) | Z_1(x), Z_1(x+h)\} = E\{Z_2(x) | Z_1(x)\}, \quad \forall Z_1(x+h) \quad (4.28)$$

Xu et al (1992) demonstraram que a covariância cruzada pode ser adequadamente expressa como:

$$C_{12}(h) = \frac{C_{12}(0)}{C_{11}(0)} C_{11}(h), \quad \forall h \quad (4.29)$$

$$\text{ou } \rho_{12}(h) = \rho_{12}(0) \rho_1(h), \quad \forall h$$

onde $\rho_1(h) = C_1(h)/C_1(0)$ corresponde ao correlograma da variável principal e $\rho_{12}(h) = C_{12}(h)/\sqrt{C_1(0) \cdot C_2(0)}$, ao correlograma cruzado entre as duas variáveis, e ao tradicional (colocalizado) coeficiente de correlação entre as variáveis $Z_1(x)$ e $Z_2(x)$.

O modelo de Markov estabelece um modelo de covariância cruzada a partir da covariância direta da variável primária, $C_1(h)$, podendo ser conferido pelo gráfico das covariâncias experimentais diretas e cruzadas, Xu et al. (1992):

$$\frac{C_{12}(h)}{C_{12}(0)} \cong \frac{C_1(h)}{C_1(0)}, \quad \forall h \quad (4.30)$$

O estimador da cokrigagem colocalizada no sistema de equações pode ser escrito como:

$$\frac{z_1^*(x) - m_1}{\sigma_1} = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i^{(1)} \left[\frac{z_1^*(x_i) - m_1}{\sigma_1} \right] + \lambda^{(2)} \left[\frac{z_2^*(x) - m_2}{\sigma_2} \right] \quad (4.31)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j^{(1)} \rho_1(x_j - x_i) + \lambda^{(2)} \rho_{12}(0) \rho_1(x - x_i) = \rho_1(x - x_i) & \forall i = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j^{(1)} \rho_{12}(0) \rho_1(x_j - x) + \lambda^{(2)}(x) = \rho_{12}(0) \end{cases} \quad (4.32)$$

onde $\sigma_1^2 = Var\{Z_1(x)\}$ e $\sigma_2^2 = Var\{Z_2(x)\}$ são as duas variâncias estacionárias.

O algoritmo de cokrigagem colocalizada é fácil de ser implementado, porém requer, tal como a krigagem com deriva externa, que a variável secundária exista nos pontos da malha onde se quer estimar a variável primária.

Rivoirard (2001) realiza uma minuciosa revisão do algoritmo de *Collocated Cokriging*. O autor procura explorar o algoritmo buscando extrair o melhor resultado, ou seja, aquele que resultem na menor perda das informações das variáveis. Alega o autor que a Cokrigagem multicolocalizada (a variável auxiliar é apenas utilizada nos pontos onde haja a disponibilidade da informação primária) trata a estimativa como uma combinação entre a variável auxiliar e um

resíduo sem correlação entre as variáveis. A estimativa desta porção residual é realizada por meio da krigagem que permite obter a correlação cruzada entre as variáveis. Em particular, a *Collocated Cokriging* corresponde a um caso particular onde o resíduo corresponde a um efeito pepita puro, podendo o ponto a ser estimado, ser obtido por meio de uma simples regressão.

4.8. Modelagem dos dados do Alagado 4.

A primeira fase dos trabalhos envolveu-se com a modelagem das camadas individualizadas no Capítulo 2 (Anexo 1). Reunidas às informações de reinterpretação das camadas e os dados de coordenadas e altimetria dos poços criou-se o arquivo de entrada para o programa *Isatis*. São analisados 34 poços, que se distribuem de forma relativamente uniforme na área. A Tabela 4.1 apresenta os principais resultados da estatística univariada dos dados de entrada.

Tabela 4.1: Tabela estatística dos valores utilizados na modelagem geológica.

Conjunto de dados	Número de amostras	Mínimo	Máximo	Média	Variância
Topo da camada 1(m)	34	869,73	872,48	870,35	0,29
Topo da camada 2 (m)	34	869,63	872,38	870,21	0,30
Topo da camada 3 (m)	34	868,47	871,88	869,82	0,45
Topo da camada 4 (m)	34	867,85	870,48	868,98	0,26
Base da camada 4 (m)	34	867,23	870,48	867,89	0,41
Contaminação TPH (ppm)	30	206	9351	1157,70	3144198.3

Para ilustrar melhor estes dados seus histogramas de frequências estão representados na Figura 4.1.

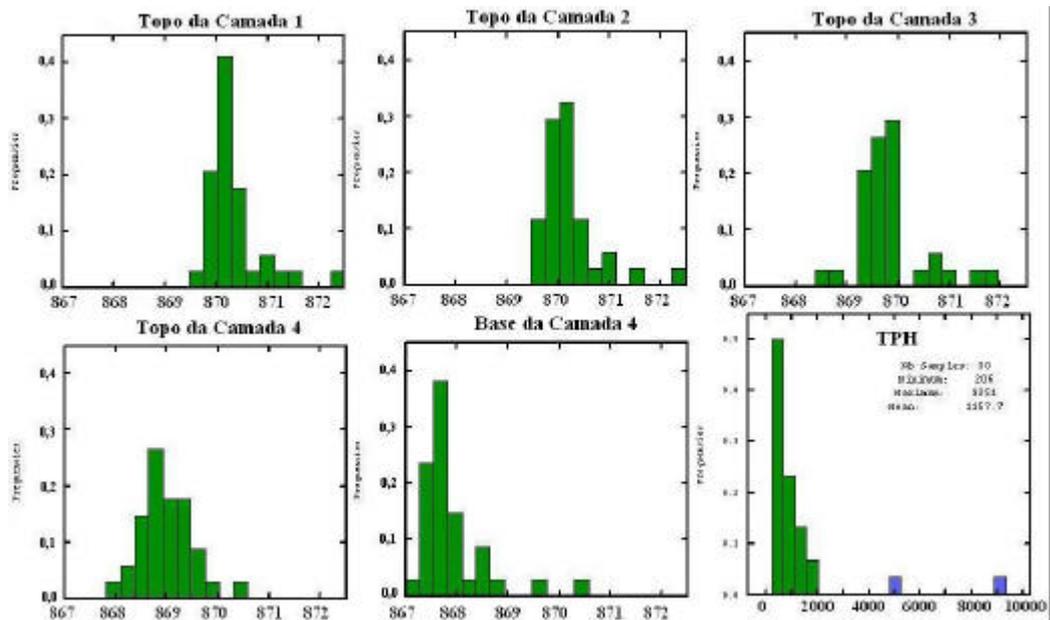


Figura 4.1: Histogramas de frequência de distribuição das variáveis estudadas.

Uma análise preliminar dos dados aponta para a alta variância da variável TPH, o que denota um fenômeno de distribuição bastante errática no terreno, e que não esse encontra uma explicação razoável da razão deste fato. Para a seqüência dos trabalhos, manter-se-á os dados conforme constam no relatório dos técnicos do Instituto de Geociências da UFRGS (Neto & Caicedo, 2000).

A etapa seguinte é a construção da malha (*grid*) onde o programa realizará as interpolações. Neste estudo optou-se por uma malha regular com 57 blocos na direção X (Leste) e 42 blocos na direção Y (Norte). Cada bloco tem dimensão de 10 x 10 metros sendo a escolha das dimensões das celas compatíveis com o grau de detalhamento que se quer dos modelos de estimativa, sua representatividade espacial, além da compatibilidade de interação do modelo(s) geológico(s) construídos com o programa de modelagem de fluxo de água subterrânea.

A área modelada representa um polígono de quase 0,24 km², e como já relatado, é o local onde houve a maior extensão horizontal do derramamento. A Figura 4.2 situa os pontos amostrais (poços de monitoramento) e a área modelada.

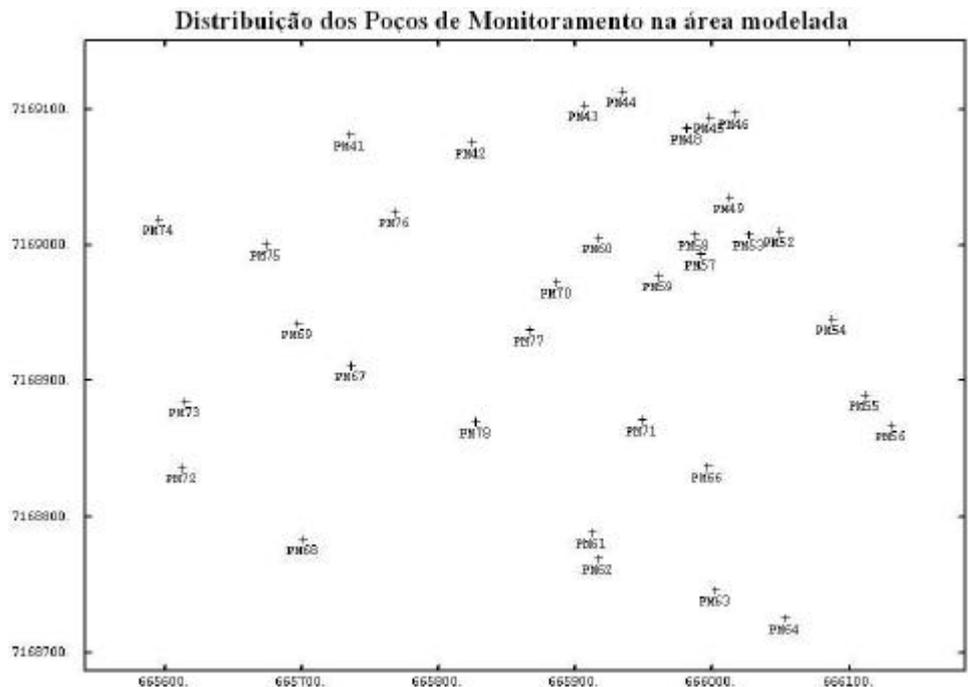


Figura 4.2: Mapa base de distribuição dos poços de monitoramento na área do Alagado 4.

A seguir é realizada a análise estrutural dos dados, onde se busca através da geoestatística extrair da aparente desordem dos dados, gráficos que caracterizem a estrutura espacial da(s) variável(eis) regionalizada(s) em estudo, e que representem a variabilidade dos dados ao longo da área, além de medir as correlações existentes entre os valores de dois pontos. A técnica mais comum de análise estrutural é a variografia, sendo a ferramenta básica o variograma.

A partir do variograma obtido dos pontos amostrais ou conhecidos, busca-se modelar ou ajustar variogramas teóricos, que expressem modelos definidos por funções matemáticas. As informações fornecidas pelo variograma, bem como a tentativa de se ajustar um modelo teórico a partir do variograma experimental, perfazem os objetivos da análise estrutural.

Assim, são ajustados modelos de variogramas, sem uma direção preferencial, para as 6 variáveis propostas no estudo desta dissertação. Os resultados desta fase, mostrados de forma gráfica, estão representados na Figura 4.3.

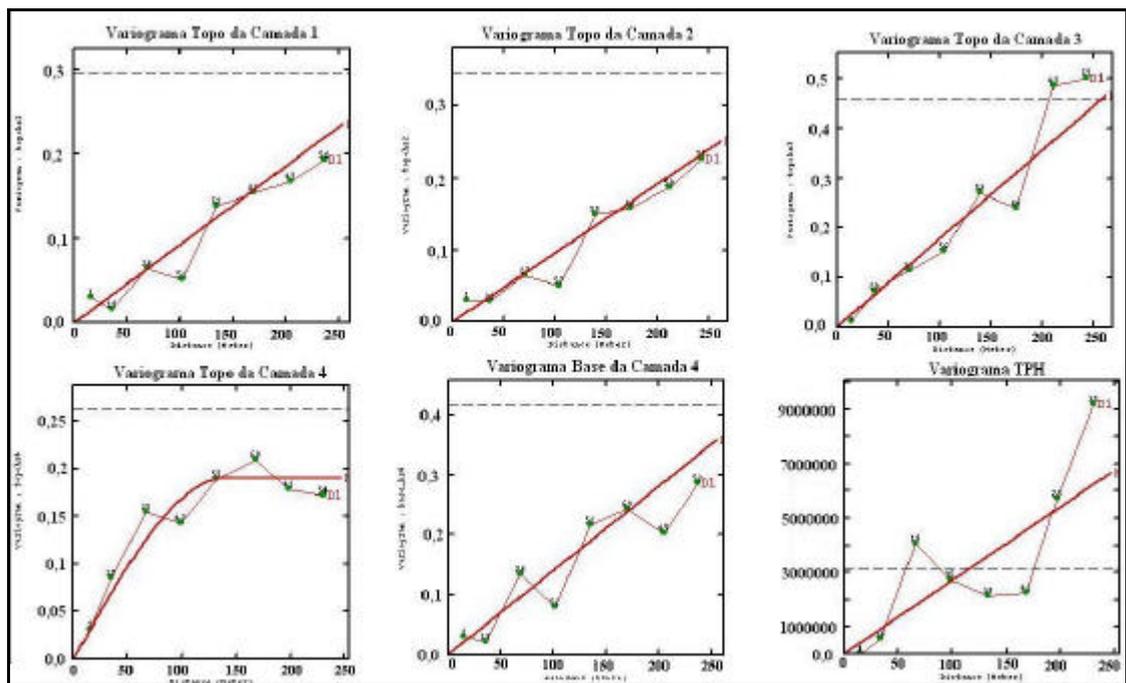


Figura 4.3: Variogramas experimentais e ajustados das variáveis estudadas.

Destaque para as 5 variáveis onde são ajustados modelos teóricos lineares, definidos nos casos onde o variograma se caracteriza pela ausência de patamar. Deve-se destacar a presença de tendências (*drifts*) nos 5 casos acima citados (Tops das Camadas 1, 2, 3, Base da Camada 4 e TPH), onde os variogramas possuem um comportamento sempre crescente, denotando que, ao se comparar às amostras cada vez mais distantes, as variações ou discrepâncias entre as mesmas é cada vez maior. Estas tendências representam um fenômeno não estacionário. Notar a variância dos dados denotada pela linha tracejada.

Para a variável Topo da Camada 4 conseguiu-se estabelecer um patamar constante para a correlação das amostras, estabilização da função $\gamma(h)$. Assim, fica ajustado um variograma esférico, bastante empregado em modelagens geológicas, e que apresenta um comportamento linear até a distância de 1/3 do alcance.

Os resultados numéricos desta modelagem estão representados na Tabela 4.2.

.Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na modelagem dos variogramas.

Estrutura			
Conjunto de dados	Modelo	Alcance(m)	Patamar
Topo da camada 1	Linear	140,0	0,13
Topo da camada 2	Linear	125,0	0,12
Topo da camada 3	Linear	135,0	0,24
Topo da camada 4	Esférico	140,0	0,19
Base da camada 4	Linear	135,0	0,19
Contaminação TPH	Linear	170,0	4596509

Após a modelagem dos variogramas, segue-se a definição dos parâmetros de vizinhança a serem aplicados na área de estudo. Esta pesquisa estabelece alguns parâmetros que serão usados no algoritmo de krigagem, segundo os diferentes padrões de variabilidade espacial que ocorrem nas direções de maior ou menor continuidade do fenômeno geológico em estudo.

O primeiro critério é definir uma vizinhança móvel, ao contrário de única, permitindo à modelagem buscar as anisotropias do sistema a modelar. Para a pesquisa de vizinhança, praticamente todos os parâmetros definidos são iguais a todas variáveis. Os números de setores angulares, mínimos e ótimos de amostras e rotação são critérios comuns, sendo definidos os valores de 1, 1, 10 e sem rotação, respectivamente. Apenas o raio de busca é diferenciado entre as variáveis. Geralmente, o critério que se adota para a definição do raio de vizinhança é que seja aproximadamente 50% do valor do alcance definido no variograma. Porém, para se evitar problemas de distorções locais causados pela ausência de amostras, são definidos raios de vizinhanças próximos aos alcances modelados. A Tabela 4.3 mostra os valores de raio de vizinhanças definidos para as diferentes variáveis.

Tabela 4.3: Valores dos raios de vizinhanças definidos.

Vizinhança		
Conjunto de dados	Raio definido em X (m)	Raio definido em Y (m)
Topo das Camadas 1,2,3 e 4	150,0	150,0
Base da camada 4	150,0	150,0
Contaminação TPH	200,0	200,0

A Figura 4.4 exemplifica o raio de investigação e os pesos dos ponderadores estabelecidos na modelagem do Topo da Camada 1.

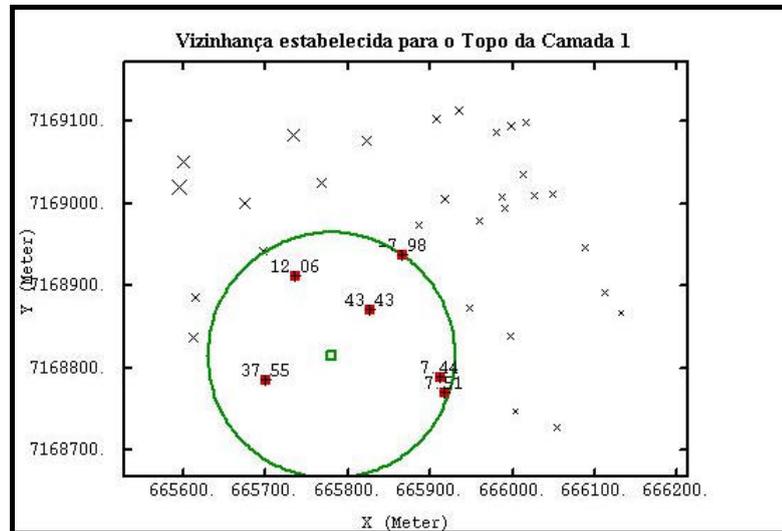


Figura 4.4: Exemplo do raio de pesquisa estabelecido na modelagem do Topo da Camada 1.

Em seguida, é aplicada a técnica da validação cruzada, onde se analisa a compatibilidade dos modelos variográficos e também dos parâmetros de vizinhança estabelecidos com os valores amostrais. Este procedimento funciona como uma pré-krigagem, onde cada valor amostral fica oculto inicialmente e é estimado por krigagem a partir dos valores já estabelecidos das amostras vizinhas (Srivastava & Isaaks, 1989). A partir daí, os pontos reais (Z) e estimados (Z^*) são confrontados, gerando-se um erro atribuído ao processo usado na estimativa, através da diferença entre eles ($Z-Z^*$). A análise quantitativa dos erros cometidos ponto a ponto é feita através dos diagramas de dispersão de Z versus Z^* (valor verdadeiro versus valor estimado), do diagrama de dispersão dos erros padronizados $(Z-Z^*)/S^*$ versus Z^* , onde S^* representa o desvio padrão, e do histograma de distribuição desses erros padronizados. Pontos amostrais discriminados como eventuais anômalos, conhecidos como *outliers*, são representados de forma diferenciada no mapa base dos pontos.

Essa técnica, além de quantificar os erros cometidos no processo de estimativa escolhido, fornece elementos para se fazer uma calibração dos modelos. Assim, parâmetros geoestatísticos

(variograma e vizinhança) podem ser reformulados, caso os valores anômalos tenham uma frequência de média a alta e os erros comprovem a falta de resolução da ferramenta em determinada área.

As Figuras 4.5 a 4.8 ilustram exemplos de validações cruzadas realizadas para os Topos das Camadas 1, 2 e 4 além da indicatriz de contaminação TPH. Apresenta-se em (A) o mapa base dos dados, destaque para os pontos anômalos representados diferentemente dos pontos amostrais, em (B) o diagrama de dispersão de Z versus Z^* , em (C) o histograma dos erros padronizados e em (D) o diagrama de dispersão dos erros, onde S^* representa o desvio padrão.

É importante notar a dispersão, proximidade ou afastamento em torno da primeira bissetriz, no gráfico de Z versus Z^* (B), sendo definido, em todas as análises, o limite ou intervalo de confiança entre $-2,5$ e $2,5$ (5%), ou seja, para valores de afastamento superior aos limites estabelecidos na distribuição normal dos dados (C) são representados como anômalos.

Praticamente, na totalidade das validações efetuadas apenas um ou dois pontos, ou seja, 3 a 6% dos dados, apresentavam dispersões anômalas. Analisando todas as validações dos Topos de Camada nota-se que o ponto localizado no extremo noroeste da área é responsável pelas dispersões em todas as análises. Quanto à análise da indicatriz TPH, os pontos identificados como anômalos são relacionados aos valores de máximo da variável.

Os pontos anômalos se justificam, pois os mesmos se referem aos valores extremos das amostras. O algoritmo trabalha com um pré-estabelecido raio de busca, e quando uma determinada amostra com valor muito alto se localiza em uma vizinhança de valores baixos, o ponto é estimado a partir da média dos valores que estão ao seu redor, ocorrendo uma suavização nesse local, justificando assim o aparecimento desses valores. Assim como ocorre com os valores máximos, ocorrem com os mínimos. Outra questão a considerar, são os pontos localizados nas áreas limítrofes, pois, dependendo do caso, o raio de busca não abrange um número suficiente de amostras para uma boa estimativa.

