

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE TERRENOS  
CRISTALINOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO**

**MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS**

Orientador: Dr. Carlos André B. Mendes

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

Porto Alegre, RS  
Novembro de 1998

**Freitas, Marcos Alexandre de**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE  
TERRENOS CRISTALINOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO**

Marcos Alexandre de Freitas - Porto Alegre: UFRGS, 1998.  
130 páginas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia-  
Área de Sensoriamento Remoto aplicado à Geologia. Porto Alegre, 1998.

1. Hidrogeologia

2. Geoprocessamento

3. Meio Fraturado

4. Sensoriamento Remoto

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à Valéria pela paciência, incentivo, ajuda, companheirismo, e amor, que foram imprescindíveis para eu chegar até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador e amigo Carlos André pelo apoio e pelo exemplo de profissionalismo desenvolvido ao longo das etapas deste trabalho.

Ao Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto que permitiu mais esta etapa de crescimento acadêmico e profissional.

A CAPES pela bolsa concedida durante a realização do curso.

Ao Prof. Nelson Lisboa pelas discussões geológicas e hidrogeológicas, e sobretudo pela grande amizade despertada.

Ao grande amigo e primo Dácio pelo auxílio na informática e desenvolvimento de programas fundamentais para a realização desta pesquisa.

Aos funcionários e professores do Centro de Sensoriamento Remoto, bem como o pessoal da segurança; Adriano e Antônio.

Aos colegas do curso pelo companheirismo, amizade e bons momentos vividos, em especial ao Márcio, Glauco, Rose, Salim, Sérgio, e Viviane.

Ao departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da UFRGS pelo empréstimo das fotografias aéreas e das imagens utilizadas.

Às bibliotecárias do IPH, pela atenção despendida, em especial a Bete e a Jussara.

Ao Alfonso Risso pelos programas cedidos utilizados em algumas etapas de geração do MNT.

Às empresas Corsan, Hidrogeo, Hidrocon e Coperbrás pelas dados dos pontos cedidos.

À CPRM pela liberação de horário que possibilitou a conclusão deste trabalho.

A Lily que esteve sempre ao meu lado fazendo companhia nas longas horas de trabalho junto ao computador.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo dados em todas as etapas de minha vida.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores representativos de vazões específicas para alguns tipos litológicos (Adaptado de Johnson apud Todd,1980).....	13
Tabela 2.2 Comparação entre a produtividade de poços em terrenos cristalinos em clima úmido e clima árido. Adaptado de Larsson (1984).....	19
Tabela 2.3 Resolução espectral do sistema LANDSAT TM5.....	22
Tabela 2.4 Operadores de lógica Booleana (Adaptada de Burrough, 1986).....	46
Tabela 3.1 Base de dados utilizada na pesquisa.....	60
Tabela 3.2 Representação dos pontos obtidos pela digitalização das curvas e pontos das cartas topográficas, necessários para a geração do MNT.....	62
Tabela 4.1 Demonstrativo do balanço hídrico para a região elaborado com médias históricas dos dados do 8º Distrito de Meteorologia (adaptado de Brum e Freitas, 1992).....	71
Tabela 4.2 Estatísticas dos parâmetros envolvidos no cálculo do índice de fraturamento.....	90
Tabela 4.3 Estatística dos principais parâmetros analisados nos poços construídos no sistema aquífero fraturado.....	99
Tabela 4.4 Notas baseadas na idade, mineralogia, granulometria, estado de deformação e grau de alteração, das unidades litoestratigráficas.....	102
Tabela 4.5 Classes de declividades obtidas a partir do modelo numérico do terreno, com seu respectivo potencial.....	102
Tabela 4.6 Classes de uso do solo e sua influência no comportamento do aquífero.....	103
Tabela 4.7 Reclassificação dos parâmetros em função de suas notas relacionadas ao favorecimento da ocorrência de água subterrânea.....	103
Tabela 4.8 Distribuição dos potenciais obtidos pela lógica booleana operada através da soma dos parâmetros.....	107
Tabela 4.9 Peso de cada parâmetro para lógica binária-soma-ponderada.....	108
Tabela 4.10 Distribuição dos potenciais obtidos pela lógica booleana - soma ponderada.....	110
Tabela 4.11 Limites das funções de pertinência fuzzy para os parâmetros envolvidos na avaliação do potencial hidrogeológico.....	113
Tabela 4.12 Freqüência das classes de potencial obtida pela soma dos planos fuzzy.....	115
Tabela 4.13 Pesos utilizados na soma ponderada dos planos fuzzy.....	117
Tabela 4.14 Freqüência das classes de potencial obtida pela soma ponderada dos planos fuzzy.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribuição das rochas duras (meio fraturado) no Brasil, divididas em rochas ígneas-metamórficas dos escudos cristalinos e rochas vulcânicas mesozóicas. ....	6
Figura 2.1 Esquema da distribuição vertical da água no solo e subsolo, ilustrando as várias zonas de umidade (modificado de Feitosa, 1997). ....	11
Figura 2.2 Tipologia de aquíferos adaptado de Feitosa (1997). ....	14
Figura 2.3 Estado de tensões e ruptura em maciços rochosos. Modificado de Costa (1980). ....	16
Figura 2.4 Esquema de formação de juntas de alívio (sheet joints) devido ao soerguimento e à erosão do maciço cristalino, com a tensão $\sigma$ passando de compressiva para tensional, acarretando um fraturamento paralelo à superfície topográfica (Modificado de Costa, 1985). ....	18
Figura 2.5 Forma como são representados os valores de brilho ou digitais dos pixels de uma imagem (Adaptado de Menezes et al., 1995). ....	24
Figura 2.6 Sistemas de coordenadas cartesianas para carta topográfica e imagem, a partir da escolha de pontos de controle no terreno. ....	25
Figura 2.7 Trajetória do fluxo de radiação emitido pelo sol e sua interação com a atmosfera e alvos terrestres (modificado de Gupta, 1991). ....	28
Figura 2.8 Comportamento espectral dos principais alvos terrestres (modificado de Barrett e Curtis, 1995). ....	29
Figura 2.9 Características dos histogramas de diferentes tipos de cenas. Adaptado de Schowengerdt (1983). ....	34
Figura 2.10 Efeitos da filtragem no domínio espacial sobre o histograma de uma imagem original. Modificado de Schowengerdt (1983). ....	35
Figura 2.11 Exemplo de imagem LANDSAT TM-5 banda 4 filtrada no domínio espacial do tipo passa-alta na direção NE-SW e NW-SE. ....	36
Figura 2.12 Componentes básicos de “hardware” de um SIG. ....	38
Figura 2.13 Formato digital de pontos, linhas e polígonos em um SIG. ....	39
Figura 2.14 Representação esquemática de um modelo numérico do terreno (MNT). ....	40
Figura 2.15 Três exemplos de superfícies de tendência geradas a partir de polinômios do tipo linear (A), quadrático (B) e cúbico (C). ....	42
Figura 2.16 Efeito da variação do valor do peso nos ponderadores do inverso da distância: $d^{-1}$ (A), $d^{-2}$ (B) e $d^{-3}$ (C). ....	44
Figura 2.17 Exemplo de operação binária, onde o objetivo é a determinação de um mapa de mata nativa em solo arenoso. ....	47