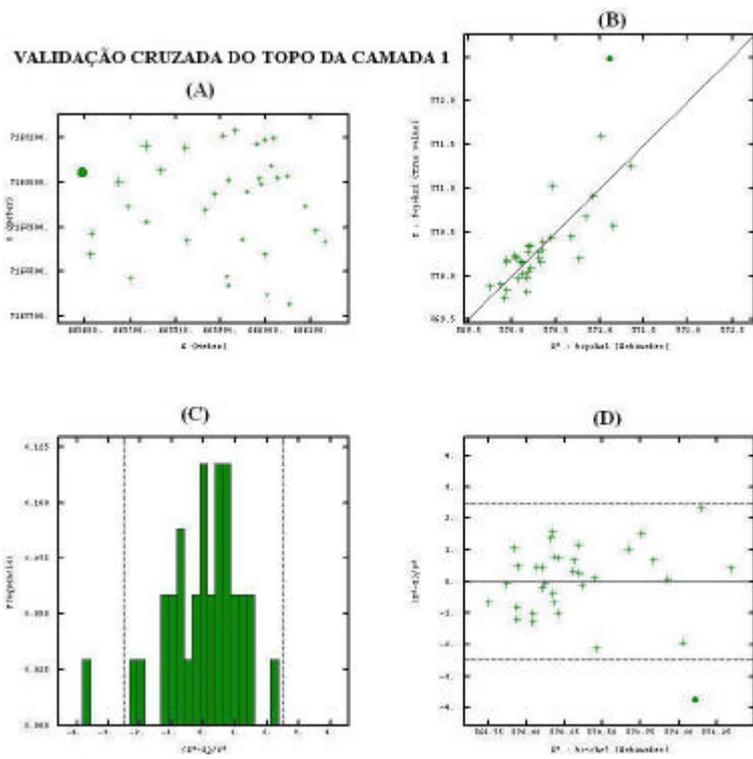


Figura 4.5: Validação cruzada do Topo da Camada 1

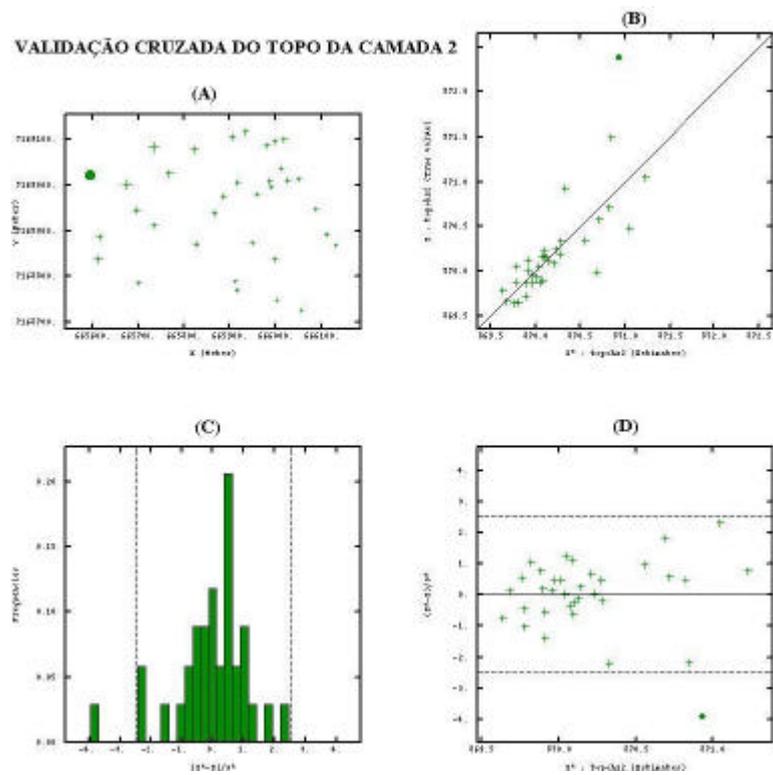


Figura 4.6: Validação cruzada do Topo da Camada 2

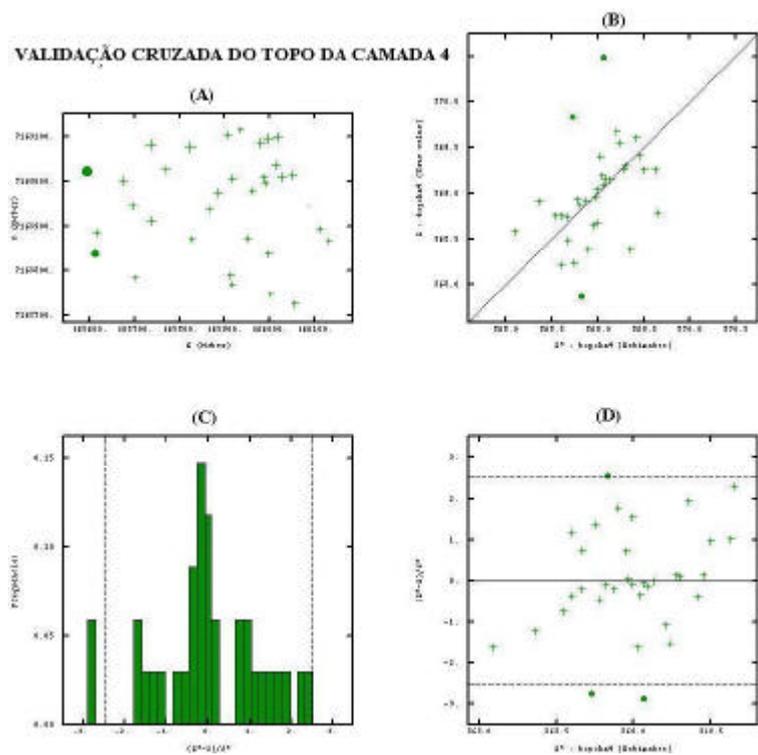


Figura 4.7: Validação cruzada do Topo da Camada 4

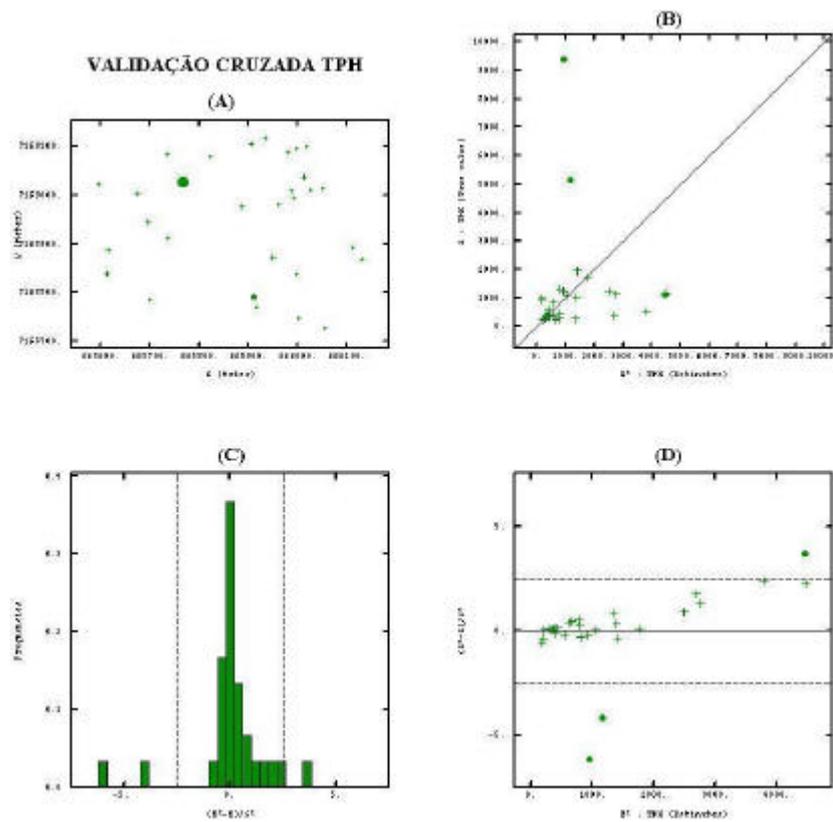


Figura 4.8: Validação cruzada da indicatriz TPH

Finalizada a etapa da validação cruzada, realizou-se então a krigagem propriamente dita. A escolha pela técnica de krigagem ordinária recaiu no fato do algoritmo estimar a média a partir de uma vizinhança móvel, o que permite trabalhar com um banco de dados não estacionários ou de baixa homogeneidade entre as amostras.

Os resultados finais das krigagens estão apresentados nos vários mapas mostrados na Figura 4.9 e nos resultados da Tabela 4.4, que resume e compara os dados de entrada com os resultados finais obtidos.

Tabela 4.4: Quadro estatístico comparativo dos valores dos dados de entrada e dos resultados da modelagem geoestatística (krigagem ordinária).

Conjunto de dados	Número de amostras	Mínimo	Máximo	Média	Variância
Topo da camada 1 (m)	34	869,73	872,48	870,35	0,29
Topo da camada 1 krigagem	2394	869,76	872,39	870,37	0,26
Topo da camada 2 (m)	34	869,63	872,38	870,21	0,30
Topo da camada 2 krigagem	2394	869,62	872,29	870,23	0,27
Topo da camada 3 (m)	34	868,47	871,88	869,82	0,45
Topo da camada 3 krigagem	2394	868,53	871,78	869,85	0,41
Topo da camada 4 (m)	34	867,85	870,48	868,98	0,26
Topo da camada 4 krigagem	2394	867,85	870,47	868,93	0,16
Base da camada 4 (m)	34	867,23	870,48	867,89	0,41
Base da camada 4 krigagem	2394	867,23	870,48	867,92	0,39
Contaminação TPH (ppm)	30	206	9351	1157,70	3144198,3
Contaminação TPH krigagem	2394	97	8802	1211,09	1541689,9

Destaques aos efeitos de suavização dos dados característicos do estimador de krigagem, e a grande variação na variância dos dados de TPH, fruto de dois valores extremos presentes no conjunto dos dados. Contudo, de uma maneira geral, valores de mínimos, máximos e média são honrados.

No caso do Topo da Camada 1, que representa a topografia do terreno da área do Alagado 4, e cujos mapas estavam disponíveis, foi introduzido um ponto no conjunto dos dados de entrada

apenas para controlar as tendências de superestimativas ocorrentes na porção NO da área. Assim, é possível comparar as superfícies (krigagem ordinária versus mapa topográfico) e constatar que o método geoestatístico honrou os dados de entrada.

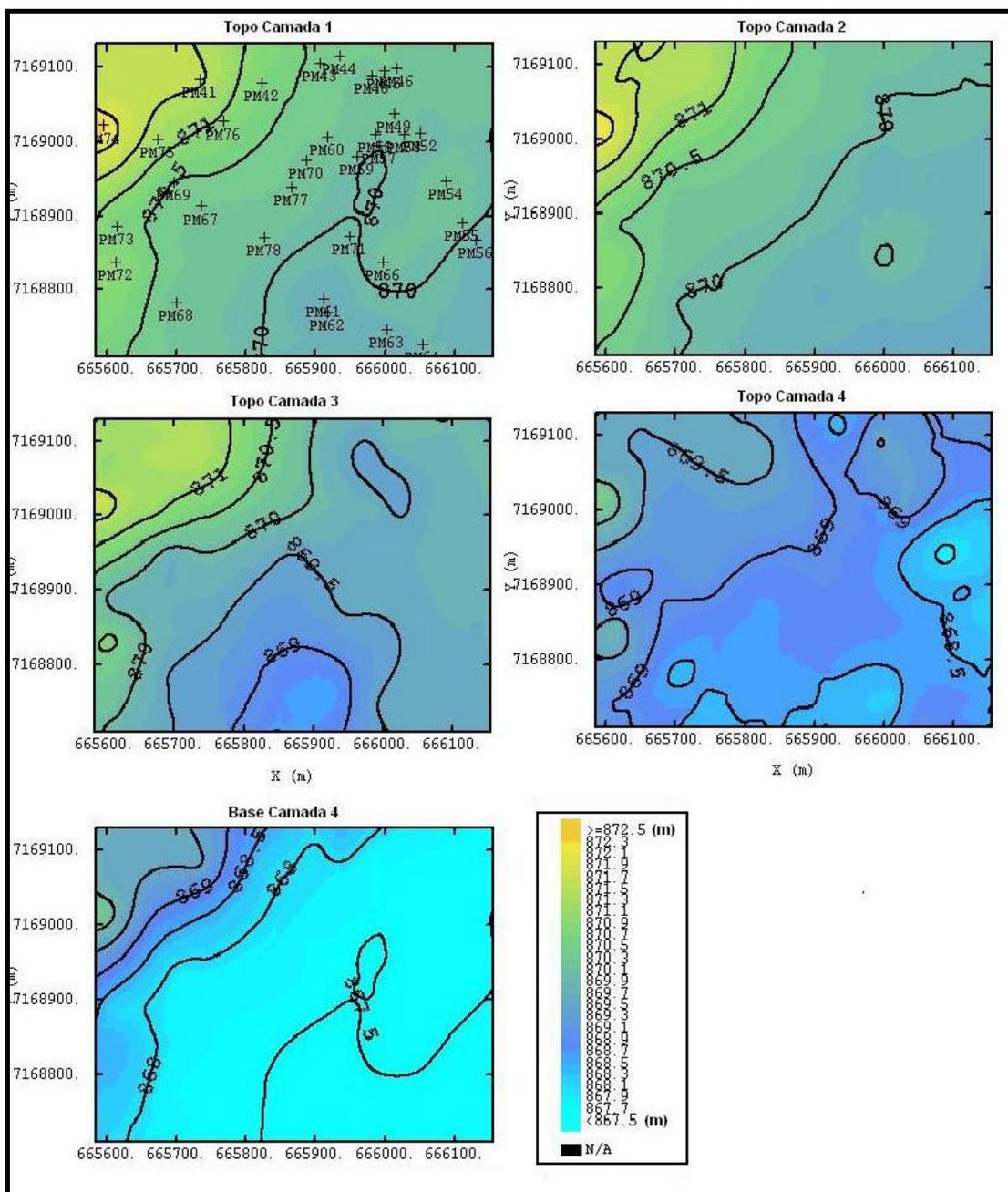


Figura 4.9: Mapa de estimativa dos Topos das Camadas modeladas.

A Figura 4.10 representa a distribuição da contaminação na área. Em destaque os pontos anômalos representados pelos poços PM-61 e PM-76, onde se verificam os mais altos índices da contaminação.

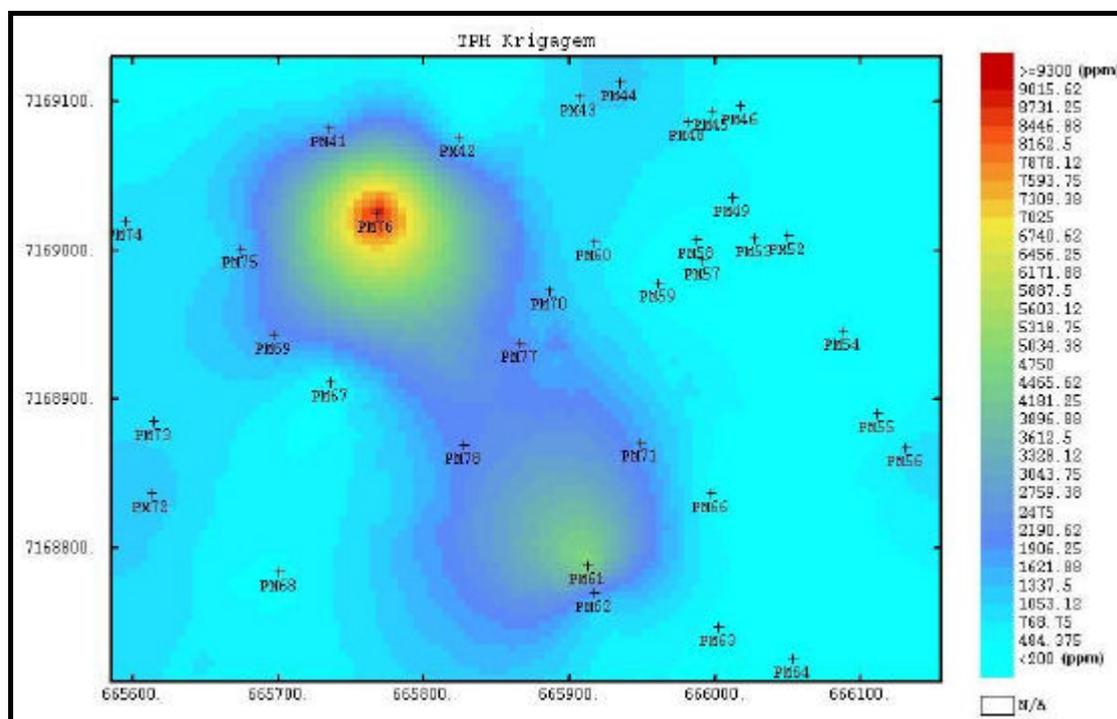


Figura 4.10: Mapa de distribuição da contaminação na área do Alagado 4

Finda a etapa de modelagem das superfícies, busca-se caracterizar a arquitetura dos corpos geológicos. O programa *ISATIS* oferece o recurso de se extrair diferenças entre as superfícies geradas, sendo que a superfície Topo da Camada 4 representa a transição entre os corpos argilosos e arenosos. Ao se subtrair o Topo da Camada 1 do Topo da Camada 4 e este último por sua base, obtêm-se os mapas de espessura dos principais elementos arquiteturais que compõem a geologia da área impactada.

Os mapas de contorno destas estruturas estão apresentados na Figura 4.11 e revelam contornos sinuosos aos corpos de areia. Na Figura 4.11 (B), nota-se o maior espessamento das areias na porção NE da área, seguindo uma tendência de espessamento nos poços PM-61, PM-62, PM-64 e PM-71, o que sugere uma geometria de corpos fluviais meandantes abandonados, e que posteriormente foram soterrados pela deposição pelítica. O também espessamento evidenciado

nos poços PM-42, PM-67 e PM-72 denota características de acreção lateral nos depósitos. Já os depósitos de argila retratam uma sedimentação de preenchimento de espaço de acomodação típica de ambiente fluvial.

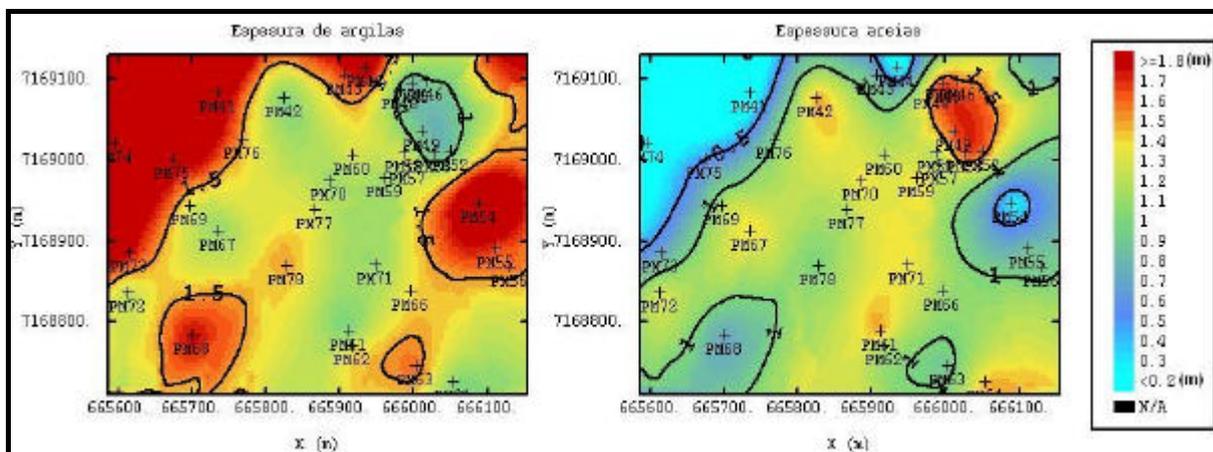


Figura 4.11: Mapas de espessura dos corpos geológicos de argila e areia dominantes na área do Alagado 4.

Convém evidenciar que os efeitos de borda (super e subestimativas), característicos do método do algoritmo de krigagem estão presentes na porção NO da área.

4.9. Modelagem dos dados utilizando o atributo de deriva externa.

A próxima etapa é acrescentar as informações originadas dos dados do levantamento geofísico, buscando se trabalhar com os algoritmos de Deriva Externa (*External Drift*). Wackernagel (1995) cita diversos casos de aplicação onde duas variáveis medidas de forma diferente, que refletem o mesmo fenômeno, sendo a primeira variável mais precisa, porém conhecida em poucos pontos, enquanto a secundária menos precisa, mas disponível em um amplo domínio espacial, possam ser associadas. O clássico exemplo vem da indústria do petróleo, onde uma informação geológica do reservatório, por exemplo, profundidade de uma determinada camada de interesse, pode ser delineada ou mapeada através das informações originadas dos poços perfurados e das extraídas da sísmica de reflexão que cobrem a área. Da mesma forma que a exploração do petróleo vem a muitos anos integrando informações de natureza distintas, a seqüência desta Seção busca integrar informações de natureza distintas visando aprimorar a construção do modelo geológico da área.

No Capítulo 3, é apresentado o mapa de Tempo Duplo de Trânsito (TDT) da onda eletromagnética refletida no contato entre os depósitos de argilas e areias, construído após a interpretação de 34 linhas de um conjunto de 106 linhas adquiridas. A Figura 4.12 revela em (A) a distribuição das amostras referentes a esta interpretação e em (B) o histograma de frequências associado.

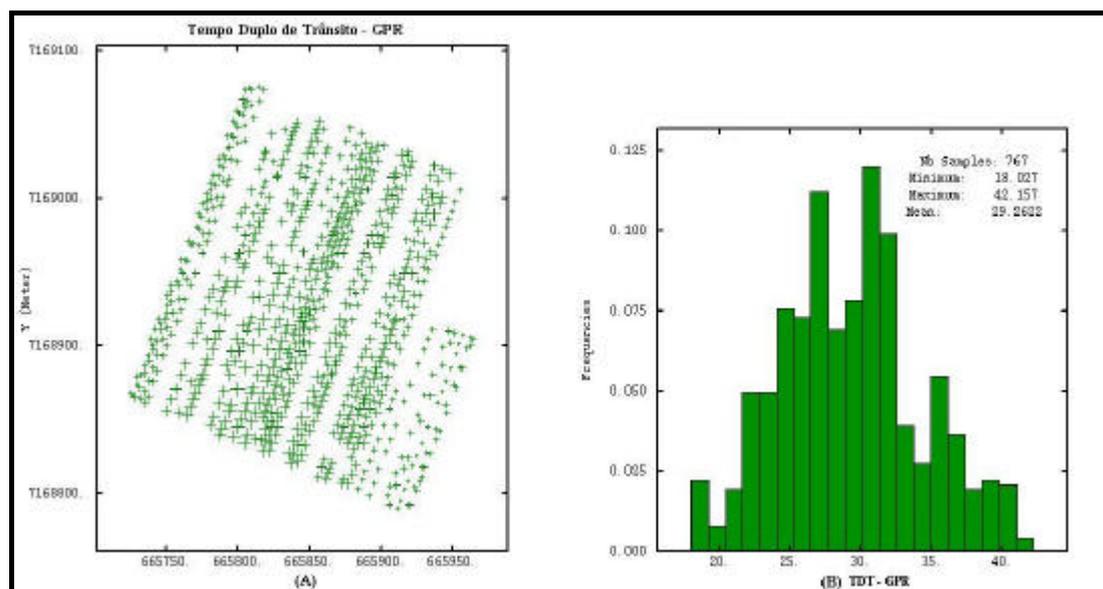


Figura 4.12: (A) Mapa base de distribuição dos valores interpretados das seções de GPR, (B) Histograma de frequências dos dados.