Figura 2.18 Comparação entre um conjunto (A) Booleano e um conjunto (B) Fuzzy. Adaptado de Burrough (1989).....	48
Figura 2.19 Representação gráfica da diferença entre conjuntos binários (booleanos) e conjuntos nebulosos (fuzzy), adaptado de Van Ranst et al. (1996).....	50
Figura 2.20 Diversas formas da função de pertinência sigmoidal e seus quatro pontos de inflexão da curva (adaptado de Eastman, 1995).....	52
Figura 2.21 Diversas formas da função de pertinência em forma de “J” e seus quatro pontos de inflexão (adaptado de Eastman, 1995).....	52
Figura 2.22 Formas da função de pertinência linear e suas variantes (adaptado de Eastman, 1995).....	53
Figura 3.1 Esquema da representação vetorial de um lineamento morfoestrutural.....	64
Figura 3.2 Esquema mostrando como foi calculado o índice de fraturamento através das grades normalizadas de frequência, comprimento acumulado e intersecção de lineamentos morfoestruturais. ....	65
Figura 4.1 Esquema de localização da área de estudo de caso.....	70
Figura 4.2 Mapa de uso do solo obtido a partir da classificação digital da imagem LANDSAT TM5 de novembro de 1995 ( Escala aproximada 1:357000).....	72
Figura 4.3 Mapa geológico modificado de Schneider et al. (1974).....	74
Figura 4.4 Caracterização estrutural das rochas granitóides, exibindo os sistemas de falhas, foliações, diques ácidos e cataclastos; adaptado de Schneider et al. 1974 (Escala aproximada 1:312.500)....	80
Figura 4.5 Diagrama de roseta das foliações desenvolvidas sobre as rochas granitóides. Notar a direção N-60 <sup>0</sup> -E predominante. ....	81
Figura 4.6 Diagrama de roseta dos falhamentos mapeados por Schneider et al. (1974).....	81
Figura 4.7 Diagrama de roseta dos diques de riolitos e riodacitos exibindo uma predominância da direção noroeste. ....	82
Figura 4.8 Lineamentos morfo-estruturais obtidos na imagem digital LANDSAT-TM5 (Escala aproximada 1:278.000). ....	83
Figura 4.9 Diagrama de roseta dos lineamentos morfoestruturais obtidos pela análise da imagem LANDSAT-TM-5 de agosto de 1988. Notar a predominância da direção noroeste decorrente do sombreamento (baixo azimute e elevação elevação solar).....	83
Figura 4.10 Fotolineamentos obtidos em escala 1:110.000. Observar em vermelho os lineamentos formados por altos topográficos preservados (cristas silicificadas).Escala aproximada da figura 1:277.000. ....	84
Figura 4.11 Diagrama de roseta dos lineamentos morfo-estruturais obtidos em fotografias aéreas na escala 1:110.000 .....	85
Figura 4.12 Fotolineamentos obtidos na escala 1:60.000 .....	86
Figura 4.13 Diagrama de roseta dos lineamentos traçados em aerofoto escala 1:60.000. ....	86
Figura 4.14 Grade relativa ao comprimento acumulado dos lineamentos morfoestruturais traçados em vários produtos de sensoriamento remoto (Escala aproximada 1:455.000).....	87
Figura 4.15 Grade da frequência de lineamentos morfoestruturais obtida através da integração de vários produtos de sensoriamento remoto (Escala aproximada 1:455.000).....	88
Figura 4.16 Grade do cálculo da intersecção de lineamentos morfoestruturais (Escala aproximada 1:455.000).....	89
Figura 4.17 Índice de fraturamento obtido a partir da integração das grades de comprimento, frequência e intersecção de lineamentos morfoestruturais extraídos de imagem orbital, aerofotos escala 1:110.000 e 1:60.000 (Escala aproximada 1:455.000).....	90
Figura 4.18 Modelo numérico do terreno e rede de drenagem exibindo as diferentes formas de relevo ocorrentes na área do estudo de caso (Escala aproximada 1:312.500). ....	92



Figura 4.19 Mapa das classes de declividades geradas a partir do modelo numérico do terreno (Escala aproximada 1:312.500). .....	93
Figura 4.20 Mapa de tendência da espessura do manto de alteração e depósitos inconsolidados (Escala aproximada 1:227.000). .....	95
Figura 4.21 Principais sistemas aquíferos da região de Porto Alegre: sistema aquífero fraturado e sistema aquífero granular, e a distribuição dos poços tubulares com intervalos de vazão (Escala aproximada 1:227.500). .....	96
Figura 4.22 Esquema construtivo dos poços tubulares da área de estudo, um captando água somente das fraturas (A) e outro captando água das fraturas e do manto de alteração (B). .....	98
Figura 4.23 Histograma múltiplo da profundidade dos poços (azul) e da quantidade de revestimento (vermelho).....	99
Figura 4.24 Frequência dos intervalos de vazão para os poços do cristalino, mostrando que mais de 50% dos poços possuem vazões menores que 5 m <sup>3</sup> /h. ....	100
Figura 4.25 Frequência dos intervalos de capacidade específica para os poços construídos no aquífero fraturado. Cerca de 80% dos poços possuem valores menores que 0, 5 m <sup>3</sup> /h/m.....	100
Figura 4.26 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de multiplicação (Escala 1:200.000).....	104
Figura 4.27 Relação entre as vazões dos poços observados na área de estudo e o potencial hidrogeológico obtido através de lógica binária com a multiplicação dos planos de informação.....	105
Figura 4.28 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de soma dos planos de informação (Escala 1:200.000). .....	106
Figura 4.29 Relação entre o potencial relativo obtido por lógica booleana-soma e a vazão dos poços... ..	107
Figura 4.30 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de soma ponderada dos planos de informação (Escala 1:200.000). .....	109
Figura 4.31 Distribuição da área de cada classe de potencial obtidos pela lógica booleana-soma e soma-ponderada. ....	110
Figura 4.32 Relação entre o potencial relativo obtido por lógica booleana-soma-ponderada e a vazão dos poços. ....	111
Figura 4.33 Esquema da representação da função de pertinência do tipo “sigmoidal” e os limites (ponto 1 e ponto 2) da definição do potencial hidrogeológico. ....	112
Figura 4.34 Mapa do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de multiplicação dos planos fuzzy (Escala aproximada 1:200.000). .....	114
Figura 4.35 Análise do potencial relativo obtido por multiplicação dos planos fuzzy pela vazão dos poços. ....	115
Figura 4.36 Potencial hidrogeológico obtido por lógica fuzzy com soma dos planos (Escala aproximada 1:227.000). .....	116
Figura 4.37 Análise de regressão simples entre o potencial obtido pela soma dos planos fuzzy e os dados de vazão dos poços.....	117
Figura 4.38 Potencial hidrogeológico obtido por lógica fuzzy com soma ponderada dos planos (Escala 1:200.000). .....	119
Figura 4.39 Análise de regressão simples entre o potencial obtido pela soma ponderada dos planos fuzzy e os dados de vazão dos poços. ....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASCII	→ American Standard Code for Information Interchange
CAD	→ Computer Aided Drawing
CORSAN	→ Companhia Riograndense de Saneamento
CPRM	→ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPU	→ Central Processor Unity
GPS	→ Ground Position System
INPE	→ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDT	→ Modelo Digital do Terreno
MNT	→ Modelo Numérico do Terreno
MSS	→ Multi Spectral Scanner
SIG	→ Sistema de Informações Geográficas
SPOT	→ Système Probatoire Pour l'Observation de la Terre
SUDESUL	→ Superintendência de Desenvolvimento da Região Sul
UTM	→ Universal Transversor de Mercator
UVI	→ Unidade de Visualização

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(x,y,z)$	→ sistema de coordenadas cartesianas
$S_r$	→ retenção específica
$S_y$	→ vazão específica
$V$	→ volume
$\sigma$	→ tensão (força de compressão ou distensão)
$\lambda$	→ comprimento de onda em $\mu\text{m}$
$r$	→ coeficiente de correlação

# **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DE TERRENOS CRISTALINOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO\***

**AUTOR: MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS**

**ORIENTADOR: DR. CARLOS ANDRÉ BULHÕES MENDES**

## **SINOPSE**

Esta pesquisa utiliza técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento com o objetivo de mapear o potencial hidrogeológico de terrenos cristalinos, não se limitando somente à análise de lineamentos. São integrados em um ambiente de geoprocessamento parâmetros como unidades litológicas, declividade do terreno, uso do solo, espessura do manto de alteração e lineamentos morfo-estruturais. Na análise dos lineamentos morfo-estruturais é criado um índice de fraturamento, que leva em consideração o comprimento, a frequência e a intersecção de traços de fratura extraídos de imagens LANDSAT-TM5, e fotografias aéreas na escala 1:110.000 e 1:60.000. A área de estudo de caso é a região de Porto Alegre-RS, onde predominam rochas graníticas do escudo sul-riograndense. São testadas duas lógicas: lógica booleana e lógica nebulosa (fuzzy), utilizando operadores de multiplicação, soma e soma ponderada dos parâmetros envolvidos. Os mapas de potencial relativo obtidos são testados com os dados de produtividade de 80 poços construídos na área. Os melhores resultados apresentados são os relativos a soma ponderada dos planos fuzzy, seguido pela soma ponderada da lógica booleana.