A etapa seguinte é validar as informações de natureza geológica, descrição dos poços de monitoramento (Anexo 1), com as de geofísica. São confrontadas as espessuras obtidas de 7 poços de monitoramento (PM's- 42, 60, 61, 67, 70, 77, e 78) localizadas na área do levantamento GPR ou próximos a ela, com os valores de TDT das seções radar-estratigráficas interpretadas no Capítulo 3. A Figura 4.13 representa em (A) o mapa dos poços de monitoramento e os respectivos pontos das linhas de radar associados a estes e, em (B), o diagrama de dispersão obtido entre o par de variáveis investigados. A correlação resultante de 0,794 é considerada satisfatória, sendo esta pequena discrepância associada aos poços PM-42, onde se esperava um baixo tempo de trânsito e a interpretação mostra o contrário, e PM-70, onde as descrições apontam uma baixa espessura de sedimentos argilosos e, no entanto, a interpretação revelou um tempo duplo de trânsito maior que o esperado.

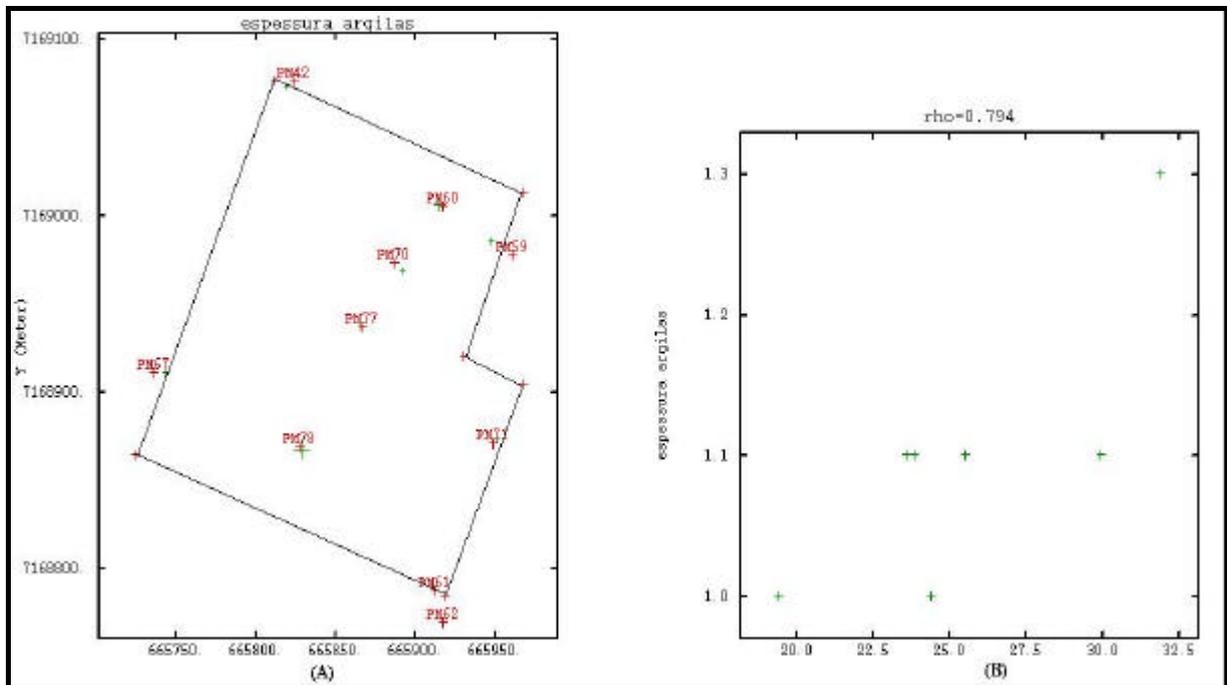


Figura 4.13:(A) Mapa de distribuição dos Pontos de Monitoramento e da área de aquisição dos dados de GPR,(B) Diagrama de dispersão entre TDT e espessura de sedimentos argilosos.

A mesma seqüência implementada anteriormente, ou seja, modelagem e ajuste de variograma, definição da vizinhança, validação cruzada e krigagem ordinária dos dados é adotada na modelagem dos dados extraídos da geofísica. Contudo, a primeira tentativa de modelagem através da krigagem ordinária empregando todo o banco de dados resultante da interpretação das seções de radar (767 amostras), resultou em uma imagem do atributo distorcida e pouco confiável, pois apresentou um falseamento conferido pelo sentido de registro das linhas. Explica-se o fato em razão da interpretação não poder ser realizada de forma 3D, ou seja, interpretando-se *in-line* e *cross-line* as linhas, recurso indisponível no pacote RADAN NT. A imagem que exemplifica esta experiência está representada na Figura 4.14.

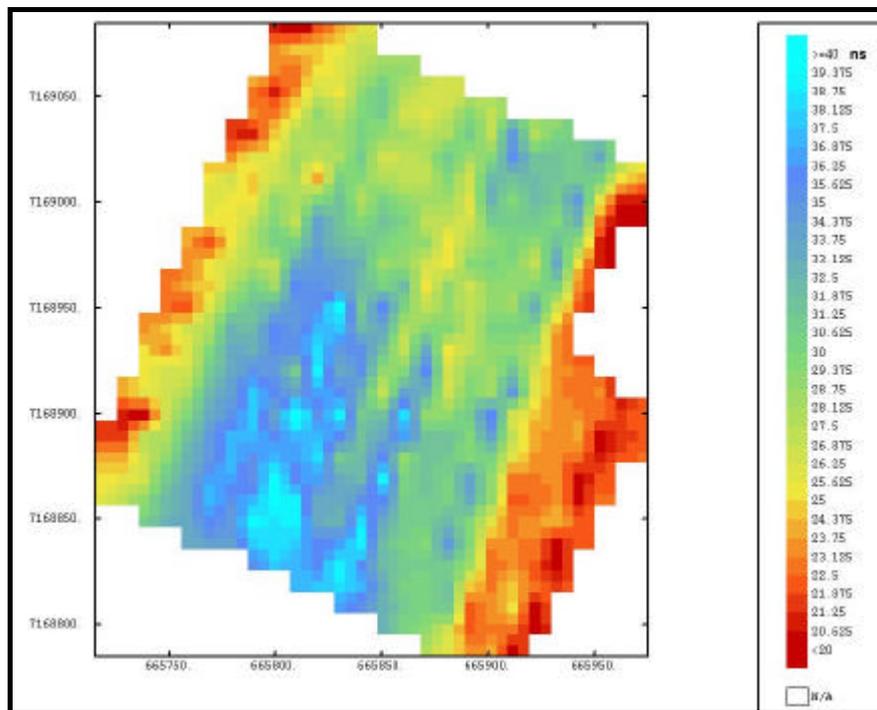


Figura 4.14: Mapa de estimativa do TDT empregando-se todo o banco de dados disponível da interpretação das seções de radar.

A solução foi utilizar o recurso do programa *ISATIS* que permite selecionar e reamostrar um determinado banco de dados. Assim, dos iniciais 767 pontos interpretados, foram reamostrados 90 pontos, que após reproduzirem as mesmas características estatísticas do conjunto de total, foram então utilizados na construção do mapa de estimativa do atributo. O simples fato de ordenar os dados de forma mais homogênea na área foi capaz de produzir um mapa de estimativa mais realístico sob o aspecto geológico.

A Figura 4.15 apresenta em (B) o Tempo Duplo de Trânsito (TDT) de uma onda eletromagnética transitando por sedimentos pelíticos que recobrem toda a área do Alagado 4, e em (C) o modelo que se quer integrar a informação de deriva externa, neste caso, o topo da camada 4.

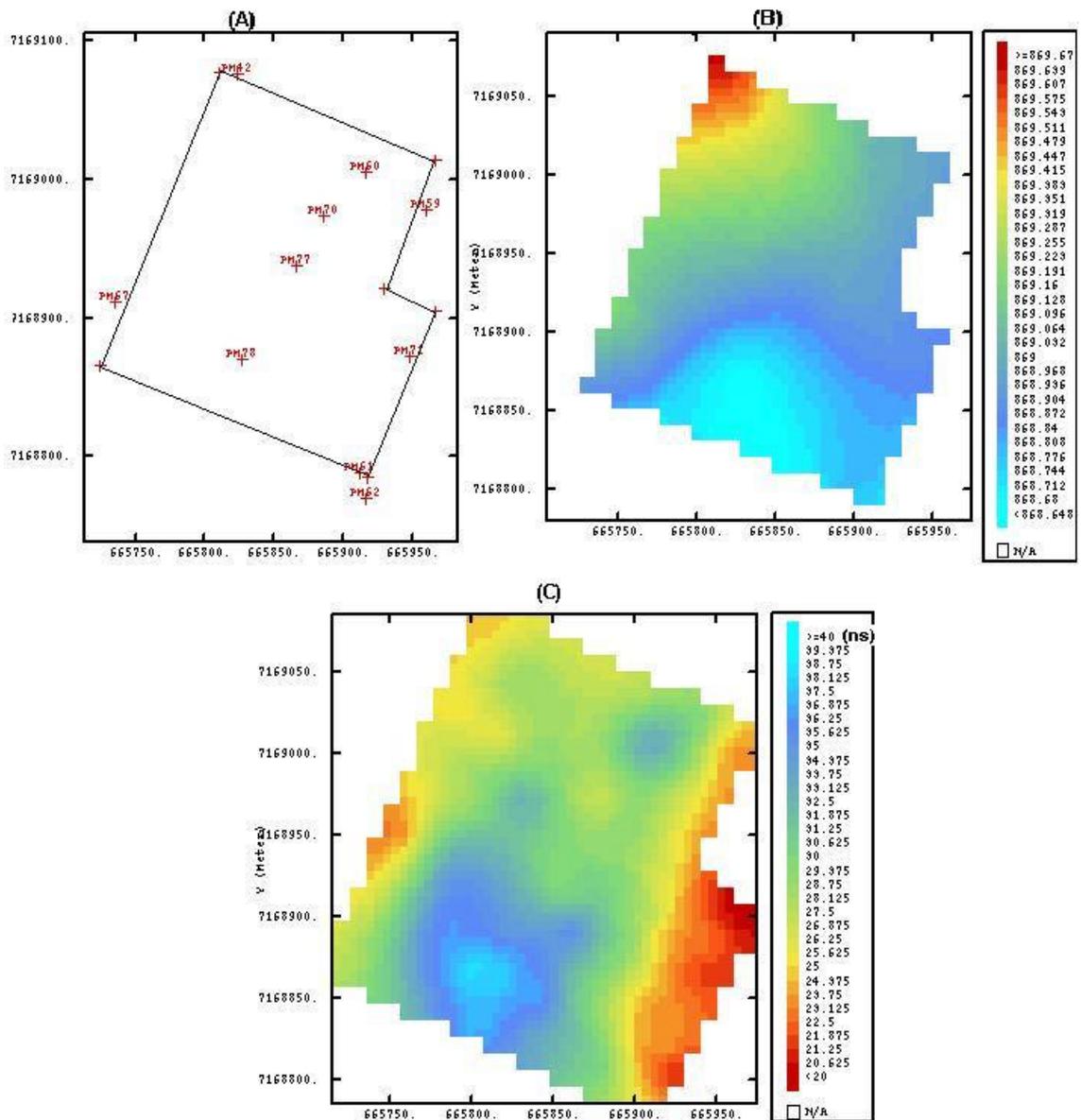


Figura 4.15: (A) Área do levantamento de GPR e poços utilizados para a estimativa com Deriva Externa; (B) Mapa de estimativa do topo da camada 4 e (C) Mapa de estimativa do Tempo Duplo de Trânsito (TDT) correspondente ao contato argila/areia na área do levantamento 3D de GPR.

Duas possibilidades diferentes de incorporar a informação de deriva externa ao modelo estabelecido são testadas. Xu et al (1992) demonstram a aplicação do dado sísmico como ferramenta de apoio na modelagem de um reservatório, testando dois métodos geoestatísticos diferentes. Da mesma forma, nesta Seção são testados os algoritmos de krigagem com deriva

externa (KDE) e a cokrigagem colocada (*Collocated Cokriging*) com o propósito de reunir duas fontes de informações disponíveis, no intuito de aprimorar o modelo geológico já estabelecido. Implementar estes algoritmos através do programa *ISATIS* é simples e rápido de se realizar.

A krigagem com deriva externa (KDE) requer como dado de entrada os modelos de variografia e vizinhança definidos para a variável primária, Topo da Camada 4. A variável de deriva contribui no algoritmo como um ajuste linear tipo $E[Z(x)] = a_0 + b_1 s(x)$, onde a função $Z(x)$ refere-se ao atributo primário, $s(x)$ ao secundário a qual se soma uma constante a_0 e um coeficiente b_1 (Wackernagel, 1995). A função determinística $s(x)$ descreve de forma mais ampla os contornos da variável primária, porém de maneira menos precisa que esta. O método de deriva externa consolida e reúne ambas as informações conforme está demonstrado no item 4.6 deste Capítulo.

O resultado da aplicação do algoritmo de KDE no topo da camada 4 está evidenciado na Figura 4.16

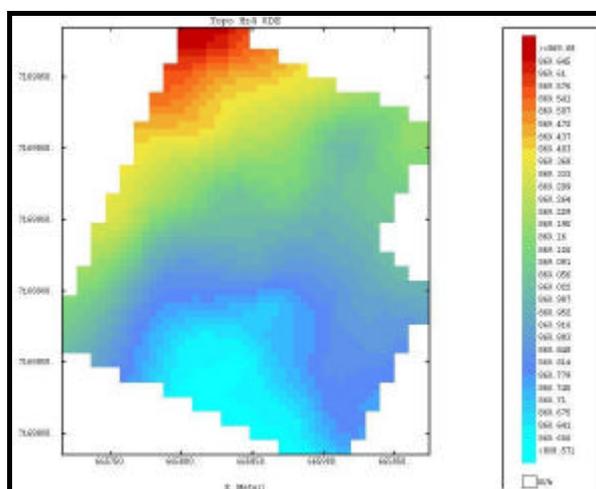


Figura 4.16: Mapa de estimativa do Topo da Camada 4 através do algoritmo de KDE.

Outro algoritmo capaz de reunir diferentes bancos de dados é através da Cokrigagem Colocalizada. Neste caso, são os dados da variável de *background* (variograma e vizinhança) que servem para a modelagem do atributo primário. Valores de correlação, razão entre as variâncias

são também parâmetros adicionais que contribuem na performance do algoritmo. A Figura 4.17 representa a imagem gerada através da cokrigagem colocalizada.

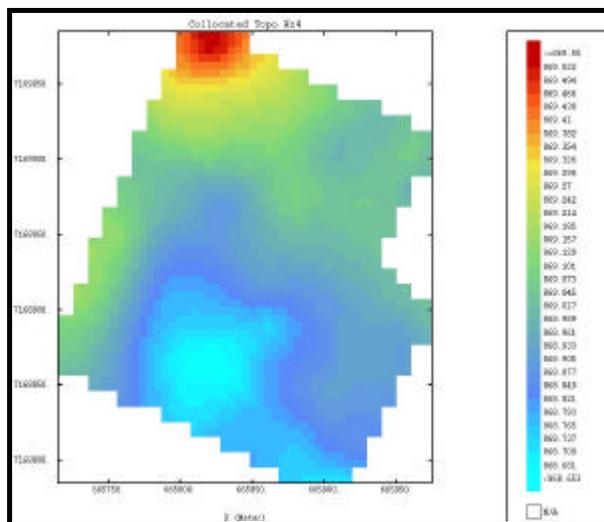


Figura 4.17: Mapa de estimativa do Topo da Topo da Camada 4 através do algoritmo de cokrigagem colocalizada.

Uma forma de analisar os resultados obtidos pela deriva externa é observando o comportamento variográfico destas imagens. Comparar seus variogramas é um indicativo das relações de anisotropias dos sistemas e, por conseguinte verificar o quanto uma imagem possui maior semelhança com um determinado atributo ou com outro. A Figura 4.18 representa os variogramas das 4 imagens envolvidas na deriva externa. Em (A) está representado o variograma nas direções D1, em verde, e D2, em vermelho, e que representam os eixos cartesianos X e Y, respectivamente, da imagem obtida através da KO dos dados. Em (B) a o variograma pertence à imagem após o emprego do algoritmo de KDE, em (C) após o cokrigagem colocalizada e em (D) é a representação variográfica do atributo de deriva externa. Como se pode notar há uma grande semelhança entre os variogramas de (A) e (B), coerentes com a própria construção do algoritmo. A Figura 4.19 apresenta a reunião do variogramas de (A), (B) e (C). Neste caso se pode notar que no sentido D1 os algoritmos de deriva suavizaram a variância em relação à KO, sendo a maior suavização ocasionada pela cokrigagem. Já no sentido D2, marcado pela forte deriva ou *trend* do dado, enquanto a KDE aumentou a variância a cokrigagem reduziu-a. Contudo é marcante a similaridade variográfica entre KO e a KDE já evidenciada pelas próprias imagens.

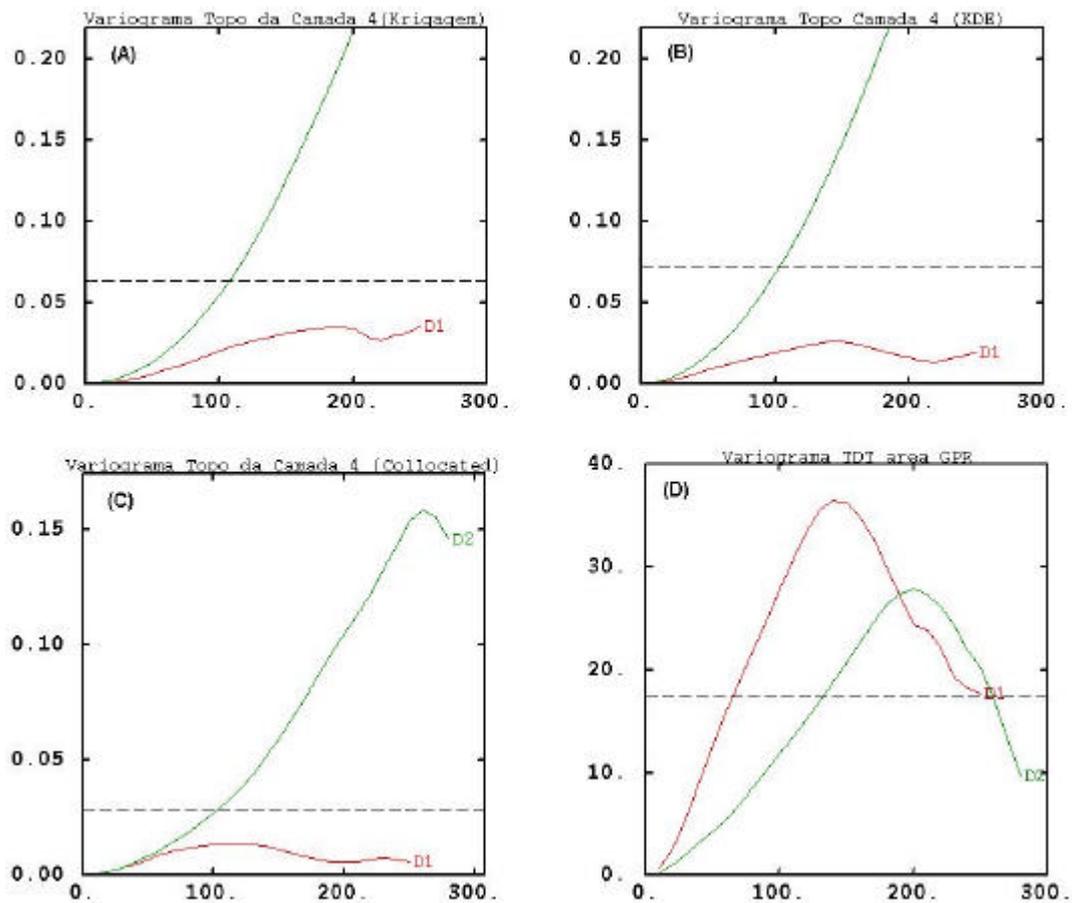


Figura 4.18: Variogramas das superfícies estimadas (A) Topo da Camada 4 através da KO, (B) Topo da Camada 4 através da KDE, (C) Topo da Camada através da cokrigagem colocalizada e (D) Tempo Duplo de Trânsito, atributo de deriva externa.

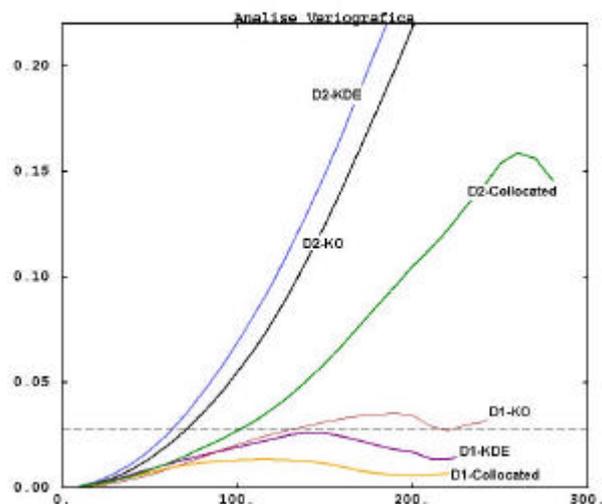


Figura 4.19: Representação variográfica de KO, KDE e cokrigagem colocalizada das superfícies geradas.

Finalmente, decorrente do uso do atributo de deriva externa, duas novas superfícies são modeladas para representar o contato entre os sedimentos argilosos e arenosos. A partir destas são calculados os novos modelos do arcabouço geológico da área. A Figura 4.20 mostra os novos mapas de espessura para área sendo as figuras (A) e (C) representativa das modelagens via KDE e as (B) e (D) empregando-se a cokrigagem colocalizada.

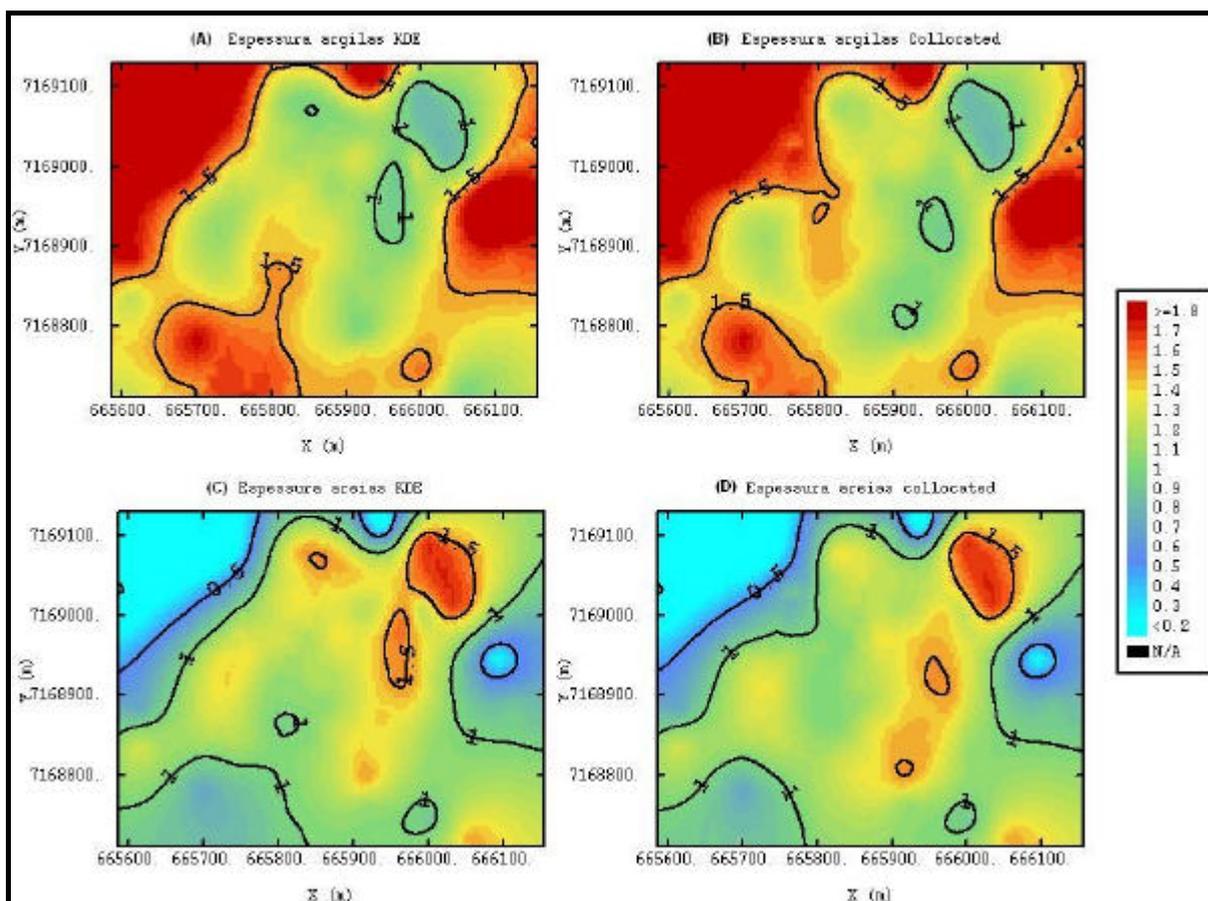


Figura 4.20: Mapas de espessuras estimados a partir da deriva externa (A) espessura de argilas KDE, (B) espessura de argilas colocalizada, (C) espessura de areias KDE e (D) espessura de areias colocalizada.

4.10. Simulação Gaussiana Sequencial (SGS)

A etapa seguinte à estimativa é estudar o dados sob a ótica da simulação estocástica. Simular significa representar por semelhança. A simulação de uma função aleatória é a realização, em um dado domínio, do modelo que descreve esta função. Assim, um processo estocástico é sinônimo de função aleatória, sujeitando-se às leis probabilísticas. Na área de

Geociências podem-se citar vários exemplos de processos estocásticos, um exemplo simples é a deposição de sedimentos em uma bacia, pois este evento ao longo do tempo não é contínuo, depende, por exemplo, das condições climáticas, taxa de subsidência etc. Portanto, pode-se através da simulação estocástica, por exemplo, determinar as incertezas associadas ao comportamento aleatório de distribuição dos teores de contaminação na área do Alagado 4.

Para Journel & Huijbregts (1978), a simulação de depósitos é capaz de capturar as flutuações espaciais de alguns atributos. A principal diferença entre a simulação e a estimativa está em seu objetivo. O objetivo da estimativa é providenciar, a cada ponto x , um estimador $z^*(x)$ com o melhor valor possível do valor não conhecido $z_o(x)$. No caso da krigagem, há uma minimização da estimativa da variância, envolvendo a suavização da dispersão verdadeira, pois é uma combinação linear de dados. Na outra via, a simulação condicional, reproduz os histogramas e honra a variabilidade espacial (variograma). Os valores verdadeiros, $z_o(x)$, são identificados, essencialmente, pelas características de dispersão. Em cada ponto x , o valor simulado $z(x)$ não é o melhor estimador possível de $z_o(x)$, porém a simulação permite acessar as incertezas. Em geral, os objetivos da simulação e da estimativa não são compatíveis.

No algoritmo de simulação gaussiana seqüencial (SGS), cada variável é simulada seqüencialmente de acordo com a sua função de distribuição acumulada condicional gaussiana, caracterizada através de um sistema de krigagem. A cada etapa, os dados condicionantes são todos os valores originais somados a todos os valores previamente simulados que se encontram dentro de uma vizinhança da posição a ser simulada (Oliveira, 1997).

O algoritmo da Simulação Gaussiana Seqüencial consiste das seguintes etapas, (Oliveira, 1997):

- Determinar a função de distribuição acumulada (cdf) da variável em toda a área de estudo;
- Fazer a transformação gaussiana, anamorfose da cdf da variável em estudo;
- Calcular um modelo de semivariograma dos dados condicionantes transformados;

- Definir um caminho aleatório, não necessariamente regular, que visite todos os nós da malha;
- A cada nó da malha visitado, reter um determinado número de dados condicionantes vizinhos incluindo os dados originais transformados e os previamente simulados;
- Utilizar um dos tipos de krigagem com o variograma dos dados transformados para se obter a estimativa e a variância da krigagem. Construir a função de distribuição acumulada condicional (ccdf) gaussiana da nova função aleatória $Y(x)$ em cada posição x .
- Sortear aleatoriamente um valor de $y(x)$ desta ccdf, adicionando seu valor ao conjunto de dados;
- Retornar à malha de simulação até que todos os nós estejam simulados;
- Transformar os valores gaussianos simulados para a ordem de grandeza da variável original.

Como exposto, o algoritmo de SGS, requer a solução de sistemas de krigagem cada vez maiores para o cálculo das probabilidades à medida que o algoritmo progride (aumenta o número de dados condicionantes). Para contornar este fato, se adota vizinhança móvel, em vez de única para o cálculo das ccdfs.

Oliveira (1997) cita as vantagens da SGS: fácil condicionamento; anisotropias manuseadas automaticamente; e aplicabilidade para qualquer função de covariância. Como desvantagem, a utilização da distribuição gaussiana intermediária pelo algoritmo, pois vários trabalhos reportam que as simulações gaussianas resultam em pequena continuidade dos valores extremos, o que torna o método pouco recomendado nestes casos.

Finalmente, para a implementação da SGS alguns parâmetros devem ser especificados pelo usuário, tais como: tipo de krigagem; estratégia de busca ou vizinhança, onde são definidos o número máximo de nós simulados e o raio máximo de dilatação da simulação (X, Y e Z); limites inferiores e superiores de escolha de extrapolação a serem feitos na transformação gaussiana. A

escolha de diferentes parâmetros pode afetar, significativamente, a eficiência do algoritmo, a natureza das realizações e o resultado da distribuição de incertezas.

4.11. Simulação Gaussiana Seqüencial (SGS) aplicada aos dados de TPH

A escolha pelo método SGS incide no fato do algoritmo ser simples, flexível e de boa eficiência. Já o atributo de TPH representa a variável que quantifica a contaminação da área.

Assim, o primeiro passo é fazer a anamorfose dos dados, condicionando os dados amostrais em uma função gaussiana, ajustando-se um polinômio de ordem 80 (polinômio de Hermite) para sua expansão. Segue o ajuste do variograma dos dados anamorfoseados representativos à anisotropia do sistema. A partir dos dados condicionantes, variograma dos dados anamorfoseados, krigagem simples, onde se identifica à média e variância do conjunto de amostras, e definição da vizinhança, a etapa seguinte é simular 200 imagens ou possíveis cenários da distribuição da contaminação.

Uma forma de avaliar a distribuição dos dados após a simulação é por meio dos histogramas de frequência. A Figura 4.21 apresenta histogramas de distribuição das amostras na simulação número 125 e dos dados condicionantes, onde se destacam os valores de mínimo, máximo e média sendo honrados.

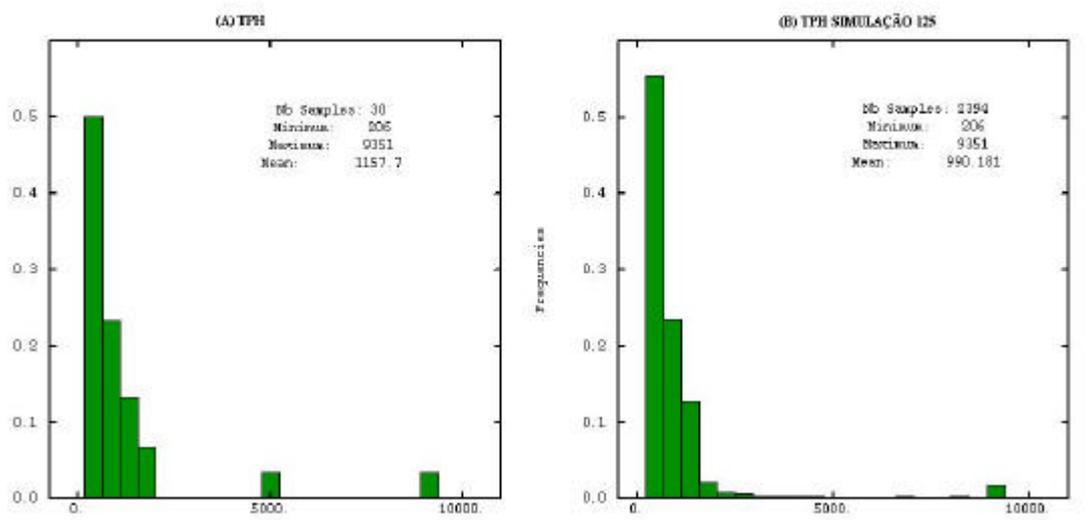


Figura 4.21: Histogramas (A) dado condicionante – TPH, (B) simulação número 125.

Outro critério de controle ou seleção de imagens geradas por SGC é através da exibição dos variogramas das imagens simuladas. A Figura 4.22 apresenta a comparação entre o variograma inicial e os de 42 imagens simuladas, ou pouco mais de 20 % dos dados, valor considerado suficiente para as necessárias análises .

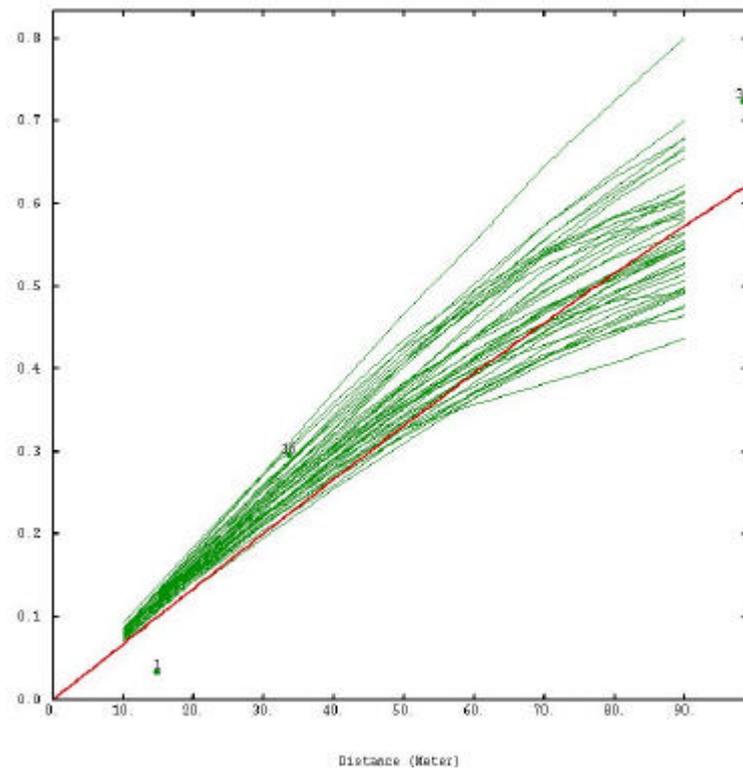


Figura 4.22: Variogramas de 42 simulações (verde) e do variograma modelado (vermelho)

Verifica-se que muitas imagens apresentam variogramas muito diferentes do modelo condicionante, utilizado para gerá-las. Isto se deve ao fato do domínio a ser simulado ser da ordem do *integral range* do modelo de variograma adotado. Um bom critério de seleção de imagens é escolher aquela(s) onde o variograma não se distancia demais do modelo condicionante.

Para ilustrar os resultados da simulação foram selecionadas 4 imagens equiprováveis da contaminação (simulações de números 25, 75, 150 e 175) do conjunto de 200 realizados, sendo apresentadas na Figura 4.23.

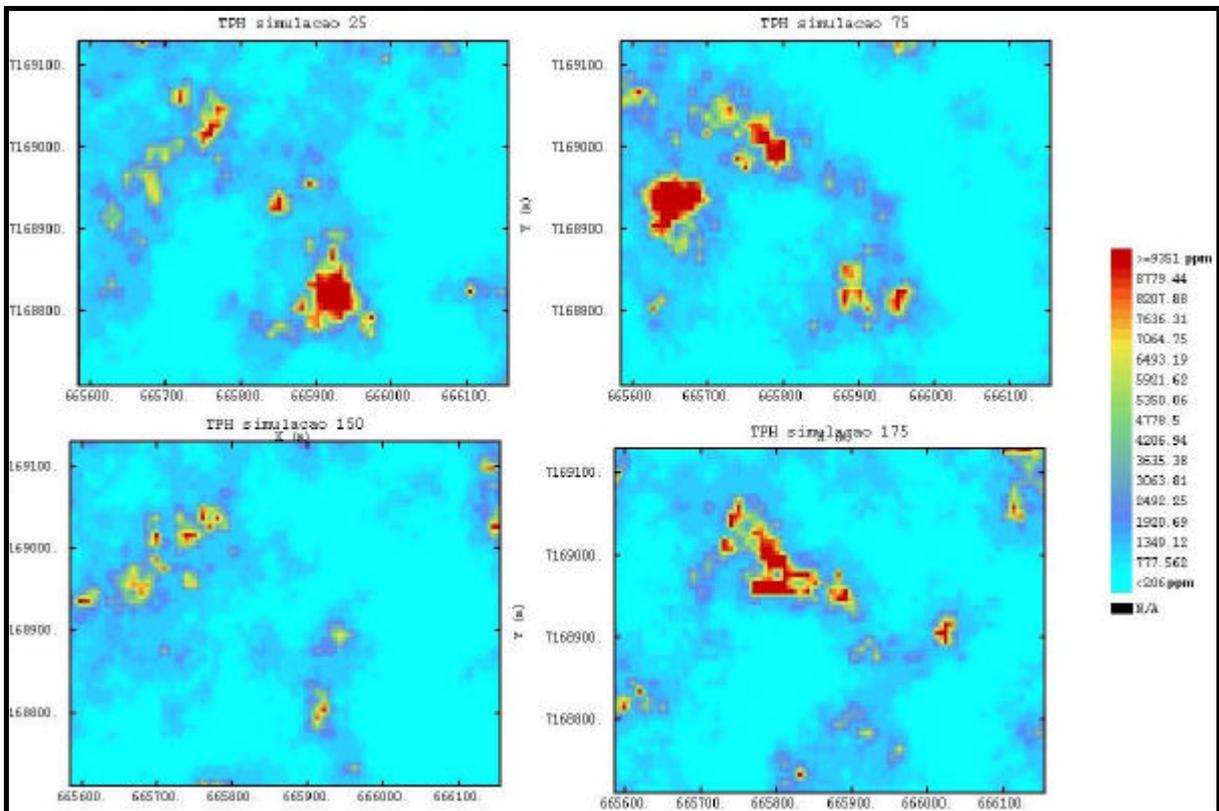


Figura 4.23: Conjunto de 4 realizações equiprováveis do cenário de contaminação de TPH na área do Alagado 4

Por meio do conjunto destas simulações pode-se acessar as incertezas ou cenários probabilísticos de distribuição da contaminação. Três diferentes painéis são ensaiados condicionados a diferentes teores de corte. O primeiro, considerado como um *background* para a área, apresenta o mapa de teores superiores a 1.200 ppm. Um cenário probabilístico intermediário acessa as incertezas, mediante um teor de corte de 2.500 ppm. Por fim, o cenário que requer ações emergenciais de remediações ambientais, representado pelo índice de 5.000 ppm de TPH. A Figura 4.24 representa estes cenários probabilísticos.

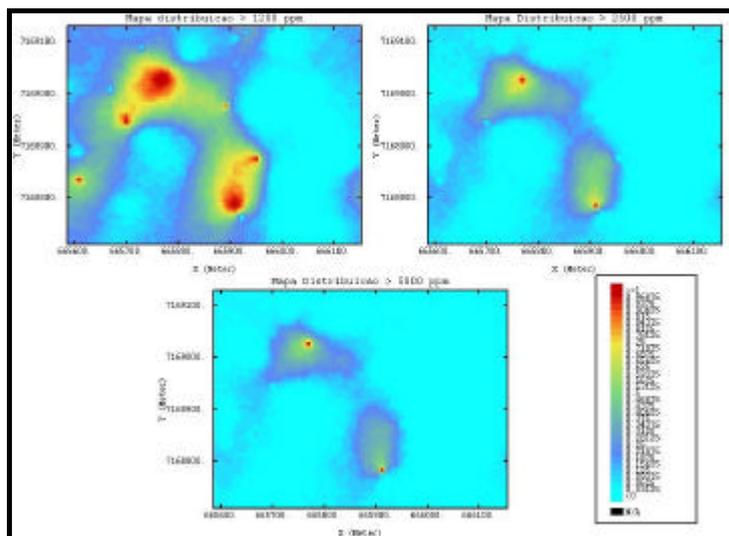


Figura 4.24: Diferentes cenários probabilísticos da contaminação na área do Alagado 4.

Outra maneira de representar os resultados da SGS é por meio dos mapas de iso-freqüências, que representam o valor que um dado quantil é armazenado em cada ponto da malha e indicam a probabilidade do valor simulado ser superior/inferior a um determinado valor limite. Assim, é possível acessar cenários considerados otimistas, normais e pessimistas da contaminação, representados pelos quantis 10, 50 e 90% de freqüência, Figura 4.25.

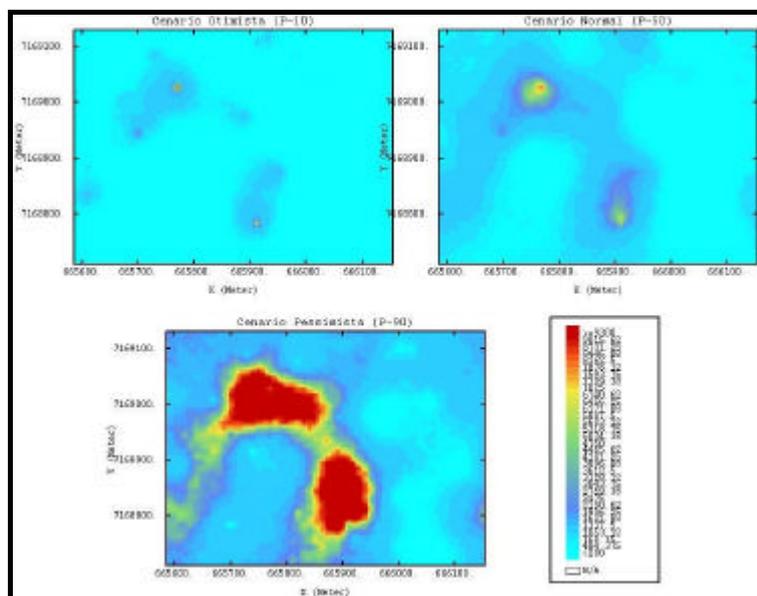


Figura 4.25: Diferentes cenários: Otimista, Normal e Pessimista de distribuição da contaminação na área do Alagado 4.