# **HYDROGEOLOGIC POTENTIAL EVALUATION OF HARD ROCKS THROUGH GIS TECHNIQUES**

**AUTHOR: MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS**

**ADVISOR: DR. CARLOS ANDRÉ BULHÕES MENDES**

## **ABSTRACT**

This research uses techniques of remote sensing and GIS with the objective of delineating the hydrogeologic potential of hard rocks, limited not only to lineament analysis. Parameters like litologies, slope classes, land use and morpho-structural lineaments are integrated with GIS. In the lineament analysis a fracture index is created, that takes into consideration the length, frequency and crossing of fracture traces interpreted from LANDSAT-TM5 imagery, and aerial photographs at the scales 1:110.000 and 1:60.000. The Porto Alegre region was chosen as a case of study; that is part of the southern Rio Grande do Sul shield, and consists of granites and gneiss. Two types of logic are tested: boolean and fuzzy, using operators like multiplication, sum and weighed sum of the involved parameters. The resultant maps are tested against capacities from 80 existing wells. The best results are related to the weighed sum of the fuzzy sets followed by the weighed sum of the boolean logic.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	2
1.2 RELEVÂNCIA .....	6
1.3 OBJETIVOS .....	7
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
2.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	10
2.2 MEIO FRATURADO .....	15
2.3 TÉCNICAS AUXILIARES NA CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUÍFEROS FRATURADOS .....	20
2.3.1 Sensoriamento remoto.....	20
2.3.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIGs) .....	37
2.3.3 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL.....	40
2.4 TEORIA DE CONJUNTOS BINÁRIOS (BOOLEANOS) E NEBULOSOS (FUZZY).....	45
2.5 PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM MEIO FRATURADO .....	55
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>59</b>
3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS BÁSICOS.....	59
3.2 PROCESSAMENTO INICIAL DE DADOS .....	61
3.3 ANÁLISE CONJUNTA DE LÓGICA BOOLEANA E FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO.....	66
3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	68
<b>4 ESTUDO DE CASO: A REGIÃO DE PORTO ALEGRE.....</b>	<b>69</b>

4.1	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA .....	69
4.2	ASPECTOS CLIMÁTICOS .....	69
4.3	USO DO SOLO.....	71
4.4	GEOLOGIA .....	73
4.5	GEOLOGIA ESTRUTURAL .....	77
4.5.1	Tectônica regional e implicações na área .....	77
4.5.2	LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DE IMAGEM LANDSAT .....	82
4.5.3	Lineamentos extraídos de aerofotos 1:110.000.....	84
4.5.4	Lineamentos extraídos em aerofotos 1:60.000.....	85
4.5.5	Índice de fraturamento.....	87
4.6	FORMAS DE RELEVO E DRENAGEM .....	91
4.7	COMPORTAMENTO DO MANTO DE ALTERAÇÃO .....	93
4.8	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	94
4.8.1	Sistemas aquíferos .....	94
4.8.2	Poços tubulares.....	97
4.9	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO ATRAVÉS DE LÓGICA BINÁRIA (BOOLEANA) .....	101
4.9.1	Lógica binária-multiplicação (E) .....	103
4.9.2	Lógica binária-soma (OU) .....	105
4.9.3	Lógica binária-soma-ponderada .....	108
4.10	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO ATRAVÉS DE LÓGICA FUZZY .....	111
4.10.1	Cruzamento fuzzy (E).....	113
4.10.2	Soma fuzzy .....	113
4.10.3	Soma ponderada dos planos fuzzy .....	116
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>121</b>
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	122
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>
6.1	ANEXOS.....	129





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água é um recurso imprescindível para o desenvolvimento das diferentes atividades sócioeconômicas, além de ser o elemento vital para a existência de toda a biodiversidade. Adquire valor econômico pelo seu caráter limitado como recurso natural, como recurso ambiental é um patrimônio comum, que a sociedade deve preservar e conservar, garantindo a sua disponibilidade.

No entanto, ao longo dos tempos a água vem se transformando em um recurso cada vez mais escasso, tanto pela sua disponibilidade quantitativa como pelo seu aspecto qualitativo. A civilização do pós Segunda Guerra Mundial conseguiu promover uma redução na disponibilidade de água doce em cerca de 62,7 % das reservas mundiais, sendo que na América do Sul tal redução foi estimada em 73 % (Bruce *apud* Leopoldo e Herrera, 1997).

Entre os vários motivos da degradação da água pode-se citar a explosão do crescimento da população mundial, a expansão industrial desordenada, o desmatamento, o aumento das áreas de agricultura. Desta maneira os recursos hídricos superficiais têm sido tratados de forma negligente a exemplo do lançamento de esgotos urbanos e efluentes industriais nos mananciais; a intensa utilização de pesticidas e fertilizantes, que juntamente com as partículas do solo são carregados pela chuva e levados aos cursos

d'água. Estatísticas revelam que no Mundo cerca de 1,3 bilhões de pessoas não tem acesso à água potável, demonstrando, desta forma, que o século XXI estará marcado pela “Crise da Água” (Oliveira, 1996).

O potencial hídrico do planeta Terra é da ordem de 1,4 bilhões de  $\text{km}^3$  /ano, porém, a parcela de água doce econômica e de mais fácil aproveitamento para as diversas necessidades humanas é de aproximadamente  $14.000 \text{ km}^3$  /ano. Em 1996, a demanda mundial por água era de  $5.692 \text{ km}^3$  /ano contra uma oferta de  $3.745 \text{ km}^3$  /ano, representando quase 41 % dos  $14.000 \text{ km}^3$  /ano disponíveis. Desta maneira a oferta de água só atende 66 % da demanda dos usos múltiplos (Oliveira, 1996).

No Brasil, embora haja um certo privilégio em relação aos recursos hídricos, com cerca de  $257.790 \text{ m}^3/\text{s}$  escoando pelos rios e com um volume armazenado de água subterrânea da ordem de  $58.000 \text{ km}^3$ , a situação não é de tranquilidade absoluta devido aos riscos de crescentes conflitos de quantidade, qualidade e déficit da oferta em áreas localizadas em muitos municípios.

Tal panorama tem levado a sociedade a recorrer aos mananciais subterrâneos, dando às águas subterrâneas uma importância cada vez maior como fonte de abastecimento doméstico, industrial e rural (irrigação e pecuária). Estima-se que cerca de 300 milhões de poços foram construídos no mundo durante os últimos 25 anos e que mais de 50% da sua população consome exclusivamente água subterrânea. Por sua vez, dos 270 milhões de hectares irrigados, cerca de um terço é abastecido por poços (Rebouças, 1996).

Nos Estados Unidos tem se construído 400.000 poços por ano nas últimas décadas, para o abastecimento de 39% dos serviços municipais de água, para a irrigação de aproximadamente 13 milhões de hectares, 75% da população rural e abastecimento de indústrias. Por volta de dois terços do volume anual de 300 milhões de  $\text{m}^3$  são extraídos nos Estados da Califórnia, Texas, Idaho, Nebraska, Arizona, Flórida e Kansas. Algumas cidades dependem exclusivamente de água subterrânea, como é o caso de Tucson no Arizona, que possui uma população de 400.000 habitantes (Solley *et al apud* Rebouças, 1996).

Na Europa o atendimento dos serviços públicos é prioridade, abastecendo em média 75% dos sistemas. Países como a Dinamarca, Suécia, Alemanha, Bélgica, Áustria, têm mais de 90% dos sistemas abastecidos por água subterrânea (OECD *apud* Rebouças, 1996).

A cidade do México atende 94% da demanda dos quase 20 milhões de habitantes (em 1982) com 1.330 poços tubulares, que extraem cerca de 3,2 milhões de litros diários, a exemplo de Lima, que tem 320 poços tubulares produzindo até 650 milhões de litros por dia (Foster *et al.* 1993).

Por volta de 60 % da Austrália depende totalmente da água subterrânea, com estimativa de cerca de 400.000 poços em operação.

Em algumas outras capitais, incluindo Buenos Aires e Santiago do Chile, as águas subterrâneas contribuem com uma significativa parcela do abastecimento público total (Foster *et al. op cit*).

No Brasil, onde não há um controle da utilização das águas subterrâneas, torna-se difícil precisar o total da sua participação no abastecimento d'água. Rebouças (*op cit*) ressalta que, conforme os dados do último censo, cerca de 61 % da população se abastece com água subterrânea, sendo 43% através de poços tubulares, 12 % por meio de fontes ou nascentes e 6% com poços escavados. Cidades como São Luís do Maranhão, Natal, Mossoró, Maceió e cerca de 76 % das cidades do Estado de São Paulo, 90 % das cidades do Paraná e Rio Grande do Sul, têm grande parcela (ou a totalidade) de seu abastecimento feito por poços tubulares.

Água subterrânea é por definição a parcela de água do Ciclo Hidrológico, que se encontra transitando pela subsuperfície da Terra. Segundo Todd (1973), menos de 3% da água disponível em nosso planeta provém de cursos d'água e lagos; a outra parte, mais de 97%, estimada em cerca de 10 quatrilhões de m<sup>3</sup> encontra-se no subsolo.

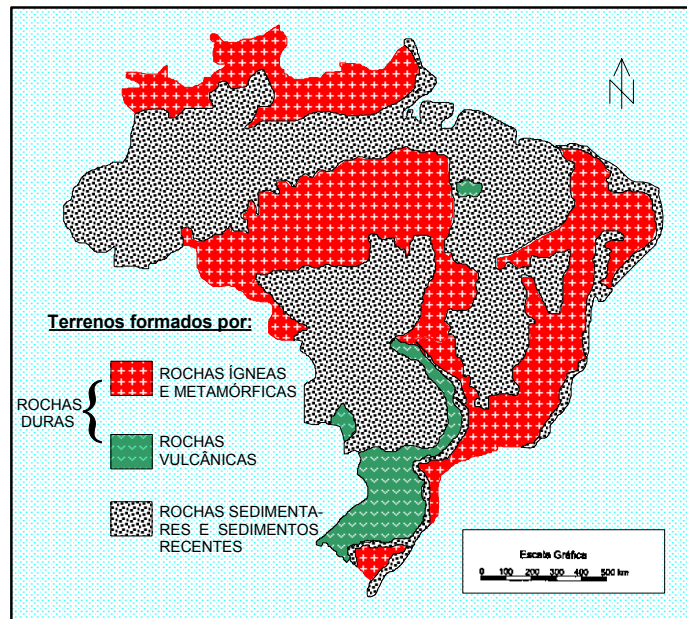
Duas importantes características diferenciam a água subterrânea: sua distribuição e qualidade. A distribuição é tanto espacial como temporal, isto é, em geral ocorre em área, reagindo lentamente às alimentações e às descargas. Estes fatores caracterizam a água subterrânea como água armazenada (reserva), que vêm se acumulando a milhares de anos, sofrendo leves acréscimos anuais de volume. Em relação à qualidade; por sofrer processos de filtração e amortecimento, os quais retêm a carga sólida e biológica; a água subterrânea tende a ser límpida e pura.

A formação geológica capaz de armazenar e conduzir volumes significativos de água subterrânea denomina-se aquífero. Uma das condições essenciais para uma formação ser um aquífero é a sua capacidade de armazenar água em seus poros, definida como porosidade; a outra condição é a permeabilidade, ou seja a facilidade que a água tem de transitar pelos vazios. Tais propriedades dependem dos espaços intergranulares em aquíferos de meio poroso (rochas sedimentares clásticas em geral) e do fissuramento nos aquíferos de meio fraturado, representados pelas rochas cristalinas (ígneas e metamórficas). As rochas vulcânicas, apesar de apresentarem alguma porosidade primária como juntas de resfriamento e zonas amigdaloidais, têm comportamento hidrogeológico de meio fraturado.

As rochas cristalinas compõem cerca de 25% da área dos continentes e no caso do Brasil, afloram em uma área de 5.345.000 km<sup>2</sup> (63 % de sua superfície). Já as rochas vulcânicas no Brasil ocupam cerca de 1.000.000 km<sup>2</sup>, sendo 800.000 km<sup>2</sup> na Bacia do Paraná, 100.000 km<sup>2</sup> na Bacia do Maranhão, cerca de 20.000 km<sup>2</sup> constituindo as ilhas oceânicas (Fraga e Rebouças, 1988) e o restante ocorrendo sob sedimentos ou como soleiras e diques. A figura 1.1. ilustra a distribuição das rochas duras no Brasil constituintes dos aquíferos de meio fraturado.

As reservas de água subterrânea estimadas para o cristalino variam entre  $0,24 \times 10^9$  a  $1,4 \times 10^9$  km<sup>3</sup>. O fato de que um grande número de cidades encontram-se sobre tais terrenos, muitas vezes apresentando déficit hídrico (nordeste por exemplo), atribui a estes aquíferos um importante papel como alternativa na oferta d'água. Mesmo caso acontece com os domínios da Bacia do Paraná, onde a densidade populacional varia de 10 a 250 hab/km<sup>2</sup> e se desenvolve uma intensa atividade agrícola, as rochas

vulcânicas adquirem grande importância como aquíferos fraturados, já que se sabe que sua potencialidade é de  $4,6 \times 10^9 \text{ km}^3$  e que existem poços que atingem vazões de até  $220 \text{ m}^3/\text{h}$ .



*Figura 1.1 Distribuição das rochas duras (meio fraturado) no Brasil, divididas em rochas ígneas-metamórficas dos escudos cristalinos e rochas vulcânicas mesozóicas.*

## 1.2 RELEVÂNCIA

Uma das mais difíceis tarefas em hidrogeologia é a locação de poços em rochas ígneas e metamórficas. Muitos insucessos têm ocorrido na perfuração de poços produtivos, mesmo em áreas onde as locações foram feitas por experientes hidrogeólogos. O custo de uma perfuração no diâmetro de 150 mm gira em torno de 60 reais por metro, portanto para um poço improdutivo com uma profundidade de 100 metros o prejuízo será de 6.000 reais. Considerando várias campanhas emergenciais ocorridas no passado recente, como os projetos da SUDESUL, por exemplo, onde centenas de poços foram perfurados em terrenos cristalinos, muitos sem critérios de locação não alcançaram êxito, pode-se perceber o quanto é importante desenvolver e aprimorar metodologias para o mapeamento de áreas potenciais em aquíferos fraturados.

Nesse sentido inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas na tentativa de definir o potencial hidrogeológico das rochas “duras”, com o objetivo de reduzir o chama-

do índice de insucesso. O principal tipo de abordagem adotado é o mapeamento das zonas fraturadas (lineamentos), utilizando mapas topográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite. Porém, a correlação entre os lineamentos mapeados e os dados de produtividade dos poços, têm se mostrado ambíguos, sugerindo que somente o estudo de lineamentos não pode ser usado para a determinação de áreas potenciais e na locação de poços. A pequena precisão nos dados de entrada d'água, a incerteza na interpretação de lineamentos, o pequeno número de dados de poços estatisticamente significativos e a desconsideração de outros parâmetros naturais envolvidos no problema, podem ser citados para explicar tal fato.

O crescente e rápido desenvolvimento da tecnologia de informação espacial tem promovido o uso de dados georeferenciados nas mais diversas áreas científicas e tecnológicas. São técnicas que possibilitam o ingresso, análise, interpretação, pesquisa, previsão e apresentação de dados espaciais, cuja localização é conhecida, ou pode ser calculada, segundo um sistema de coordenadas. As informações são organizadas sob a forma de imagens, mapas, tabelas e relatórios estatísticos, combinados com uma base de dados unificada. Com os sistemas de informações geográficas (SIG) é possível gerar novos mapas a partir da interação de outras bases cartográficas. A integração das técnicas de sensoriamento remoto com a tecnologia dos sistemas de informações geográficas permitem manipular as funções representantes dos processos naturais, em diversas regiões de uma maneira simples, eficiente, com economia de tempo e recursos.

Desta maneira, considerando a problemática apresentada em relação à importância da água subterrânea no meio fraturado e seu complexo comportamento, torna-se necessário mapear corretamente as áreas potencialmente favoráveis à prospecção hidrogeológica, integrando os diversos planos de informação para o estudo do problema e levando em conta as incertezas implícitas no processo .

### **1.3 OBJETIVOS**

Esta pesquisa pretende definir um critério de prospecção de áreas potencialmente favoráveis para água subterrânea em meios fraturados integrando técnicas de

sensoriamento remoto, geoprocessamento, lógica de conjuntos binários (booleanos) e nebulosos (fuzzy); sem se limitar somente à análise de fraturamento.

Procura-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- 1) salientar a relação entre os elementos litológicos, estruturais e geomorfológicos com a distribuição espacial da água subterrânea nas rochas cristalinas da região.
- 2) integração de dados de diferentes origens, escalas e formas de aquisição, através de geoprocessamento.
- 3) desenvolvimento metodológico a fim de se avaliar o potencial hidrogeológico de uma região comparando os mapas obtidos através da teoria de conjuntos binários e nebulosos (fuzzy).
- 4) obtenção de uma carta de potencial hidrogeológico do meio fraturado com expectativa de complementação de melhores resultados do que as técnicas clássicas existentes.
- 5) validação dos resultados através da análise estatística dos dados de poços na região de Porto Alegre e as estimativas de potencialidade indicados na carta de potencial hidrogeológico.

#### **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A fim de se conseguir os objetivos propostos anteriormente esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

O capítulo 1 faz uma definição clara da problemática a ser analisada, sua importância no contexto da utilização dos recursos hídricos, a relevância e os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 apresenta um referencial teórico dos temas envolvidos na pesquisa, culminando com uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos que envolvem a prospecção hidrogeológica de meios fraturados.