Finalmente, deve-se apresentar o cenário representativo da média das 200 simulações realizadas, Figura 4.26. Nota-se uma tendência desta imagem ser semelhante à imagem da obtida pela krigagem ordinária e apresentada na Figura 4.10.

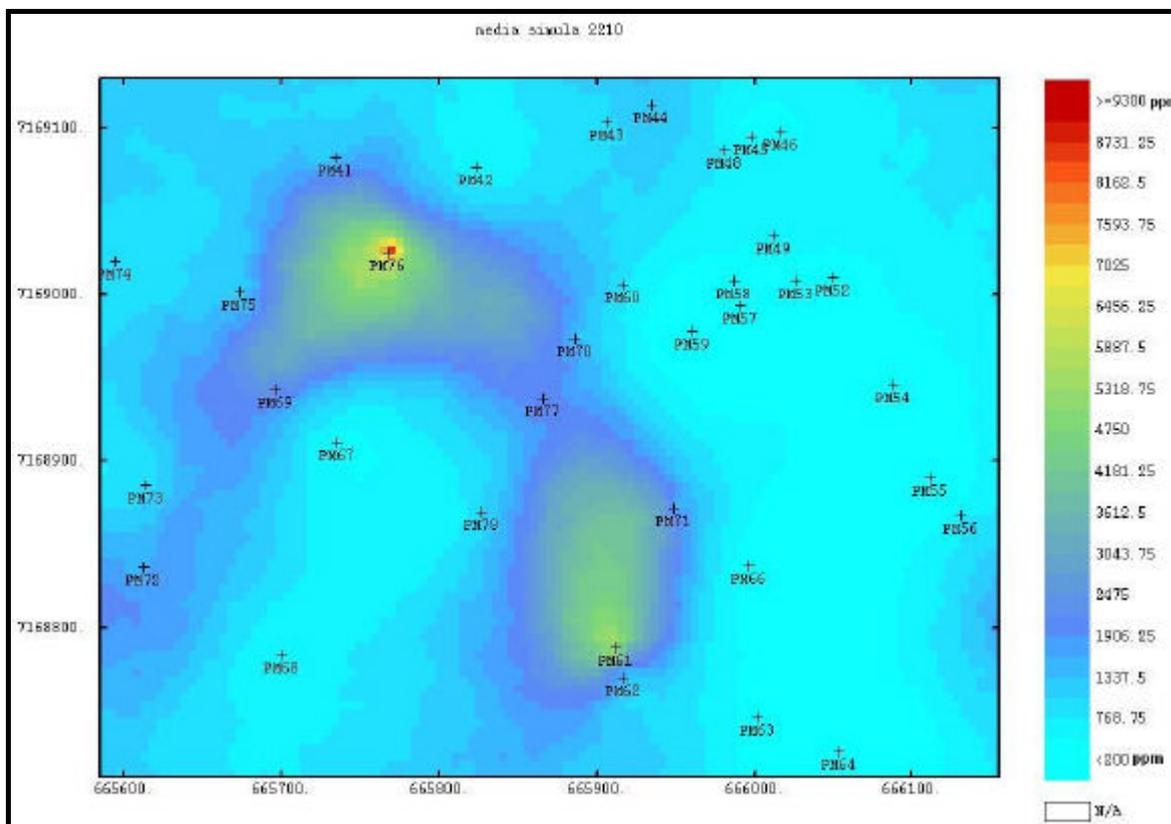


Figura 4.26: Imagem representativa a média das 200 simulações condicionais realizadas.

Capítulo 5 MODELAGEM DE FLUXO E TRANSPORTE

5.1. Introdução

Este capítulo trata da modelagem de fluxo e transporte da contaminação em água subterrânea relativos ao sistema denominado Alagado 4. Os resultados destas modelagens compõem uma etapa fundamental para se elaborar um projeto de remediação ambiental.

Inicialmente, se faz uma revisão conceitual dos principais parâmetros e leis que regem o escoamento em meios porosos. A descrição da modelagem hidrológica e suas considerações são realizadas por meio do programa Visual MODFLOW, versão 3.0 (WHI).

5.2. Considerações teóricas sobre escoamento em meios porosos

Deve-se ao engenheiro francês Henry Darcy (1856), as primeiras observações experimentais sobre o escoamento através dos meios porosos. Examinando as características do fluxo através de filtros de areia, Darcy concluiu que a vazão era diretamente proporcional à carga hidrostática e inversamente proporcional à espessura da camada (Fetter, 2001). Esta conclusão, conhecida universalmente como lei de Darcy, é expressa por:

$$Q = -K.A \left(\frac{h_a - h_b}{L} \right) \quad (5.1)$$

onde:

Q = vazão;

A = área total da seção do escoamento (incluindo os sólidos);

K = coeficiente de proporcionalidade, chamado de condutividade hidráulica;

h_a e h_b = cargas hidráulicas nos piezômetros A e B.

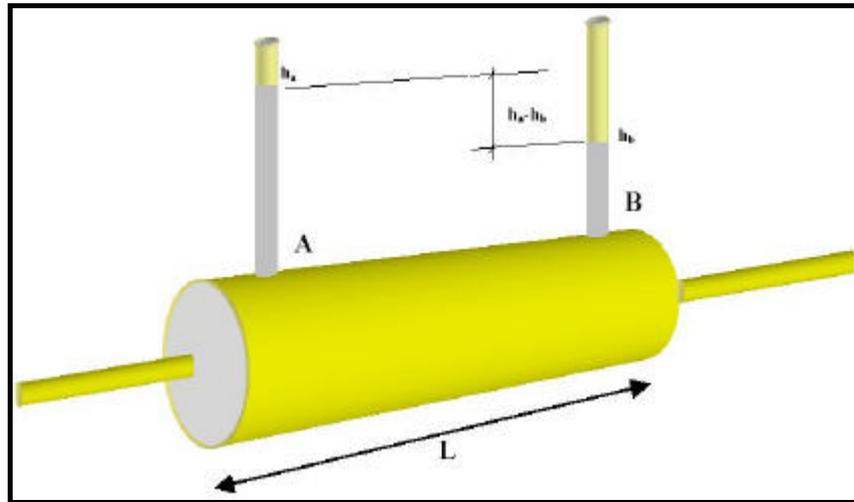


Figura 5.1.: Esboço para demonstrar o experimento de Darcy (originalmente o experimento de Darcy posicionava o equipamento verticalmente, modificado de Fetter, 2001).

Entende-se a diferença de cargas hidráulicas ($h_a - h_b$) dividida pelo comprimento L , como sendo a perda de carga por unidade de comprimento, o que recebe o nome de gradiente hidráulico (Feitosa & Filho, 1997).

A lei de Darcy foi inicialmente concebida e aplicada a escoamento unidimensional, contudo ela pode ser generalizada para escoamento em mais de uma direção (escoamento tridimensional), podendo ser aplicada no escoamento de fluxo da água subterrânea no aquífero. Desta forma, a expressão inicialmente desenvolvida por Darcy (Equação 5.1), pode ser generalizada para :

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L} = -K \text{ grad } h \quad (5.2)$$

onde, q é o vetor velocidade aparente formado por componentes nas três direções principais de anisotropia (X, Y, Z), K é o tensor de condutividade hidráulica e $\text{grad } h$ é o gradiente da carga hidráulica que indica como varia a carga hidráulica ao longo de cada uma das três direções. O sinal negativo da Equação 5.2 indica que o fluxo ocorre no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, contrário ao gradiente h (Feitosa & Filho, 1997).

De acordo com Fetter (2001), o coeficiente de proporcionalidade K , denominada condutividade hidráulica, considera as características do meio, incluindo porosidade, forma, tamanho e arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica).

Em meios isotrópicos, a condutividade hidráulica pode ser definida com a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário. Trata da facilidade da formação aquífera exercer a função de um condutor hidráulico (Feitosa & Filho, 1997).

A condutividade hidráulica pode ser representada em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma (Fetter, 2001):

$$K = k \left(\frac{\rho g}{\mu} \right); \quad (5.3)$$

onde:

K = condutividade hidráulica (expressa em m/s ou cm/s);

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso (expressa em cm^2 ou em Darcy);

ρ e μ representam as características do fluido, respectivamente massa específica e viscosidade absoluta;

g = aceleração da gravidade.

Um aquífero é considerado anisotrópico quando a condutividade hidráulica é diferente para cada uma das direções dos eixos coordenados. Um aquífero heterogêneo é formado por materiais de condutividades diferentes, tal como ocorre na natureza.

Outros dois conceitos úteis a serem abordados, ao se estudar um aquífero, são os da transmissividade e o do armazenamento específico. A transmissividade representa a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura do aquífero. É conceituada como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico, sendo expressa pela equação (Feitosa & Filho, 1997):

$$T = Kb, \quad (5.4)$$

onde, T representa a transmissividade do aquífero, K a condutividade hidráulica e b a espessura do aquífero.

O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido como o volume de água liberado do armazenamento por unidade de variação da carga hidráulica e por unidade de volume do meio, sendo (Feitosa & Filho, 1997):

$$S_s = \frac{\delta V_{\text{liberado}}}{V \delta h} \quad (5.5)$$

onde, S_s representa o armazenamento específico e δ indica uma pequena variação.

5.3. Equação Geral do Fluxo Subterrâneo

Além da lei de Darcy, outra lei que deve ser obedecida é a da conservação da massa (ou da continuidade) e que significa que a água não pode ser criada nem destruída, pode apenas ser transportada de um ponto a outro e armazenada em algum lugar

Considerando um fluxo de água, q , escoando em um meio poroso e atravessando um Volume Elementar Representativo (VER), com dimensões $\Delta x \Delta y \Delta z$, conforme a Figura 5.2, este fluxo é dado pela expressão de Darcy, generalizada para uma condição tri-dimensional (Loureiro, 2002):

$$\vec{q} = q_x \vec{i}_x + q_y \vec{i}_y + q_z \vec{i}_z = -K \vec{\nabla} h \quad (5.6)$$

Por sua vez, a expressão que descreve o balanço de massa em VER é representada pela equação em 5.7:

Saída de Água – Entrada de Água = Variação no Armazenamento
--

(5.7)

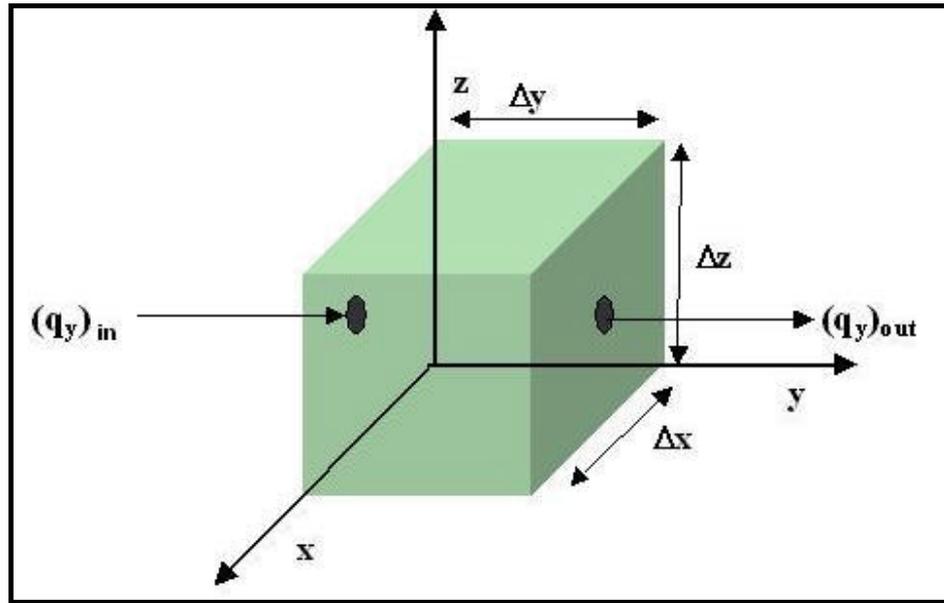


Figura 5.2: Volume Elementar Representativo (VER) usado na derivação da equação do escoamento (modificado de Loureiro, 2002)

Assim, ao longo do eixo y , o balanço de massa pode ser representado por:

$$\text{Balanço de massa} = \rho \left[(q_y)_{out} - (q_y)_{in} \right] \Delta x \Delta z \quad (5.8)$$

que também pode ser escrito como:

$$\text{Balanço de massa} = \rho \left[\frac{(q_y)_{out} - (q_y)_{in}}{\Delta y} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5.9)$$

ou na forma diferencial

$$\text{Balanço de massa} = \rho \frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (5.10)$$

Expressões similares a esta podem ser definidas ao longo dos eixos X e Z . Assim a variação total do armazenamento de água em VER é dada por:

$$\text{Variação no armazenamento} = \rho \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5.11)$$

Considerando que exista uma fonte ou sumidouro designado por R^* , onde o valor de R^* , se água for adicionada ao aquífero, é positivo (fonte), e negativo, se água é retirada do aquífero (sumidouro), a expressão 5.11 se transforma em:

$$\text{Variação no armazenamento} = \rho \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5.12)$$

A variação no armazenamento pode ser representada também pelo armazenamento específico (S_s), e é representada pela equação:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (5.13)$$

Assim, a variação de volume de água por unidade de tempo pode ser representada por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5.14)$$

Substituindo o termo $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ pela Equação 5.12, e eliminando o termo $\Delta x \Delta y \Delta z$, tem-se:

$$\rho \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) = -\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.15)$$

Considerando a expressão de Darcy em três dimensões:

$$\begin{aligned}
q_x &= -K \frac{\partial h}{\partial x} \\
q_y &= -K \frac{\partial h}{\partial y} \\
q_z &= -K \frac{\partial h}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{5.16}$$

e fazendo a respectiva substituição na equação da continuidade (5.15) chega-se à equação geral do escoamento no aquífero:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R^* = S_s \frac{\partial h}{\partial t}
\tag{5.17}$$

onde,

q_x , q_y e q_z = componentes do vetor de velocidade específica, ao longo dos eixos de coordenadas x,y e z;

K_x , K_y e K_z = componentes principais do tensor condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas x, y e z respectivamente;

h = carga hidráulica;

ρ = densidade da água;

S_s = armazenamento específico;

R^* = recarga, que corresponde ao volume de água introduzido ou retirado por unidade de volume do meio por unidade de tempo;.

A Equação 5.17 aplica-se ao escoamento tri-dimensional da água subterrânea, tanto para aquíferos confinados como não-confinados (freáticos). A partir desta equação, diversas derivações são realizadas, conforme os diferentes modelos de aquíferos. Loureiro (2002) e Fetter (2001) demonstram matematicamente as diferenças das equações de fluxo estabelecidas para aquíferos não confinados (livres) e confinados.

A equação geral do fluxo subterrâneo é uma equação diferencial parcial. Para sua resolução, empregam-se métodos numéricos, sendo o mais comum o Método de Diferenças Finitas (método utilizado nesta dissertação) que se baseia em funções definidas para determinados pontos do modelo. Estes pontos, chamados nós, e definidos em uma malha ajustada

a um determinado modelo, representam a derivada de uma expressão algébrica que serve de referência aos nós adjacentes.

5.4. Modelagem de fluxo do Alagado 4

Esta fase concentra-se na construção de um modelo hidrológico conceitual onde se procura estabelecer a geometria do sistema com suas camadas geológicas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas e que seja capaz de representar, o mais fielmente, o ciclo da água subterrânea da área. Diversos cenários de fluxo da água subterrânea do Alagado 4 são simulados por meio do aplicativo Visual MODFLOW 3.0 (WHI), pacote de modelação matemática com solução numérica baseada nas equações de fluxo.

O fluxograma apresentado na Figura 5.3 resume as principais etapas para se construir um modelo conceitual numérico representativo da área que se quer modelar.

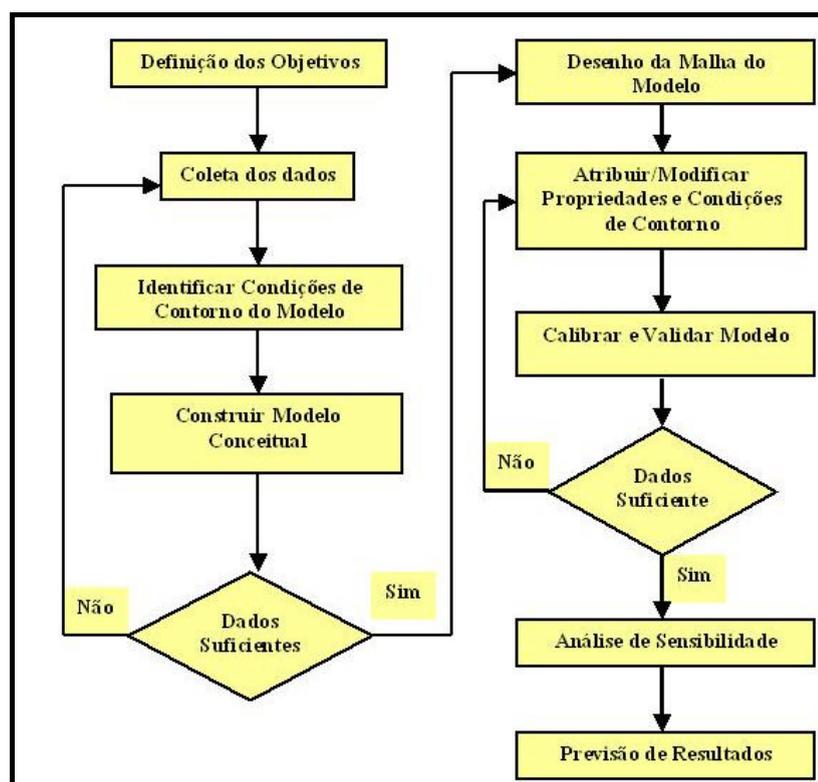


Figura 5.3: Fluxograma representativo das etapas básicas na construção de um modelo numérico representativo das condições hidrológicas de uma área (modificado de Loureiro, 2002).

O objetivo do modelo conceitual é simplificar as informações de campo e permitir a implementação de um modelo computacional.

O primeiro passo é importar as superfícies definidas na modelagem geoestatística, sendo selecionados os modelos construídos através da Krigagem com Deriva Externa (KDE) e o obtido apenas com as informações dos poços, sem a utilização dos dados de natureza geofísica, para se realizar um estudo comparativo.

A Figura 5.3 apresenta a malha construída (10 x 10 metros), compatível com a da modelagem geológica, além do mapa das drenagens superficiais e de localização dos 34 poços de monitoramento existentes na área. Esta malha (42 linhas por 57 colunas) deverá ser preenchida pelas propriedades fundamentais do meio poroso (porosidade, condutividade hidráulica, etc) além dos parâmetros de geometria do aquífero, condições de contorno, recarga, etc, permitindo assim, executar as simulações pretendidas.

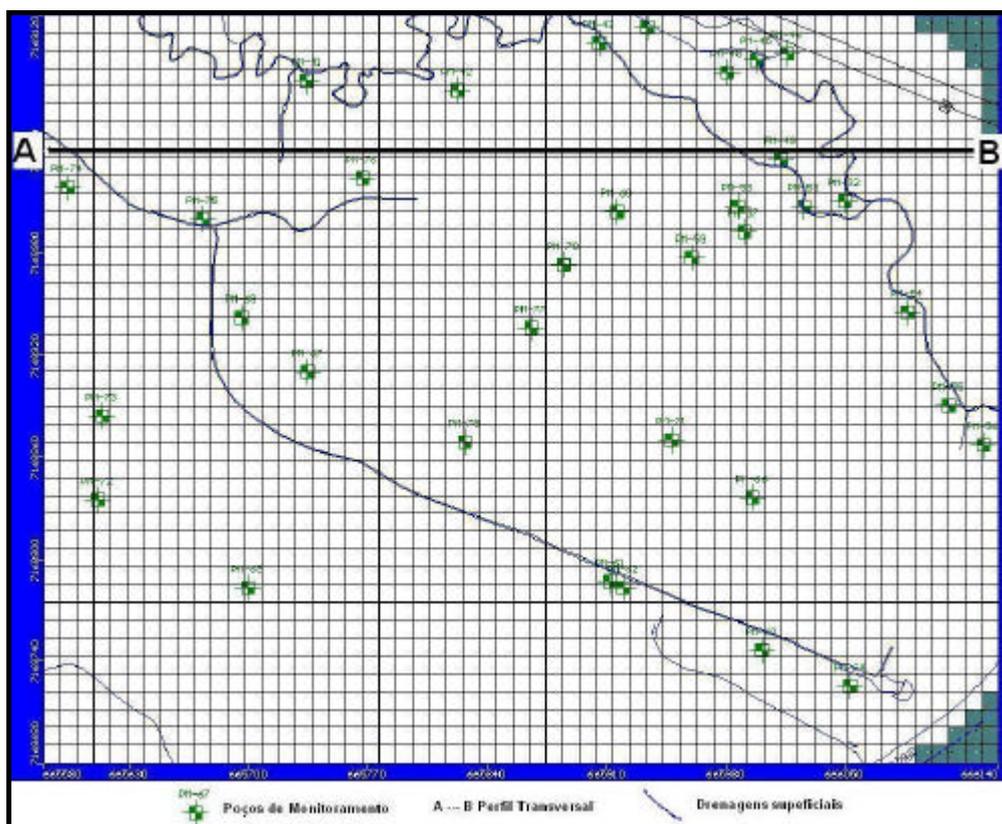


Figura 5.4: Malha regular construída para representar o modelo hidrológico do Alagado 4.

modelo é considerada válida a relação de terça parte da condutividade vertical (componente K_z) em relação às horizontais (componentes K_x e K_y).