O terceiro capítulo traz um panorama da metodologia utilizada, enfocando a aquisição e o processamento dos dados; além das técnicas de comparação e validação dos resultados.

O capítulo 4 refere ao estudo de caso onde são apresentados uma descrição da área de estudo, ou seja, a região de Porto Alegre, em seus aspectos fisiográficos, e a avaliação do potencial hidrogeológico das rochas cristalinas através de duas lógicas distintas: lógica binária e lógica nebulosa fuzzy. As áreas de potencial definidas por tais lógicas são confrontadas com os dados de poços tubulares existentes.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas por esta pesquisa e as recomendações, enquanto que o último capítulo lista todas as bibliografias consultadas.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta, num primeiro momento, a revisão de tópicos relacionados à ocorrência e comportamento da água subterrânea em meios fraturados, em seguida as técnicas auxiliares para pesquisa de água subterrânea em tais meios, ou seja, sensoriamento remoto e geoprocessamento.

Algumas técnicas analíticas como métodos de interpolação, lógica binária (booleana) e lógica nebulosa (fuzzy) são descritas numa etapa posterior.

Por último é apresentada uma revisão dos principais artigos já publicados relacionados à prospecção de água subterrânea em meios fraturados, que de uma maneira ou outra utilizam tais técnicas.

### **2.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Conforme Todd (1980), a ocorrência da água no subsolo pode ser dividida em duas zonas bem marcadas: zona não saturada ou de aeração e zona de saturação. A zona de aeração é constituída por interstícios parcialmente ocupados por água e ar, enquanto que na zona de saturação todos os interstícios estão ocupados por água (figura 2.1).

Na zona de aeração ocorre a chamada água vadosa ou suspensa, que em geral pode ser subdividida em zona de água do solo, zona intermediária e zona capilar.

A zona da água do solo é classificada por Briggs apud Todd (1973), em três categorias: água higroscópica, absorvida do ar sob a forma de películas na superfície das partículas do solo; água capilar, película contínua em volta das partículas do solo; e água gravitacional que corresponde à água do solo em excesso, drenada sob a influência da gravidade.

Situada entre o limite inferior da zona da água do solo e o limite superior da zona capilar, ocorre a zona intermediária ou vadosa. Esta zona serve de conexão entre a zona próxima da superfície do terreno e a zona próxima do nível d'água. Através dela pode passar água em movimento vertical descendente.

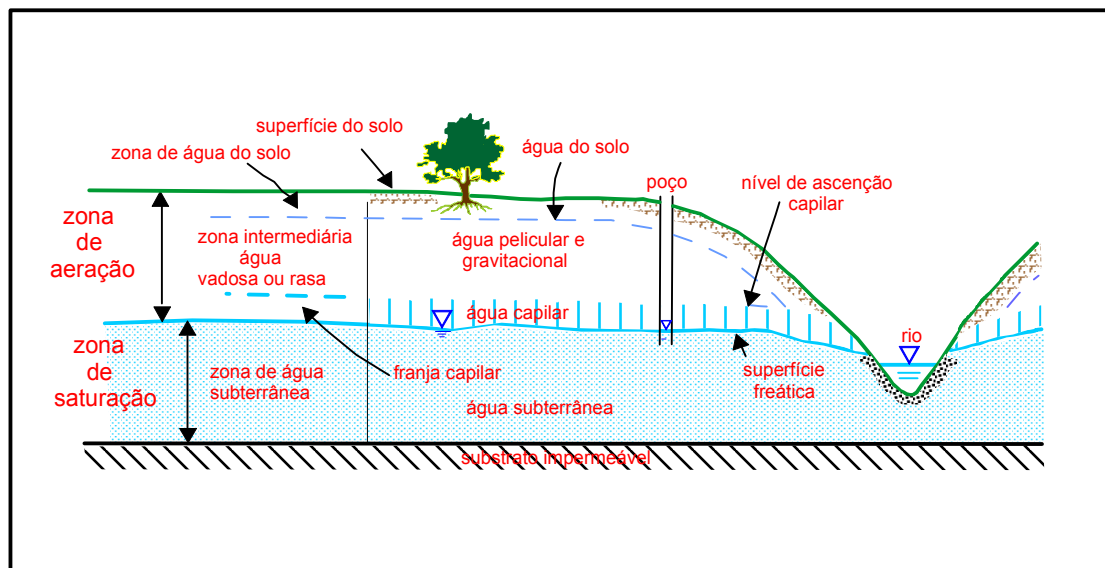


Figura 2.1 Esquema da distribuição vertical da água no solo e subsolo, ilustrando as várias zonas de umidade (modificado de Feitosa, 1997).

A extensão da zona capilar é do nível da água para cima até o limite da subida capilar; sua espessura varia com a textura do solo ou rocha.

A zona de saturação corresponde à zona que contém água subterrânea, sob pressão maior que a atmosférica, preenchendo todos os interstícios. Desta maneira a porosidade é uma medida direta da água contida por unidade de volume. Nem toda água pode ser removida do subsolo por drenagem ou bombeamento, devido às forças de tensão molecular e superficial que retém uma determinada porção da água no local (água

retida). A retenção específica de uma litologia ( $S_r$ ) é a relação entre o volume de água que será retido após a saturação contra a força de gravidade, em relação ao seu próprio volume (Todd, 1980). É dada pela seguinte expressão:

$$S_r = 100 \frac{W_r}{V} \quad (2.1)$$

onde  $W_r$  é o volume ocupado pela água retida e  $V$  é o volume total.

A razão entre a quantidade de água, após a saturação, possível de ser drenada por gravidade e o volume total do material, é chamada de vazão específica de um solo ou rocha ( $S_y$ ), que pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$S_y = \frac{W_y}{V} \quad (2.2)$$

onde  $W_y$  é o volume de água drenada e  $V$  é o volume total. Os valores de  $S_r$  e  $S_y$  podem ser expressos em porcentagem, já que  $W_r$  e  $W_y$  constituem o volume total de água ( $\alpha$ ) em um material saturado onde todos os poros estão conectados, ficando evidente que:

$$\alpha = W_r + W_y \quad (2.3)$$

Os valores de vazão específica dependem da granulometria, forma e distribuição dos poros, da compactação do material e o tempo de drenagem. A tabela 2.1. (Johnson apud Todd, 1980) mostra valores representativos de vazões específicas para vários tipos litológicos.

Aquífero é a formação geológica que é capaz de armazenar e conduzir volumes significantes de água subterrânea. A condição essencial para uma formação ser um aquífero é a sua capacidade de armazenar e transmitir água. O armazenamento é definido como porosidade. A porosidade é função dos espaços intergranulares em aquíferos porosos e do fissuramento nos aquíferos de meio fraturado. As rochas sedimentares clásticas em geral constituem aquíferos de meio poroso, enquanto que os aquíferos

de meio fraturado são representados pelas rochas ígneas e metamórficas. Existem ainda os aquíferos gerados por dissolução em calcários, denominados de kársticos.

Os aquíferos ainda são divididos em livres, confinados e semiconfinados (figura 2.2). Os aquíferos livres ou freáticos são aqueles em que o nível d'água representa a superfície superior da zona saturada e está submetido à pressão atmosférica. O segundo tipo, também conhecido como artesiano, está confinado sob uma pressão maior que a atmosférica por meio de camadas impermeáveis subjacentes. Os aquíferos do tipo semiconfinado possuem como limite superior um extrato semi-permeável, permitindo uma relativa comunicação entre as camadas.

*Tabela 2.1 Valores representativos de vazões específicas para alguns tipos litológicos (Adaptado de Johnson apud Todd, 1980)*

MATERIAL	VAZÃO ESPECÍFICA (%)
Cascalho grosso	23
Cascalho médio	24
Cascalho fino	25
areia grossa	27
areia média	28
areia fina	23
Silte	8
argila	3
arenito fino	21
arenito médio a grosso	27
calcário	14
areia de duna	38
siltito	12

Ao se analisar o ciclo hidrológico percebe-se que a ocorrência da água subterrânea depende principalmente da infiltração do solo, dos cursos d'água superficiais e dos lagos, os quais recolhem as águas provenientes das precipitações.

Localmente, os aquíferos podem ser reabastecidos rapidamente pela precipitação direta da chuva sobre a superfície do solo subjacente. Em outros casos, a água

superficial dos cursos d'água e lagos alimenta os reservatórios subterrâneos quando o nível desses mananciais superficiais for mais elevado que o da superfície do aquífero, desde que o leito do rio ou o fundo do lago sejam permeáveis.

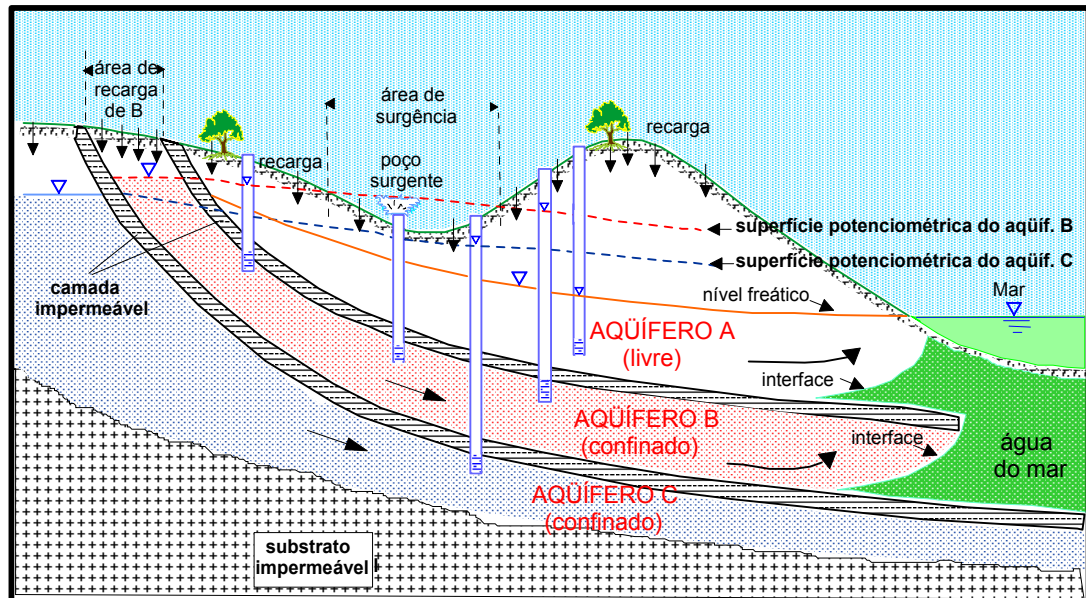


Figura 2.2 Tipologia de aquíferos adaptado de Feitosa (1997).

A recarga dos aquíferos depende do regime pluviométrico, do escoamento superficial e do fluxo dos cursos d'água. Varia ainda com a permeabilidade do solo que a água tem que atravessar para atingir a zona saturada.

A infiltração, além da natureza do solo, depende do seu estado de umidade por ocasião da chuva e da rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Outro relevante fator é a declividade do terreno, ou seja, declividades pronunciadas favorecem o rápido escoamento, ao passo que as insignificantes tendem a favorecer a infiltração.

A cobertura vegetal também deve ser levada em conta como fator no mecanismo de infiltração. Segundo Custódio e Llamas (1975), um solo com cobertura vegetal está protegido da compactação causada pelo impacto direto dos pingos de chuva. As

plantas ajudam também na redução da velocidade de escoamento da água superficial, além de suas raízes abrirem espaços no solo, facilitando a infiltração.

## 2.2 MEIO FRATURADO

O meio aquífero fraturado ou fissural, comumente designado por "cristalino", é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha (Costa, 1985). O termo cristalino envolve uma grande variedade de rochas ígneas e metamórficas. Larsson (1984) define como rochas cristalinas as rochas duras (hard rocks), representadas por gnaisses e granitos, excluindo as rochas vulcânicas e carbonáticas. A razão da exclusão destes dois tipos litológicos é que ambos possuem porosidade primária. As vulcânicas apresentam brechas e vesículas, enquanto que as rochas carbonáticas (calcários e mármore) possuem elevado grau de dissolução formando interstícios.

A capacidade de armazenamento e transmissão de água subterrânea em rochas cristalinas está diretamente ligada à existência de sistema de fraturas, juntas e fissuras na rocha. Estas discontinuidades representam o resultado de uma deformação rúptil sofrida pelas rochas, quando submetida a esforços tectônicos na crosta terrestre. Tais processos deformacionais têm se manifestado de diversas maneiras sobre as rochas, sendo função das variações no estado de tensão e principalmente do tipo de rocha (composição e textura).

Do ponto de vista da geologia estrutural, as discontinuidades são denominadas juntas ou diáclases quando o deslocamento paralelo à estrutura é nulo e são chamadas de falhas se há deslocamento de blocos segundo a componente paralela (Hobbs, 1976). Numa visão mais voltada para a hidrogeologia, Costa (1985) aborda uma discontinuidade como um único indivíduo dentro do maciço rochoso, ou como é mais conhecido: fissura elementar. Assim o meio fraturado é resultante do somatório das fissuras elementares. A abertura de uma discontinuidade é talvez o parâmetro mais importante na problemática da infiltração e armazenamento de água. Segundo Costa (1985) a abertura vai depender das tensões atuantes e do tipo de rocha. Em relação às tensões atuantes pode-se dizer que as deformações sofridas variam em função do tipo de

esforço aplicado (compressivo ou tracional), da diferença entre os esforços máximo e mínimo e, finalmente, das direções das tensões no espaço tridimensional ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ).

A figura 2.3. ilustra o estado de tensões e os tipos de ruptura, onde no caso (A) a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) gerada pelo esforço compressivo ( $\sigma_1$ ) é superior à resistência à tração do maciço ( $S_t$ ), ocorrendo uma ruptura por tração. No caso (B),  $S_t > \sigma_t$ , gerando por consequência uma ruptura através de planos de cisalhamento, originada por  $\sigma_1$ , onde  $S_s$  é a resistência ao cisalhamento do maciço e  $\theta$  representa o ângulo entre o plano de ruptura e  $\sigma_1$ . Através do esquema simplificado acima exposto conclui-se que as fraturas de tração tendem a ser abertas ou seja, há um afastamento entre os blocos, enquanto que as de cisalhamento tendem a ser fechadas.

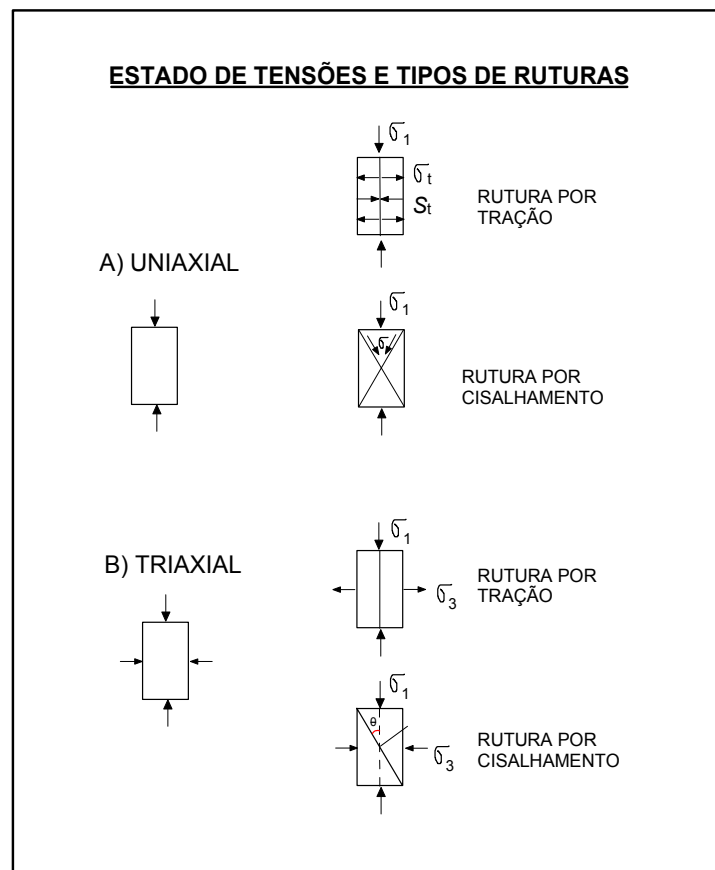


Figura 2.3 Estado de tensões e ruptura em maciços rochosos. Modificado de Costa (1980).

Segundo Costa (1980), nos granitos e outras rochas não orientadas, a caracterização dos planos de ruptura por cisalhamento servem para identificar a direção do principal esforço compressivo responsável pelo fraturamento.