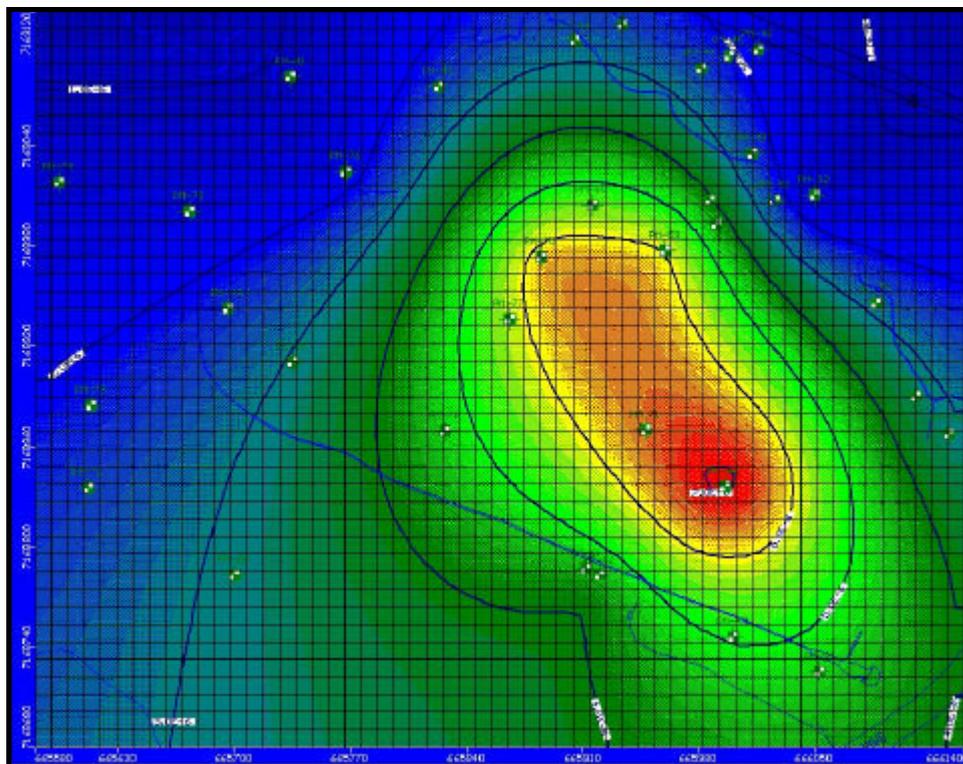


Figura 5.6: Mapa da condutividade hidráulica relativa à camada de argila.

A Tabela 5.1 resume os parâmetros utilizados nas simulações, sendo, em grande parte, obtidos por meio de tabelas extraídas de Fetter (2001) e Feitosa & Filho (1997).

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na modelagem hidrológica

Propriedade		Camada Superior (Argilas)	Camada Inferior (Areias)
Porosidade Total	%	40	30
Porosidade Efetiva	%	5	15
Condutividade Hidráulica (m/s)	K_x	Estimado por krigagem	0,00001
	K_y	Estimado por krigagem	0,00001
	K_z	Estimado por krigagem	0,0000033
Armazenamento Específico (1/m)	Ss	0,0001	0,0015
	Sy	0,05	0,15
Recarga (mm/ano)		35	-

(*) Valores em azul, estimados de Fetter (2001) e Feitosa & Filho (1997).

A modelagem segue com a definição das condições de contorno no modelo matemático de fluxo. É fundamental que se tenha uma boa definição deste parâmetro, pois assim pode-se garantir que o modelo represente a realidade. Algumas considerações e simplificações são realizadas, sempre amparadas no conhecimento de campo sobre o contexto hidrológico regional e das informações extraídas do relatório dos técnicos da UFRGS (Neto & Caicedo, 2000).

Considera-se a água subterrânea como um sistema de aquífero livre, interagindo com a drenagem superficial sob o efeito da pressão atmosférica. Considera-se, também, que o sistema formado por trechos do arroio Saldanha e rio Barigüi, representam as áreas de descarga do sistema, constituindo-se em rios efluentes. Para tanto, são estabelecidas cargas hidráulicas para as superfícies das drenagens, fixando as condições de contorno ao longo dos cursos de água (o programa MODFLOW possibilita a interpolação linear ao longo do curso de água).

A recarga do aquífero é um parâmetro que depende da topografia, da cobertura vegetal, das condições de uso do solo e do substrato geológico. Neste estudo, é considerado único para todo o bloco e é ajustado por meio das simulações, obtendo-se o valor de 30 mm/ano, o que melhor ajustou-se à calibração. Destaca-se que este valor corresponde a, aproximadamente, 2,5% da precipitação média anual para a localidade de Araucária (Pr).

Para se estabelecer às condições de contorno da área, duas boas referências são: observar a superfície obtida através da krigagem ordinária do topo do nível de água (Figura 5.7), que indica uma profundidade média do lençol freático de 0,81 m, e a superfície topográfica da área.

A cada rodada da simulação, comparam-se os resultados das cargas hidráulicas obtidas na simulação com aquelas observadas nos piezômetros. O ajuste da simulação das condições de fluxo é feito mantendo-se constantes todos os outros parâmetros do modelo, tornando variáveis as condições de contorno até se chegar ao melhor resultado. Neste estudo, as condições de contorno estabelecidas são do primeiro tipo, ou Dirichlet, onde o valor da carga hidráulica é mantida constante em função do espaço e do tempo no contorno.

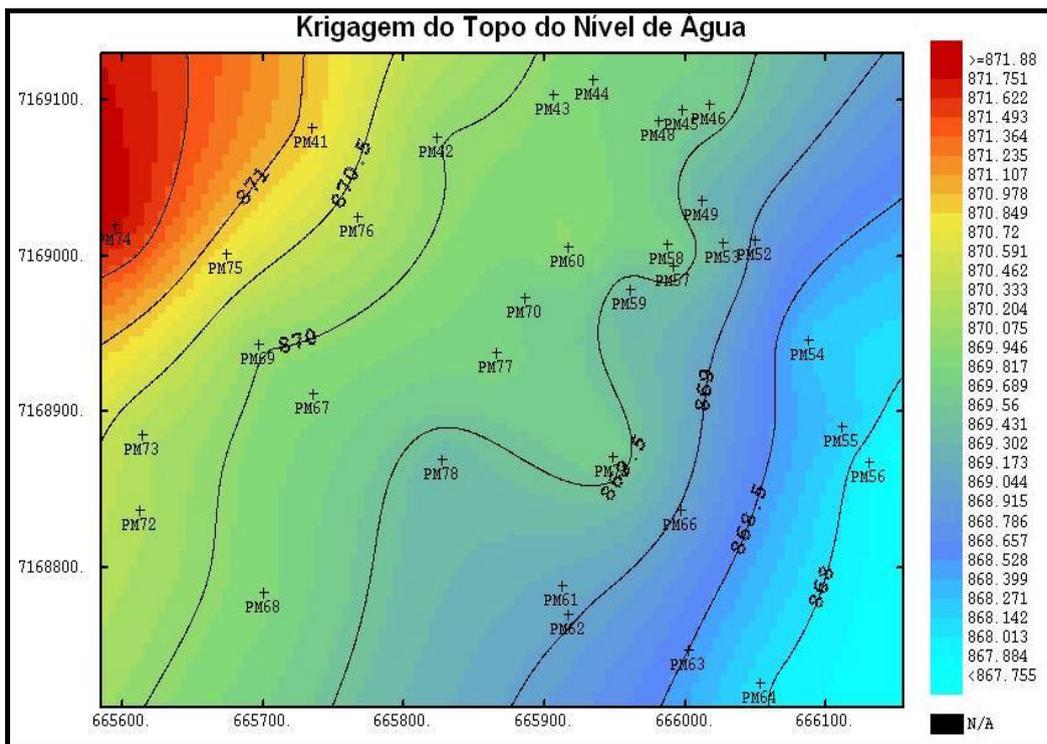


Figura 5.7: Mapa de estimativa da cota do nível de água na área do Alagado 4.

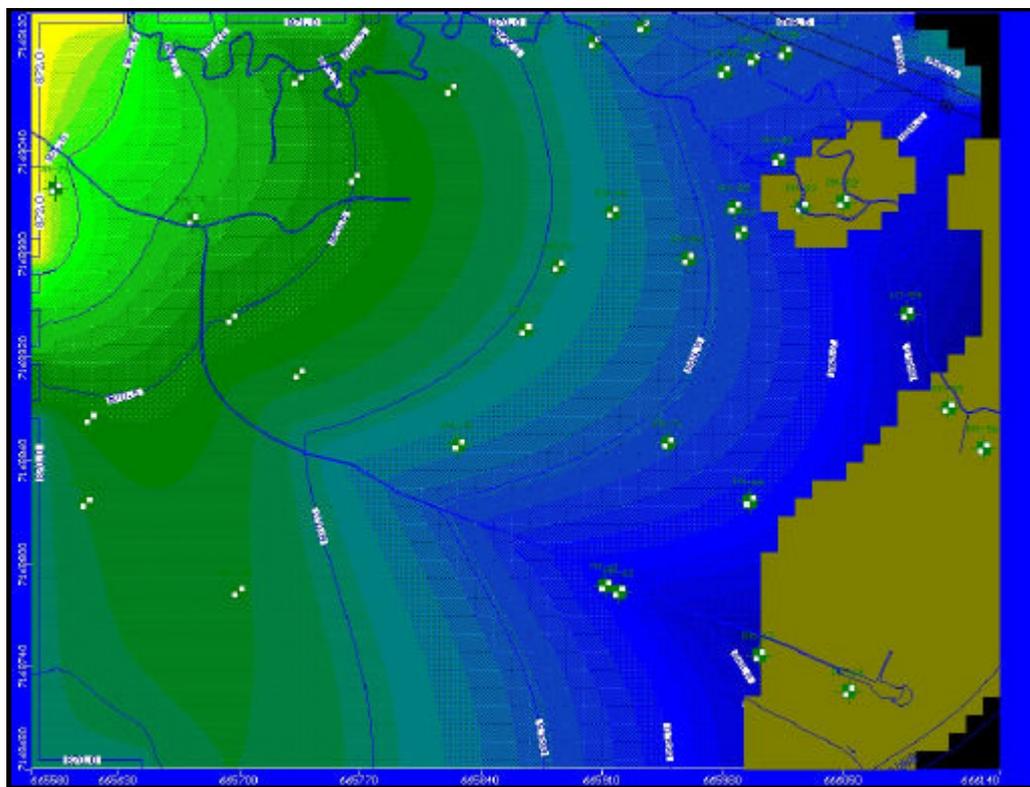


Figura 5.8: Mapa potenciométrico do Alagado 4, conforme modelagem de fluxo.

Para se alcançar o resultado da Figura 5.8, são necessárias diversas simulações que permitem visualizar os gradientes hidráulicos na região. Notar gradientes mais elevados nas encostas do arroio Saldanha e nas bordas norte e oeste da área. O fluxo das águas subterrâneas dá-se a partir dessas áreas, irradiando-se para a várzea e dirigindo-se ao rio Barigüi, como previsto. Dentro do Alagado, as drenagens superficiais exercem influência drenando o fluxo. De forma geral, o fluxo é de noroeste para sudeste até interceptar o rio Barigüi.

A Figura 5.9 apresenta os vetores de velocidade do fluxo no modelo, sendo empregada a ferramenta “*particles tracking*” que rastreia o caminho percorrido por partículas lançadas no domínio do modelo, identificando-se seus caminhos preferenciais. Propositamente, são rastreadas partículas lançadas próximas aos poços PM-61 e PM-76, locais das maiores concentrações de TPH. No caso do PM-61, sequer é possível notar o rastreamento das partículas, pois, após um ano chega ao canal de drenagem que passa ao lado do poço. Quanto às partículas lançadas no PM-76, é possível notar que, respeitados os parâmetros da simulação, uma partícula alcança o arroio Saldanha após 17 anos (partícula mais ao norte), e 36 anos para chegar ao rio Barigüi, nos caso de partículas situadas mais ao sul.

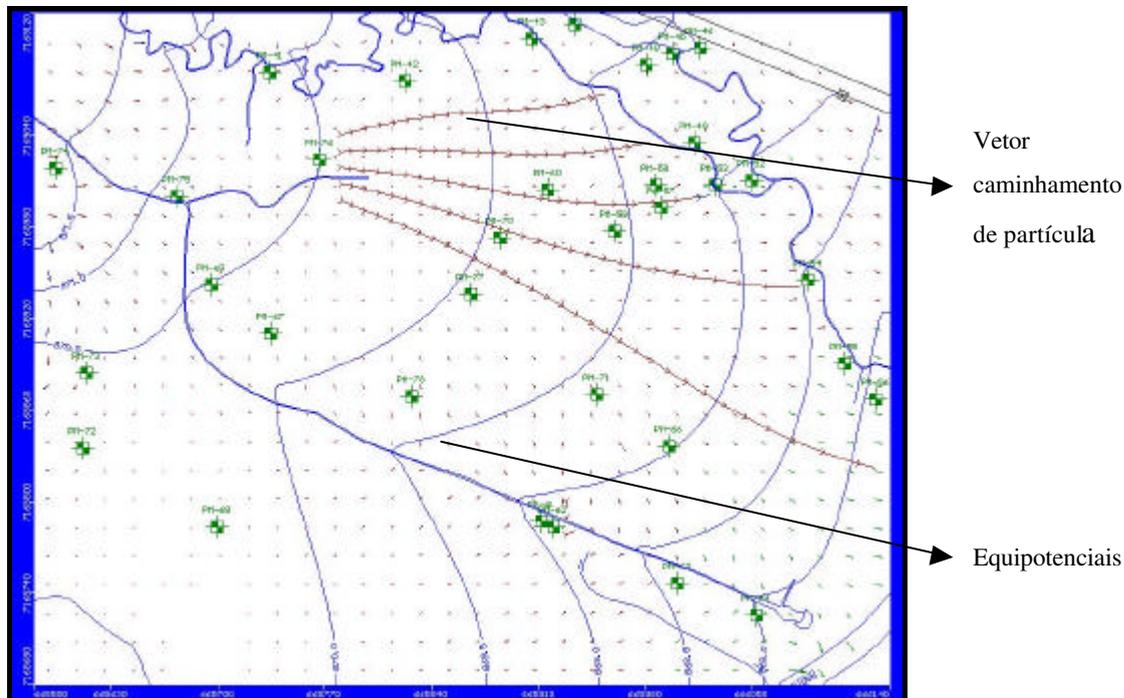
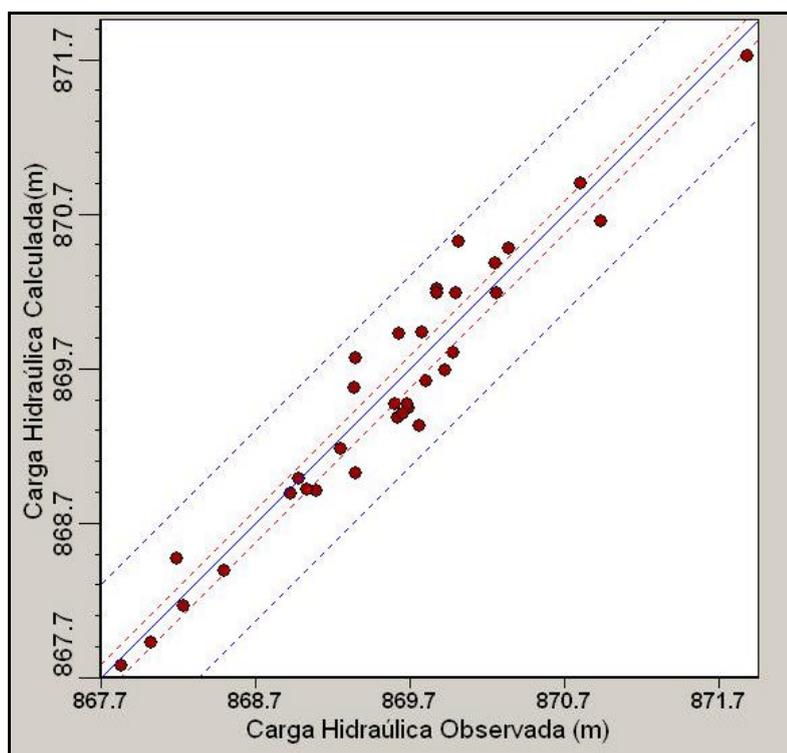


Figura 5.9: Mapa de vetores de velocidade de fluxo e de rastreamento de partículas lançadas no PM-76.

Como critério de calibração quantitativa, o processo de ajuste do modelo é conferido através da reta de regressão formada pelos valores das cargas hidráulicas calculadas *versus* cargas hidráulicas observadas nos poços de monitoramento (Figura 5.10). O ideal é que todas as observações posicionam-se exatamente sobre a linha de 45° de inclinação, sendo que os desvios desta linha representam a imprecisão do resultado do ajuste. O indicado é observar o resultado obtido da média normalizada. Trata-se do erro quadrático médio (raiz quadrada do somatório da diferença, elevada ao quadrado entre as cargas hidráulicas calculadas e observada, dividida pelo número de cargas hidráulicas observadas) dividido pela diferença entre a carga hidráulica máxima e mínima. O resultado obtido na modelagem é de 5,72 % (percentuais inferiores a 5 % são considerados satisfatórios), e corresponde a um erro de 0,23 m no valor de RMS. Estes valores demonstram que o resultado da simulação representa razoavelmente as condições de fluxo das águas subterrâneas na área abrangida pela modelagem.



Número de poços	34
Máximo resíduo (PM-69)	0,51 m
Mínimo resíduo (PM-66)	0,01m
Média Absoluta	0,20 m
Média da Raiz Quadrada (RMS)	0,23 m
Média Normalizada	5,72 %

Figura 5.10: Gráfico de dispersão entre cargas hidráulicas observadas e calculadas.

A mesma metodologia utilizada para modelar o fluxo no modelo geológico construída com base nos dados obtidos através da krigagem com deriva externa é repetida para o modelo obtido apenas com as informações dos poços, sem a utilização dos dados geofísicos. Respeitados os mesmos parâmetros, o resultado obtido foi muito similar ao modelo constituído anteriormente. A Figura 5.11 quando comparada a Figura 5.9 demonstra a diminuta diferença nos resultados obtidos.

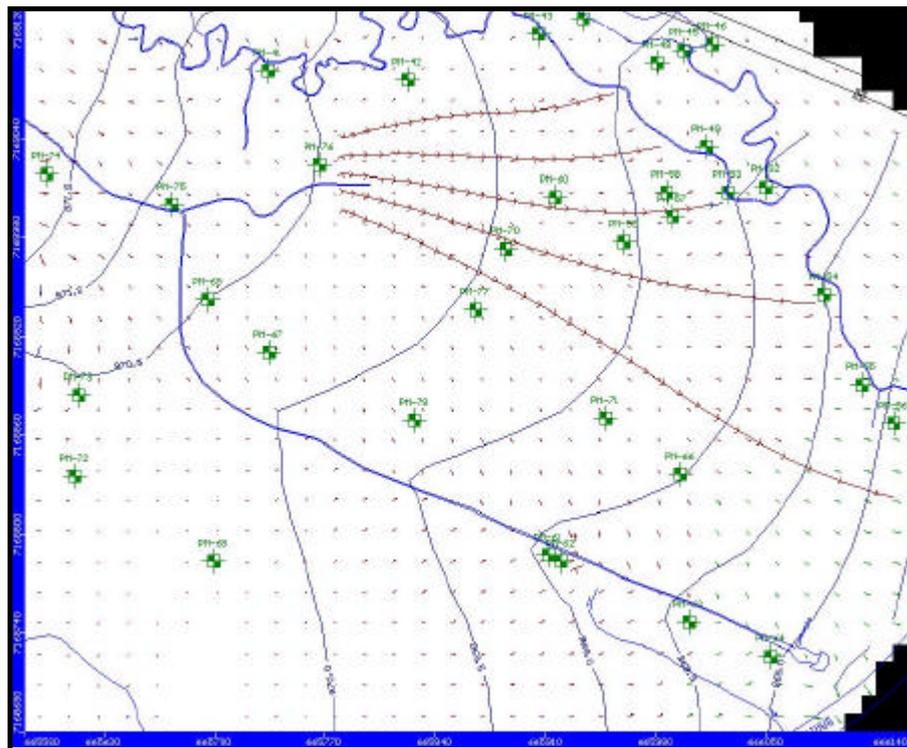


Figura 5.11: Mapa de vetores de velocidade de fluxo e de rastreamento de partículas resultante da modelagem realizada no modelo geológico obtido sem deriva.

5.5. Modelagem de transporte de massa do Alagado 4

A propagação de poluentes em meio poroso é um assunto complexo onde ainda existem muitos problemas não resolvidos em relação à dispersão, sorção e reações dos poluentes (Feitosa & Filho, 1997). Esta pesquisa propõe, de maneira sintetizada, uma modelagem de transporte para a área do Alagado 4.

Para se aplicar um modelo de transporte de poluentes é preciso conhecer o campo de velocidade de fluxo do aquífero, questão solucionada na modelagem anterior.

A equação diferencial que descreve o transporte dispersivo advectivo de um poluente em meio poroso pode ser expressa por (Loureiro, 2002):

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_x} \left[D_{xy} \frac{\partial C}{\partial x_y} \right]}_{\text{Dispersão}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_x} (v_x C)}_{\text{Advecção}} + \underbrace{q_s \frac{C_s}{\theta}}_{\text{Fonte Sumidouro}} - \underbrace{\lambda \left[C + \rho_b \frac{S}{\theta} \right]}_{\text{Reação}} = \underbrace{R \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right]}_{\text{Retardação}} \quad (5.18)$$

Cada um dos termos desta equação é discutido a seguir.