A resistência da rocha à deformação envolve parâmetros intrínsecos como tamanho de grão, grau de metamorfismo, mineralogia, e orientação de minerais. A relação é muito evidente no campo; alguns tipos de rocha encontram-se extremamente fraturadas, enquanto que outros apresentam um aspecto quase que maciço. Costa (1985), analisando as influências das características físicas das rochas em sua deformação rutural e, levando em conta as propriedades litológicas, conseqüentes da composição mineralógica e do tipo de textura, constata que:

- o comportamento estrutural de uma rocha ao ser tensionada, depende das proporções existentes entre os minerais de diferentes resistências;
- os minerais granulares e isentos de planos de clivagem, como o quartzo, são os mais resistentes ao cisalhamento, enquanto que minerais placosos (filossilicatos) apresentam menor resistência.
- quanto mais fina a textura da rocha, maior será a sua resistência, pois será menor a influência dos planos de clivagem dos cristais mais desenvolvidos (feldspatos);
- as rochas não orientadas, com predomínio de minerais resistentes, apresentam no geral uma baixa freqüência de rupturas, todavia são mais abertos os planos de fraturas originados por tração.

Processos de alteração hidrotermal e intempérica sobre os maciços rochosos podem aumentar a capacidade de armazenamento de água subterrânea. Segundo Larson (1984), as zonas de transição entre manto de alteração e rocha sã podem funcionar como bom aquífero, dependendo da porosidade desta zona.

Outro tipo de ruptura bastante comum, mas de origem diferente, é o fraturamento relacionado ao alívio de carga. É conseqüência do alívio de tensões decorrente de processos externos de modelagem da crosta terrestre, por meio da erosão, constituindo um processo de caráter atectônico. Quando o maciço se encontra na proximidade da



superfície terrestre, a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) é muito baixa e corresponde ao peso do recobrimento existente sobre o mesmo. Se o recobrimento for retirado por processos de soerguimento e erosão, a tensão que anteriormente era compressiva alivia-se pela falta do material retirado, transformando-se em tensão de tração. Em consequência surgem planos de ruptura perpendiculares à tensão de tração denominadas de juntas de descompressão (sheet joints), que se desenvolvem paralelamente à superfície topográfica (figura 2.4). Podem contribuir significativamente para a produção de poços em terrenos cristalinos, principalmente em granitóides.

Como já referido anteriormente o meio aquífero fraturado é heterogêneo e anisotrópico, possuindo baixíssima permeabilidade intergranular, o que restringe a pesquisa hidrogeológica às zonas fraturadas. Porém, tal panorama é modificado sob clima úmido, onde o intemperismo físico-químico propicia a formação de espessos pacotes de rochas alteradas que podem funcionar como excelentes aquíferos.

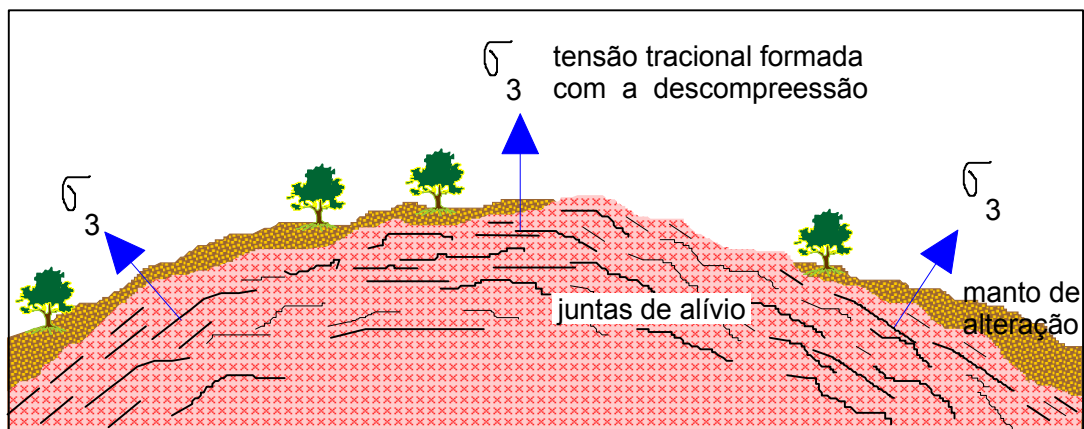


Figura 2.4 Esquema de formação de juntas de alívio (sheet joints) devido ao soerguimento e à erosão do maciço cristalino, com a tensão  $\sigma$  passando de compressiva para tensional, acarretando um fraturamento paralelo à superfície topográfica (Modificado de Costa, 1985).

Em tese o fraturamento das rochas vem facilitar a ação do intemperismo devido à maior percolação de água e aumento da superfície específica do contato água/rocha.

O manto de alteração também desempenha importante papel no processo de recarga dos aquíferos fraturados, pois de sua permeabilidade e porosidade dependerá a capacidade de receber e armazenar água proveniente da superfície. Em locais onde o manto de alteração inexistente a água das precipitações pluviométricas escorre em regime de enxurrada sobre a superfície nua das rochas e apenas uma pequena parte poderá infiltrar pelas fraturas.

A tabela 2.2 adaptada de Larsson (1984) mostra que os poços construídos em terrenos cristalinos em clima úmido, com espesso manto de alteração, apresentam um notável aumento na sua produtividade em relação aos poços em mesmos terrenos, mas em climas semi-áridos.

*Tabela 2.2 Comparação entre a produtividade de poços em terrenos cristalinos em clima úmido e clima árido. Adaptado de Larsson (1984).*

País	Região Climática	Litologia	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Observações
Brasil	Região Semi-árida (Nordeste)	granitos, gnaisses, xistos	0,3 a 8,0	Manto de intemperismo varia de 5 a 10 m de espessura, poços de 20 a 40 m de profundidade. Capacidade específica de 0,1 a 1,0 m <sup>3</sup> /h/m
	Região Úmida	granitos, xistos, gnaisses	0,5 a 15	Manto de intemperismo de 10 a 20 m de espessura. Poços entre 20 e 80 m de profundidade. Capacidade específica variando de 0,2 a 4,0 m <sup>3</sup> /h/m.
Uruguai	Sul -Clima úmido	granitos e gnaisses	0,2 a 8,0	Manto de intemperismo entre 20 e 40 m. Capacidade específica de 0,1 a 1,8 m <sup>3</sup> /h/m.
Índia	Rajasthan Semi-árida	granitos	0,9 a 2,8	Manto de alteração entre 12 e 25 m de espessura.
	Karnataka clima úmido	granitos, gnaisses, xistos e filitos	0,5 a 15	Espessura de manto de alteração acima de 15 metros

## **2.3 TÉCNICAS AUXILIARES NA CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL DE AQÜÍFEROS FRATURADOS**

O estudo da potencialidade de aquíferos é algo bastante abrangente e complexo, necessitando de uma avaliação de vários parâmetros sejam eles naturais ou antrópicos. Tal complexidade exige a aplicação e integração de diversas técnicas para a abordagem do problema.

A seguir são descritas, de maneira resumida, algumas das principais ferramentas utilizadas atualmente no estudo da potencialidade de aquíferos, como as técnicas de sensoriamento remoto, os sistemas de informações geográficas e técnicas analíticas.

### **2.3.1 Sensoriamento remoto**

Sensoriamento Remoto pode ser definido, de forma bastante ampla, como a técnica de aquisição de informações sobre objetos, também denominados de alvos, sem que haja contato físico com os mesmos. Atualmente o termo sensoriamento remoto é restrito somente aos métodos que se utilizam da energia eletromagnética (luz, calor, ondas de rádio, etc..) na detecção e medida dos alvos. Isto é possível devido às interações entre a energia eletromagnética e os objetos. Uma definição mais elaborada e com mais rigor de sensoriamento remoto é dada por Menezes e Ferreira Júnior (1995), como uma medida de troca energética resultante da interação da radiação eletromagnética de um determinado comprimento de onda com os objetos da superfície terrestre.

O conceito básico envolvido nesta definição, é que a radiação eletromagnética proveniente de um alvo vai conter informações sobre o mesmo, relativas às suas propriedades espaciais (tamanho, forma, estrutura e textura) e suas propriedades espectrais (reflectância, absorvância, transmitância e emitância).

A energia eletromagnética proveniente do sol ao atingir a superfície de um alvo interagirá com a mesma por meios de troca de energia, que resultará em uma absorção, reflectância e/ou transmitância de parte desta energia incidente. O sensor como não está em contato físico direto com o alvo, poderá registrar apenas a componente da radiação eletromagnética refletida.

As interações entre a energia e a matéria (alvo) podem ocorrer das seguintes maneiras:

- a radiação é transmitida (refratada)
- a radiação é absorvida (transformação em calor)
- a radiação é dispersa (espalhamento atmosférico)
- a radiação é refletida
- a radiação é emitida

A radiação refletida é, geralmente, a mais utilizada dentro do estudo de sensoriamento remoto.