A dispersão hidrodinâmica do poluente deve-se à dispersão mecânica e à difusão molecular. A primeira ocorre devido às variações de velocidades nos poros causados pela resistência das superfícies sólidas, pelos diferentes tamanhos dos poros e pelo desvio do fluido ao redor dos grãos. A difusão molecular é o processo pelos quais constituintes moleculares se movem na direção dos seus gradientes de concentração. Procura-se expressar esse fluxo em termos dos valores médios de concentração e velocidade, sendo expresso através de seu gradiente de concentração (Lei de Fick) (Feitosa & Filho, 1997), ou seja:

$$q^* = -D_{xy} \frac{\partial C}{\partial x_y} \quad (5.19)$$

onde:

q^* = fluxo difusivo de massa;

D_{xy} = coeficiente de difusão molecular do soluto ;

$\frac{\partial C}{\partial x_y}$ = gradiente de concentração do soluto.

Desprezando-se a difusão molecular e considerando-se o movimento da água da direção x , o coeficiente de dispersão pode ser representado como (Feitosa & Filho, 1997):

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L v \\ D_{yy} &= \alpha_T v \\ D_{zz} &= \alpha_T v \end{aligned} \tag{5.20}$$

onde:

D_{xx} , D_{yy} e D_{zz} representam os componentes do coeficiente de dispersão mecânica ao longo dos eixos x , y e z ;

α_L representa a dispersividade longitudinal;

α_T representa a dispersividade transversal;

v representa a velocidade efetiva.

A advecção responde pelo processo de transporte das substâncias dissolvidas na mesma velocidade que o fluxo das águas subterrâneas, sendo preponderante na maioria dos problemas práticos de contaminação. O fluxo advectivo é expresso na equação pelo termo $\frac{\partial}{\partial x_x}(v_x C)$, onde (Loureiro, 2002):

v_i representa a velocidade linear média;

C representa a concentração inicial do soluto;

$\frac{\partial}{\partial x_x}$ o gradiente hidráulico em x .

O termo que relaciona a entrada ou saída de contaminante, $q_s C_s$, representa a massa de soluto que entra no domínio do modelo (fonte), ou a massa que sai (sumidouro). O simulador admite condições de contorno podendo ser tanto pontuais como espacialmente distribuídas (Loureiro, 2002).

O termo reações químicas da expressão 5.18 engloba os efeitos das reações bioquímicas e geoquímicas durante o transporte da contaminação. Consideram-se dois tipos de reações químicas, ou seja, reações que resultam da transferência de massa de soluto entre as fases fluidas e sólidas do meio poroso (sorção) e as reações de primeira ordem. Dentre os parâmetros

requeridos estão λ que representa a taxa de degradação para a substância dissolvida, C que representa a concentração inicial do soluto e, ρ_b que representa a densidade seca do solo, S que representa a quantidade de soluto sorvida por unidade de peso da fase sólida e θ a porosidade. O simulador utilizado neste estudo trata o decaimento das reações como irreversível e de primeira ordem (ex. decaimento radioativo) (Loureiro, 2002).

O retardamento é um fenômeno em que a velocidade de propagação do poluente é menor que a da água subterrânea. As causas do retardamento vêm sendo pesquisadas e entre elas encontram-se a absorção e a adsorção do poluente pelos grãos do material poroso do aquífero (Feitosa & Filho, 1997).

Na modelagem realizada os seguintes parâmetros e considerações são realizados: os efeitos das reações cinéticas e sorção entre o elemento dissolvido na água subterrânea foram desconsiderados; as concentrações iniciais da contaminação (TPH), expressos em mg/L, estão de acordo com os valores que constam no relatório dos técnicos da UFRGS, ou seja, 93 mg/L para o poço PM-76 e 51 mg/L para o PM-62; os poços PM-62 e PM-76 constituem-se fontes constantes de recarga destas concentrações ao longo do período simulado, ou seja 50 anos; as áreas delimitadas de ocorrências das maiores concentrações estão em consonância com as áreas delimitadas pelos algoritmos geoestatísticos (Figura 4.26); o valor estimado para a dispersividade longitudinal é de 20 metros e da razão entre a dispersividade horizontal e vertical com relação a longitudinal de 0.05 (valores estimados através de Fetter, 2001). Ajustados todos os parâmetros e estabelecidas as condições citadas, o resultado da simulação da pluma de contaminação ao longo de 50 anos na área do Alagado 4, pode ser observada por meio da Figura 5.12.

É importante notar que o cenário mais preocupante se estabelece na evolução da pluma próxima ao poço PM-62, pois a drenagem situada que ao lado recebe todo o fluxo da zona saturada, e por conseguinte da contaminação da região.

Finalmente, destaca-se que este modelo não está calibrado, ou seja, não foram realizadas aferições para se garantir seus resultados.

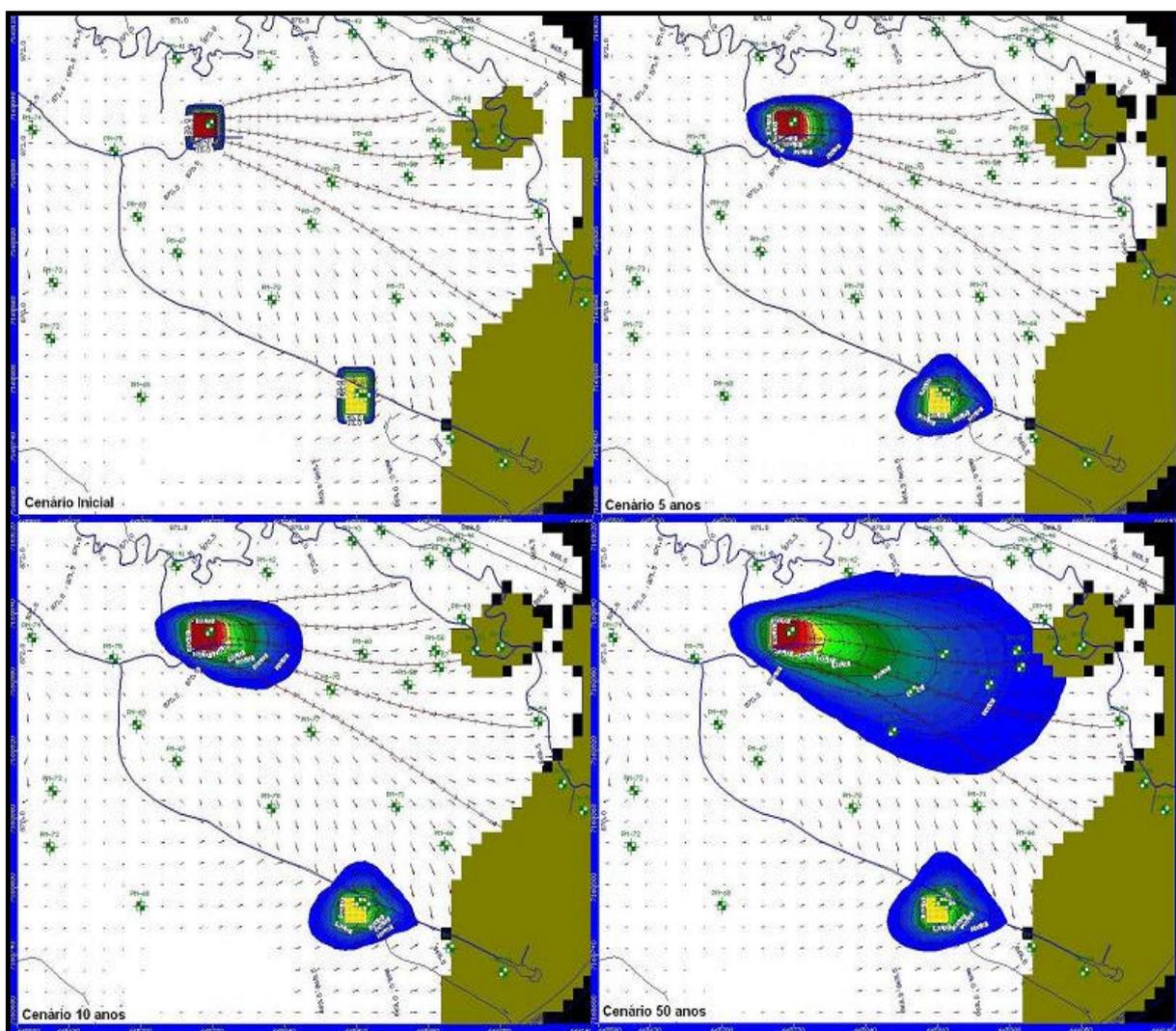


Figura 5.12: Evolução da pluma de contaminação (TPH) na área do Alagado 4: acima à esquerda, cenário inicial; acima à direita, cenário após 5 anos; abaixo à esquerda cenário após 10 anos; abaixo à direita, cenário após 50 anos.

Capítulo 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Danos ecológicos causados por derramamentos de óleo podem ser maiores do que revela uma primeira análise. Este trabalho busca fazer uma revisão conceitual e de aplicação de algumas ferramentas usualmente empregadas na caracterização de um acidente ambiental (GPR, algoritmos geoestatísticos e modelagem de fluxo e transporte), descrevendo a aplicação destes métodos e, fundamentalmente, integrando seus resultados. O estudo tem por base o acidente ocorrido em julho de 2000 na Refinaria Presidente Vargas, Município de Araucária, Estado do Paraná.

Inicialmente, os estudos se concentram na caracterização geológica da área. Por meio da revisão bibliográfica geológica da área e da interpretação de imagens aerofotográficas, é concebido um modelo geológico conceitual capaz de assegurar uma representação fiel do sistema sedimentar e, por conseguinte, simular corretamente as condições hidrológicas das águas subterrâneas.

A etapa seguinte é integrar as informações geofísicas. Bermejo et al. (1997), Brewster & Annan (1994), Daniels et al. (1995), Dehaine (2001) e Sauck (1998 e 2000) identificam através da ferramenta de GPR plumas de contaminação de hidrocarbonetos, valendo-se de situações geológicas muito particulares. Nesta dissertação, a ferramenta de GPR não produziu os resultados esperados para a área do Alagado 4. Por ser uma ferramenta cuja qualidade de aquisição é fortemente influenciada pela condutividade (ou resistividade) elétrica do solo, locais onde o nível do lençol freático seja aflorante ou quase aflorante não permitem uma boa penetração das ondas de radar. Em consequência deste fato, sítios essencialmente argilosos não são indicados para o uso desta ferramenta. Embora as seções de radar não permitam uma interpretação, através das características do sinal, onde se possa estimar a extensão física do derramamento ou sua

penetração no solo, consegue-se extrair dos dados informações importantes para se refinar o modelo geológico concebido.

Neste sentido, uma aquisição 2D, com linhas bem espaçadas para permitir uma grande cobertura areal, faria mais sentido que a aquisição 3D, restrita a uma pequena porção do terreno, e que, acima de tudo, não contemplou os locais onde, em se tratado de zona saturada, apresentaram os maiores valores de contaminação. Outro aspecto relevante seria testar antenas de menores frequências (50 MHz e/ou 100 MHz) para permitir à onda de radar uma maior penetração. Assim, seria possível evidenciar outros contatos, por exemplo, a da cobertura sedimentar com o embasamento. É evidente, que técnicas mais sofisticadas de aquisição, tal como uma aquisição multicanal, permitiria uma melhor resolução nas seções radar estratigráficas. Sugere-se testar outras ferramentas de natureza geofísica, como exemplo, a eletroresistividade, buscando mapear anomalias de condutividade no solo indicativas da pluma de contaminação.

A Geoestatística tem se mostrado uma importante ferramenta de apoio no diagnóstico ambiental. Goovaerts (1997) explora diferentes algoritmos geoestatísticos com dados de contaminação ambiental em um amplo estudo desenvolvido na região de Jura (Suíça). A comunidade científica europeia já prepara a quinta edição do geoENV (Geostatistics for Environmental Applications), onde a Geoestatística é aplicada em problemas que variam do monitoramento de águas subterrâneas, poluição do ar, estimativa climatológica, análises de sítios contaminados, modelagem de traçadores ambientais etc.

A pesquisa demonstra a potencialidade dos algoritmos de Krigagem Ordinária (KO), Krigagem com Deriva Externa (KDE) e Cokrigagem Colocalizada, na construção de um modelo geológico onde se integram informações geológicas e geofísicas. Por sua vez, a Simulação Estocástica permite o acesso ao campo probabilístico e das incertezas dos dados. A agilidade na implementação dos algoritmos e a facilidade de entendimento de seus resultados deixam claro a potencialidade destas ferramentas. Contudo, deve-se lembrar que os algoritmos apresentam suas limitações. A krigagem, por exemplo, apresenta os conhecidos efeitos de suavizações dos dados, fato este minimizado quando há disponibilidade de um atributo secundário para correlação.

As Figuras 4.23 e 4.25 resumem a potencialidade da Simulação Estocástica além de revelar a necessidade de ações emergenciais próximas aos poços PM-62 e PM-76, e ao entorno.

A modelagem de fluxo mostra-se uma ferramenta indispensável no planejamento da remediação ambiental. Ao incorporar informações do fluxo das águas subterrâneas, a modelagem é capaz de delinear as áreas merecedoras de ações de proteção ambiental. Já o fluxo de massa é capaz de prever a migração da pluma de contaminação, considerando sua atenuação natural, aferindo seu estado ao longo do tempo, neste estudo, ao longo de 50 anos (figura 5.12). Assim, é possível programar, por meio da simulação de cenários futuros, formas de remoção ou contenção hidráulica e física da pluma de contaminação. Merece destaque a evolução da pluma de contaminação ao entorno do poço PM-62, pois a existência de uma drenagem secundária muito próxima a sua posição faz com que pluma migre muito rapidamente para o curso de água. Por sua vez, os parâmetros da simulação de fluxo foram pouco explorados neste estudo. Essa modelagem é merecedora de uma abordagem mais detalhada, principalmente, em relação à sensibilidade de parâmetros como a dispersividade longitudinal e de suas razões em relação à horizontal e vertical.

Recomenda-se extrair periodicamente (a cada 6 meses) os valores de TPH dos piezômetros, buscando validar e/ou calibrar o sistema e para se ter um controle da evolução da pluma. Em particular, os poços de monitoramento PM's 57, 58, 59, 60, 70 e 77 devem mostrar valores de TPH sendo acrescidos ao longo dos anos. Igualmente importante é realizar análises mais específicas da contaminação, por exemplo, quantificar os compostos aromáticos presentes no hidrocarboneto (BTEX), esses sim, comprovadamente tóxicos à saúde humana.

Destaca-se que, para se construir um modelo hidrogeológico para uma determinada área, é fundamental que o técnico ou estudante ou profissional possua um bom conhecimento teórico do assunto (Hidrogeologia) e que reúna uma certa experiência na área, pois pequenas mudanças nos parâmetros hidráulicos (ex.: condutividade hidráulica, recarga etc) produzem resultados muito diferentes.

Finalmente, esta dissertação pretende contribuir ao apresentar um sequenciamento de atividades fundamentais à investigação ambiental, mostrando acertos e erros de um estudo de caso real.

Referências Bibliográficas

- Bermejo, J. L.; Sauck W. A.; Atekwana E. A. Geophysical Discovery of a New LNAPL Plume at the Former Wurtsmith AFB, Oscoda, Michigan, *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. XVII, n. 4, p. 131-137, 1997.
- Bleiner, C.; Perseval, P.; Rambert, F; Renard, D.; Touffait, Y. *Isatis Software Manual* v.4.05. Geovariances & Ecole des Mines de Paris, Paris, France, March, 2000, 585p.
- Brewster M. L. & Annan P. A. Ground-penetrating radar monitoring of controlled DNAPL release: 200 MHz radar *Geophysics* v. 59, n. 8, p. 1211-1221, 1994.
- Chilés J.P. & Delfiner P. *Geostatistics. Modeling Spacial Uncertainty*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999, 695 p.
- Corá C.A.G. *Distribuição de Pesos e Influência das Variáveis na Cokrigagem*. Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 132p. Dissertação (Mestrado).
- Daniels, J.D.; Roberts. R. & Vendl M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants *Journal of Applied Geophysics* n.33, p.195-207, 1995.
- Davis, J. L. & Annan, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, n.5, p. 531-551, 1989.
- Dehaine, J. *Detecção da Pluma de Contaminação de Hidrocarbonetos em Subsuperfície pelo Método de Radar de Penetração*. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2001. 100 p. Tese (Doutorado).
- Dobrin M. B. *Introduction to Geophysical Prospecting* New York: MacGraw-Hill Inc., 3^a. ed., 623 p, 1976.
- Duarte, O. *Dicionário Enciclopédico Inglês – Português de Geofísica e Geologia*. Rio de Janeiro: PETROBRAS/SBGF, 1997, 304p.
- Feitosa, F. A. C. & Filho J. M. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, 412 p.

- Fetter, C.W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall, 4^a ed., 2001, 598 p.
- Gandolfo, O.C.B. *Aplicação da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e do Radar de Penetração no Solo (GPR): Um Estudo Comparativo*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1999. 140 p. Dissertação (Mestrado).
- Goovaerts, P. Kriging versus Stochastic Simulation for Risk Analysis in Soil Contamination. In: *GeoENV – GEOSTATISTICS FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996, p. 247-258.
- Goovaerts, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York/Oxford: Oxford University Press, 1997, 483 p.
- Greenhouse, J.P. Environmental Geophysics: It's about time. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, v.10, n.1, p. 32-34. 1991.
- Guerra, P. A. G. *Geoestatística Operacional*. Brasília: Ministério das Minas e Energia, DNPM, 1988, 145 p.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, USA: Oxford: University Press, 1989, 552 p.
- Journel, A. G. & Huijbregts C.H.J. *Mining Geostatistics*. London: Academic Press, 1978, 600 p.
- Journel, A. G. *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*. Stanford: Stanford University, Applied Earth Science Department, 1987, 135 p.
- Knight, R. & Paulete, T. The role of ground penetrating radar and geostatistics in reservoir description *The Leading Edge* .v16, n.11, p.1576-1582, November, 1997.
- Kozciak, S.; Rostirolla, S. P. & Fiori, A. P. Análise Comparativa entre Métodos de Interpolação para Construção de Modelos Numéricos de Terreno. *Boletim Paranaense de Geociências*. ed. UFPr, v. 47, p. 19-30, 1999.
- Loureiro, C. O. *Modelagem Matemática de Fluxo e Transporte em Águas Subterrâneas* (Notas de Curso). Waterloo do Brasil. São Paulo, agosto, 2002.
- Miall, A. D. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Berlin: Springer, 1996, 582p.
- MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. Projeto Geotecnia – Região Metropolitana de Curitiba. Mapeamento Geológico – Geotécnico nas Folhas COMEC A137, A138, A139 e A140. v. I, Curitiba, 1996.

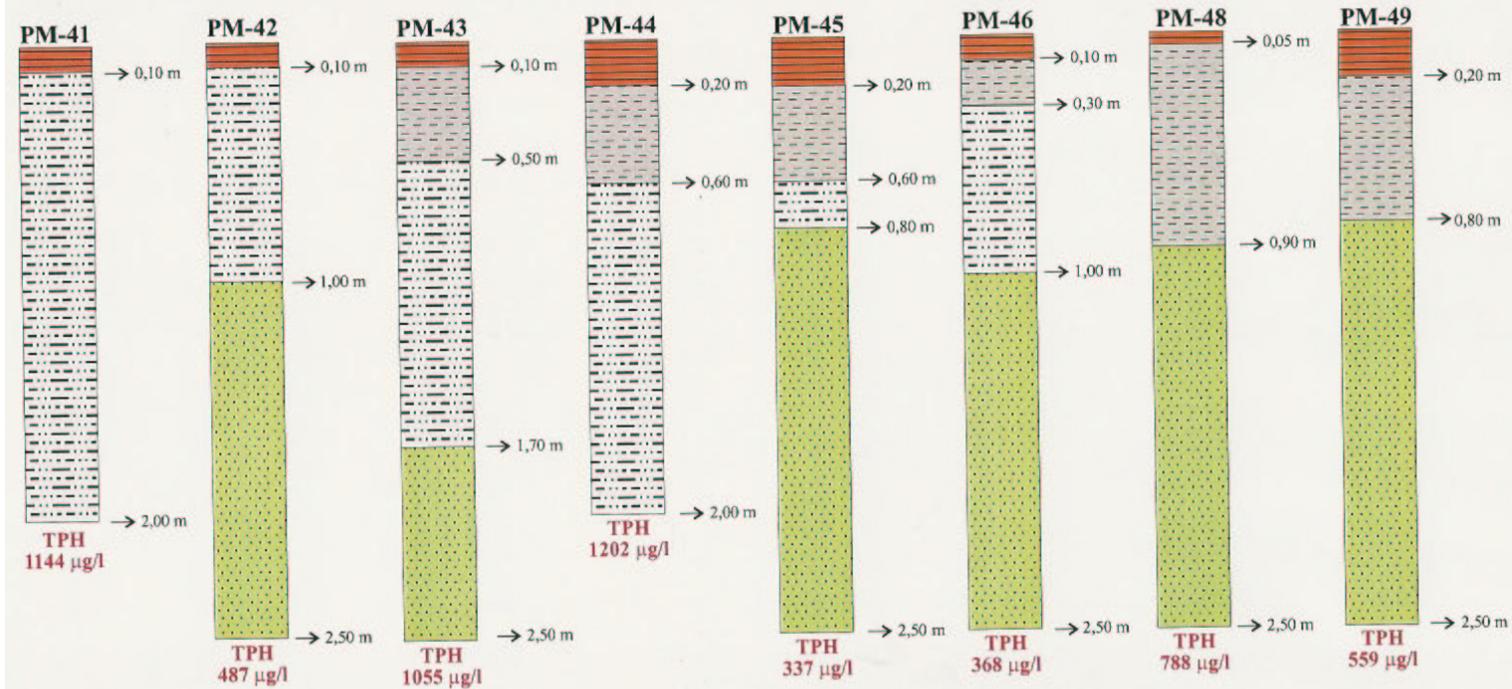
- Nabighian, M. N. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Theory*. Tulsa: SEG, v.1, n.3, 1987, 513 p.
- Neto, A. C. B & Caicedo, N. L. Relatório Interno Petrobrás: Subprojeto Contaminação do Lençol Freático na Área do Ponto Zero. Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAURGS). Curitiba, 93 p., 2000.
- Oliviera, M. L. *Análise das Incertezas Envolvidas na Modelagem de Reservatórios no Contexto Geoestatístico*. Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 115p. Dissertação (Mestrado).
- Overgaard, T. & Jakobsen. P. R. Mapping of Glaciotectonic Deformation in a Ice Marginal Environmental with Ground Penetrating Radar *Journal of Applied Geophysics*, n. 47, p. 191-197, 2001.
- Parasnis, D. S. *Principles of Applied Geophysics*. London: Chapman and Hall. 5^ª ed., 1997, 429p.
- Parasnis D. S. *Principios de Geofísica Aplicada* Madrid: Paraninfo, 1970, 203 p.
- Ramac/GPR Manual do instrumento na versão 2.28. Malä-Geoscience
- Reynolds, J. M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Wiley & Sons Ltda, Cap.12: Ground Penetrating Radar, 1997, p.682-749.
- Remacre, A. Z. Krigagem da Média. *Cadernos de Geociências*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 9-16, 1996.
- Rivoirard, J. Which Models for Collocated Cokriging? *Mathematical Geology*, v. 33, n. 2, p. 117-131, 2001.
- Salamuni, E. & Salamuni, R. Contribuição à Geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). *Boletim Paranaense de Geociências*. Ed. UFPr, v. 47, p. 123-142, 1999.
- Sauk, W. A. A model for de resistivity structure of LNAPLS plumes and their environs in sandy sediments, *Journal of Applied Geophysic*, n. 44, p. 151-165, 2000.
- Sauk, W. A.; Atekwana E. A. & Nash. M. S. High Conductivities Associated with an LNAPL Plume Imaged by Integrated Geophysical Techniques. *Journal of Applied Geophysics*, v. 2, n. 3, p.203-212, 1998.
- Sharma, P.V. *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997, 475p.
- Silva, A. Contaminação de Aquífero por Hidrocarbonetos: Tratamento de Dados e Interpretação. In: 37^º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, SBG/SP, São

- Paulo, p. 42-33, 1992.
- Soares, C. M. *Análise Estratigráfica e Geoestatística de Reservatórios Deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA)*. Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 120p. Dissertação (Mestrado).
- Suguio, K. *Rochas Sedimentares*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1980, 500 p.
- Steeple, D. Uses and techniques of environmental geophysics *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, p. 30-31, September 1991.
- Teixeira, W.; Toledo M. C. M.; Fairchild T. R.; Taioli F. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000, 557 p.
- Visual MODFLOW. User's Manual, Waterloo: Waterloo Hydrogeologic Inc, 2002, 370p.
- Wackernagel, H. *Multivariate Geostatistics. An introduction with applications*. Springer: Springer-Verlag, 1995, 256 p.
- Xu W., Tran T.;Srivastava, R.M.; Journel, A.G. Integrating Seismic Data in Reservoir Modeling: The Collocated Cokriging Alternative. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 67, Washington, USA, 1992, p.833-842. (SPE Paper 24742).

ANEXOS

Anexo 1

Caracterização dos corpos geológicos nos poços de monitoramento

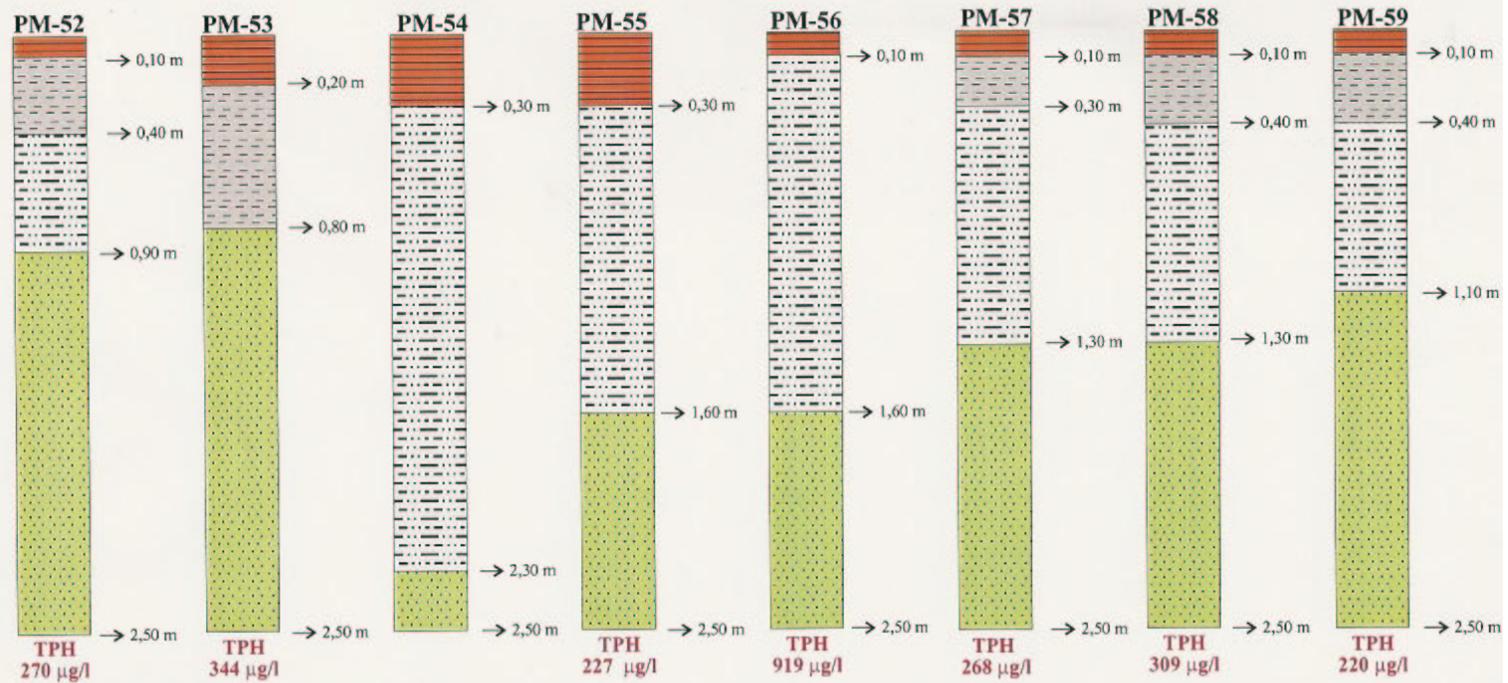


Legenda

-  Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

Anexo 1

Caracterização dos corpos geológicos nos poços de monitoramento

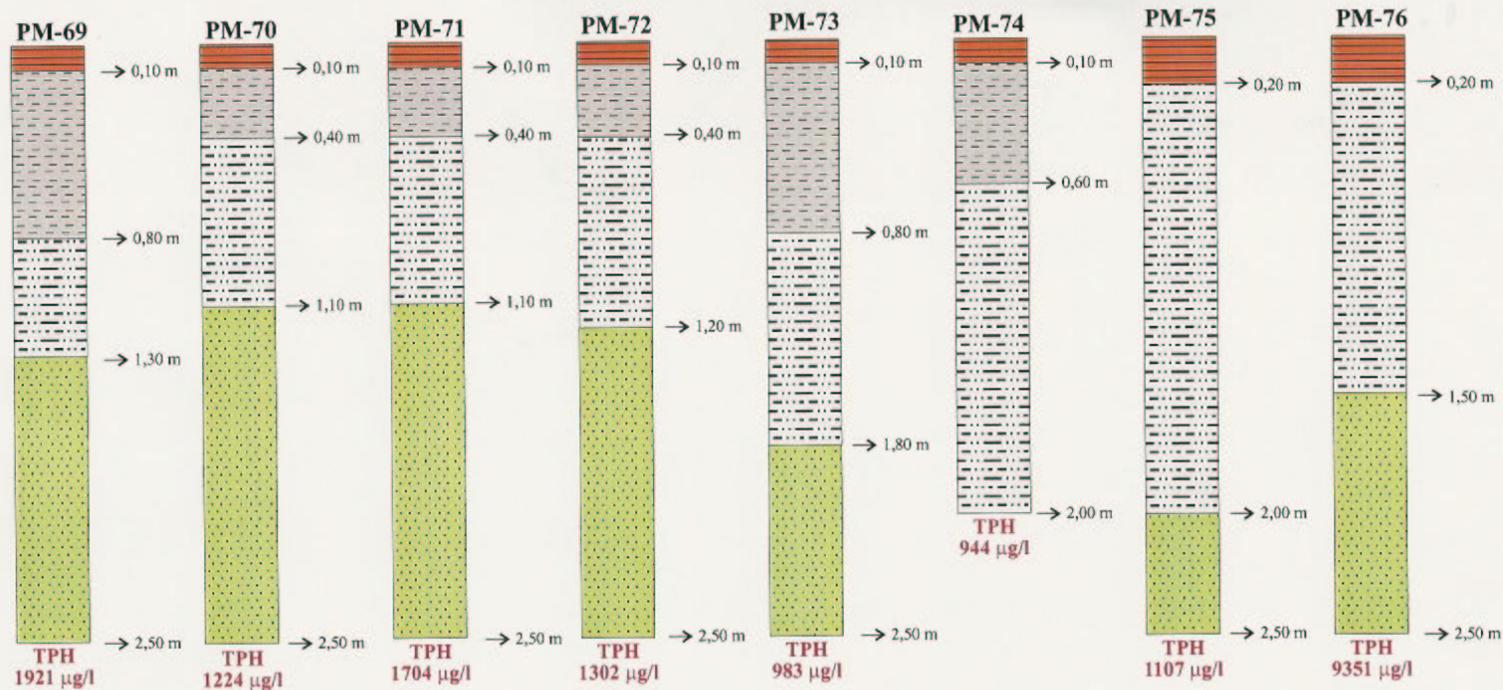


Legenda

- Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
- Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

Anexo 1

Caracterização dos corpos geológicos nos poços de monitoramento

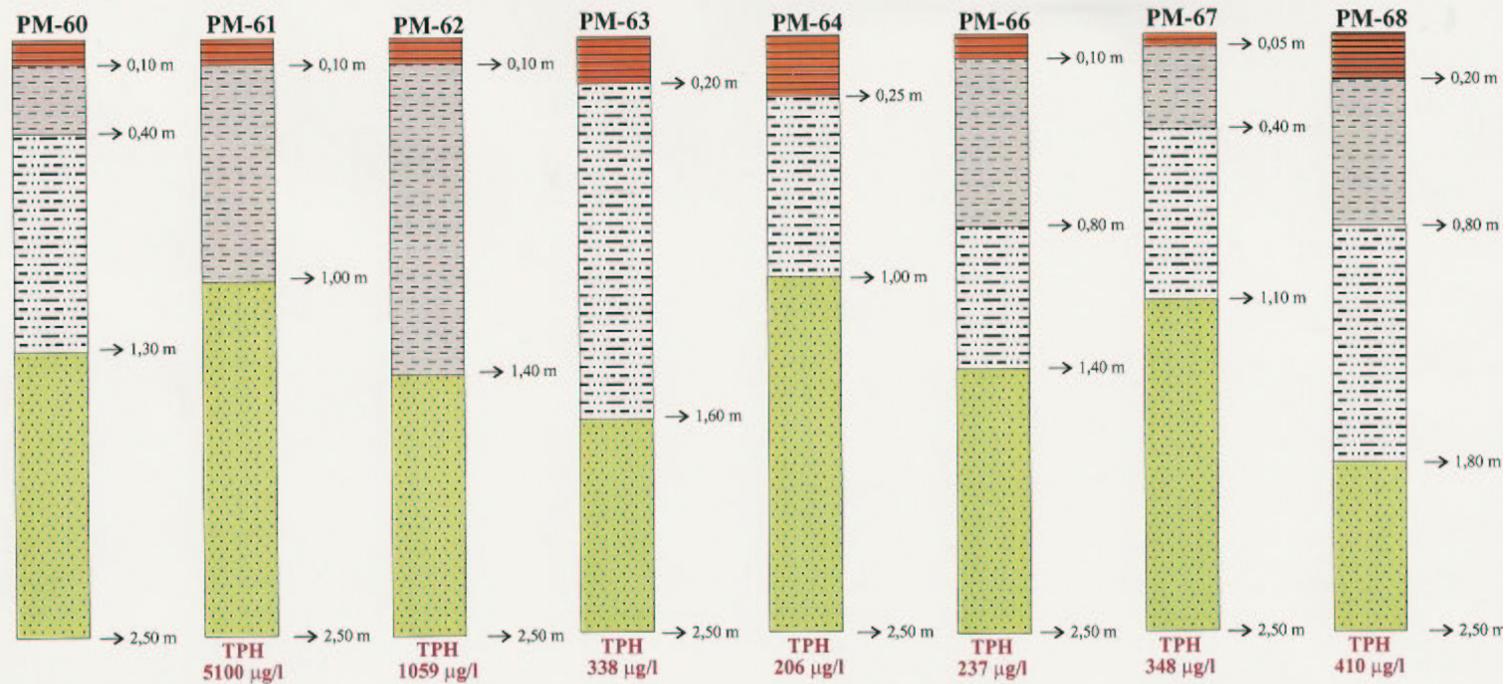


Legenda

- Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
- Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

Anexo 1

Caracterização dos corpos geológicos nos poços de monitoramento

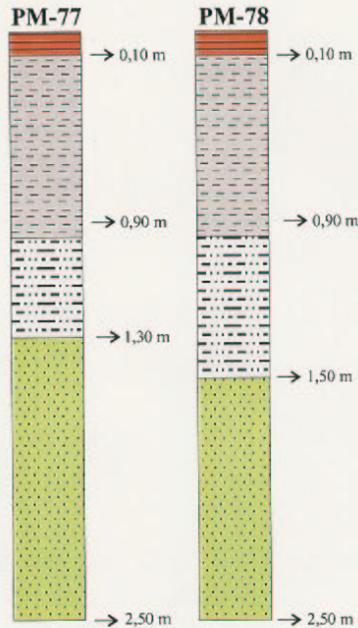


Legenda

- Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
- Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
- Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

Anexo 1

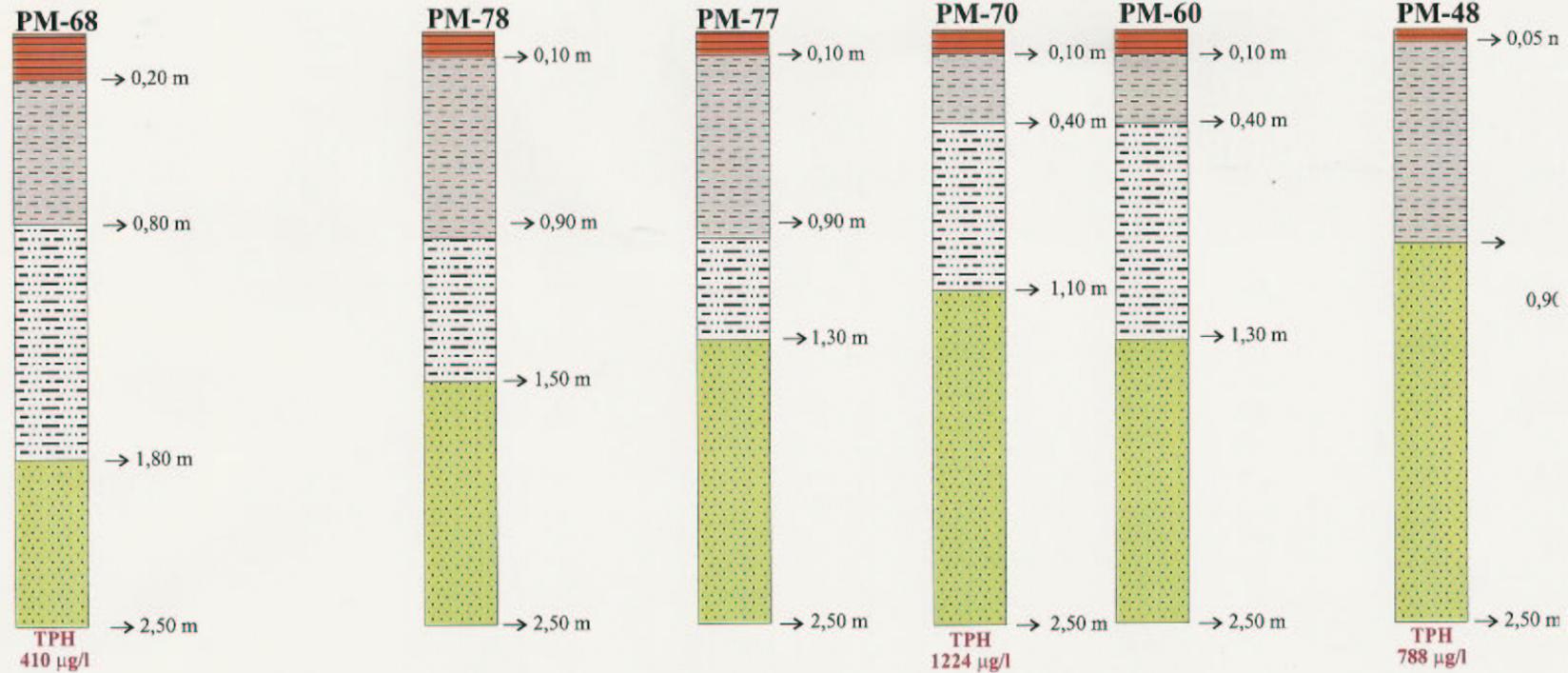
Caracterização dos corpos geológicos nos poços de monitoramento



Legenda

-  Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

Seção transversal à área contaminada

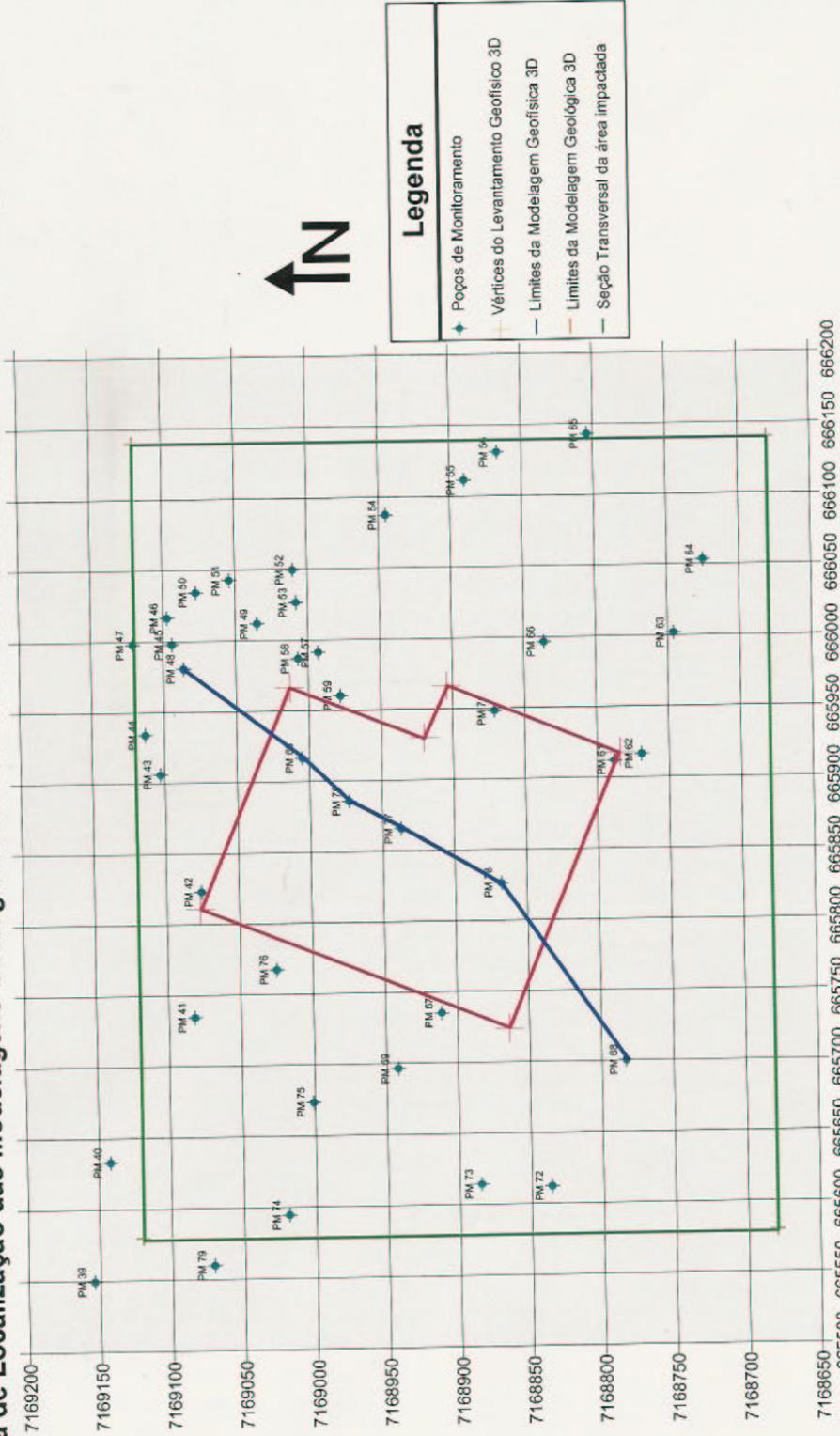


Legenda

-  Camada marrom, textura siltica-argilosa, rico em matéria orgânica, estrutura granular, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza escuro, textura siltica-argilosa, presença de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza a cinza esverdeada, textura siltico-argilosa, ausência de matéria orgânica, sem estrutura, plástico e pegajoso.
-  Camada cinza claro a cinza esverdeado, textura arenosa fina, bem selecionada, sem estrutura.

ANEAU 4

Mapa de Localização das Modelagens Geológica e Geofísica e dos Poços de Monitoramento Hidrogeológico




Universidade Estadual de Campinas
Área do projeto GPR 3D - Alagado 4 - REPAR
Autor : Rui Cesar Sansonowski