Dentro do espectro eletromagnético, o espectro ótico da energia solar refletida pelos objetos da superfície terrestre varia em função do comprimento de onda em:

- visível (0,38 a 0,72  $\mu$  m)
- infravermelho próximo (0,72 a 1,3  $\mu$  m)
- infravermelho médio (1,3 a 3,0  $\mu$  m)
- termal (7,0 e 15,0  $\mu$  m)

O registro da energia refletida ou emitida pelo alvo é feito pelos sistemas sensores, que podem ser definidos como qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em sinais passíveis de serem convertidos em informações sobre o objeto imageado. É como se o satélite possuísse “olhos eletrônicos” capazes de observar a energia eletromagnética proveniente da superfície terrestre.

Os sistemas sensores podem ser classificados em relação à fonte de energia utilizada e em relação à região do espectro em que operam. Quanto à fonte de energia os sensores são divididos em passivos e ativos. Os sensores passivos (câmeras fotográficas aerotransportadas e satélites) detectam a radiação solar refletida pelos objetos da superfície terrestre, enquanto que os sensores ativos produzem sua própria radiação (radar).

Em relação à região do espectro eletromagnético são divididos nos que operam na faixa óptica e na faixa de microondas. Os sensores ópticos caracterizam-se pela utilização de componentes ópticos (espelhos, prismas e lentes) operando na faixa do visível a infra-vermelho distante. Os que operam na faixa do espectro caracterizado por ondas de comprimento entre 1mm e 1 m, são chamados de sensores de microondas (radar).

O sistema sensor mais utilizado no Brasil para estudos e levantamentos de recursos terrestres é a plataforma LANDSAT. Este foi o primeiro sistema projetado para imagear toda a superfície da Terra regularmente, lançado, na sua primeira série, em 1972. Atualmente recebemos imagens do LANDSAT TM-5, que está atuando desde março de 1984. Como todo sistema LANDSAT, baseia-se no princípio de energia refletida ou emitida que são convertidas em sinais digitais (256 níveis de cinza). Sua órbita é polar-circular síncrona com o sol, com período de 98,2 minutos, encontra-se a uma altitude de 705 km com tempo de recobrimento de 16 dias e recobrimento lateral variável com a latitude. A largura da faixa imageada é de 185 km e sua resolução espacial é de 30x30 metros. A resolução espectral deste sistema orbital encontra-se descrita na tabela 2.3.

*Tabela 2.3 Resolução espectral do sistema LANDSAT TM5.*

BANDA	FAIXAS ESPECTRAIS ( $\mu\text{m}$ )	DENOMINAÇÃO
1	0,45 - 0,52	visível
2	0,52 - 0,60	
3	0,63 - 0,69	
4	0,76 - 0,90	infravermelho próximo
5	1,55 - 1,75	infravermelho médio
6	10,4 - 12,5	termal
7	2,08 - 2,35	infravermelho distante

A energia eletromagnética, após ser capturada pelos sensores a bordo dos satélites, é convertida para uma imagem digital. A representação da imagem digital de um ponto ou objeto na superfície terrestre pode ser descrita por dois atributos: posição espacial e valor da radiância

Assim é possível definir, de maneira genérica, uma imagem como sendo uma função bidimensional da intensidade radiante  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  referem-se às coordenadas espaciais daquele ponto ou objeto, e o valor de  $f$  é proporcional à energia radiante refletida ou emitida naquela posição.

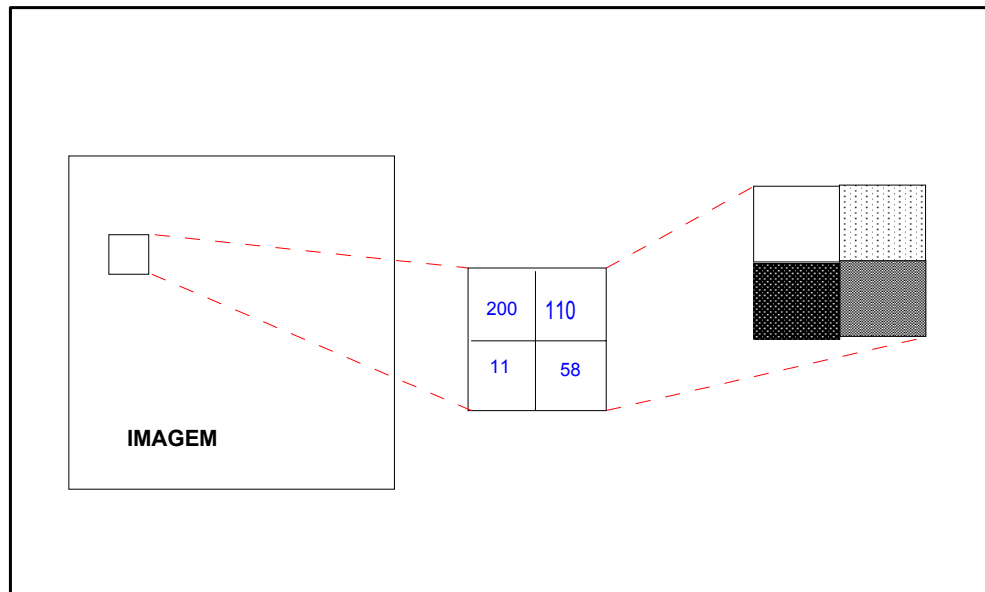
A imagem é formada pela conversão do sinal analógico medido pelo sensor (radiância no ponto  $x,y$ ) em um correspondente valor digital ou numérico, que é codificado e armazenado em uma fita magnética (CCT). Desta maneira a imagem digital é uma representação quantizada dos valores de radiância correspondentes a cada área unitária imageada no terreno (Menezes et al., 1995). Tais valores são referidos como níveis de cinza ou valores de brilho, considerando somente valores inteiros ou discretos.

Os elementos de área no terreno, que definem os valores de brilho na imagem são denominados de “pixels” (picture x elements). Portanto associa-se a cada “pixel” um número inteiro representativo da radiância integrada dos diferentes objetos situados dentro daquela área unitária de imageamento.

Como uma imagem digital é representada numericamente, seus valores digitais podem ser arranjados sob a forma de uma matriz  $N \times N$ . No sensor TM LANDSAT, a distribuição de níveis de cinza, associada às intensidades das radiâncias observadas, são representadas por :

- 0 - nível mínimo de energia = cor preta obtido pelo sensor
- 255 – nível máximo de energia = cor branca obtido pelo sensor

A figura 2.5 ilustra a distribuição dos níveis de cinza por pixels, em uma porção de uma certa imagem digital.



*Figura 2.5 Forma como são representados os valores de brilho ou digitais dos pixels de uma imagem (Adaptado de Menezes et al., 1995).*

Uma imagem digital orbital multiespectral apresenta muitas vezes dados originais degradados, devido ao mal funcionamento esporádico do sensor, desajuste na calibração dos detetores, problemas de transmissão recepção e registro, interferência atmosférica, distorção no formato dos pixels causados por variações na altitude do satélite, etc..

As técnicas de pré-processamento tem por finalidade a busca de condições originais da cena corrigindo as distorções e removendo os ruídos gerados no processo de imageamento. Existem três categorias de correções de pré-processamento:

- radiométricas
- geométricas
- atmosférica

As correções radiométricas servem para remover ruídos radiométricos sistemáticos e aleatórios.

As correções geométricas são utilizadas para corrigir problemas originados pela rotação da Terra durante o imageamento, pelas variações na altitude e velocidade

do satélite. O modelo mais comum de correção geométrica é o que estabelece relações matemáticas (funções) entre as posições dos “pixels” na imagem e as correspondentes coordenadas destes “pixels” no terreno, através de cartas topográficas corretas ou pontos de controle adquiridos com GPS. O conceito envolvido nesse método é o de estabelecer diferenças de posicionamento de alguns pontos na imagem e na carta topográfica. A partir destas diferenças, estima-se a distorção presente na imagem, permitindo computar uma transformação adequada no sentido de corrigir a imagem.

Segundo Richards (1993), dois sistemas de coordenadas cartesianas são criados, um que define a localização dos pontos  $(x,y)$  no mapa, e outro com a localização dos pixels na imagem  $(u,v)$  a ser corrigida, conforme o esquema da figura 2.6. Estes dois sistemas são relacionados por uma função de mapeamento espacial  $f$  e  $g$ , tal que :

$$u = f(x,y) \quad v = g(x,y) \quad (2.4.)$$

Conhecendo-se estas funções, pode-se localizar um ponto na imagem conhecendo sua posição na carta.

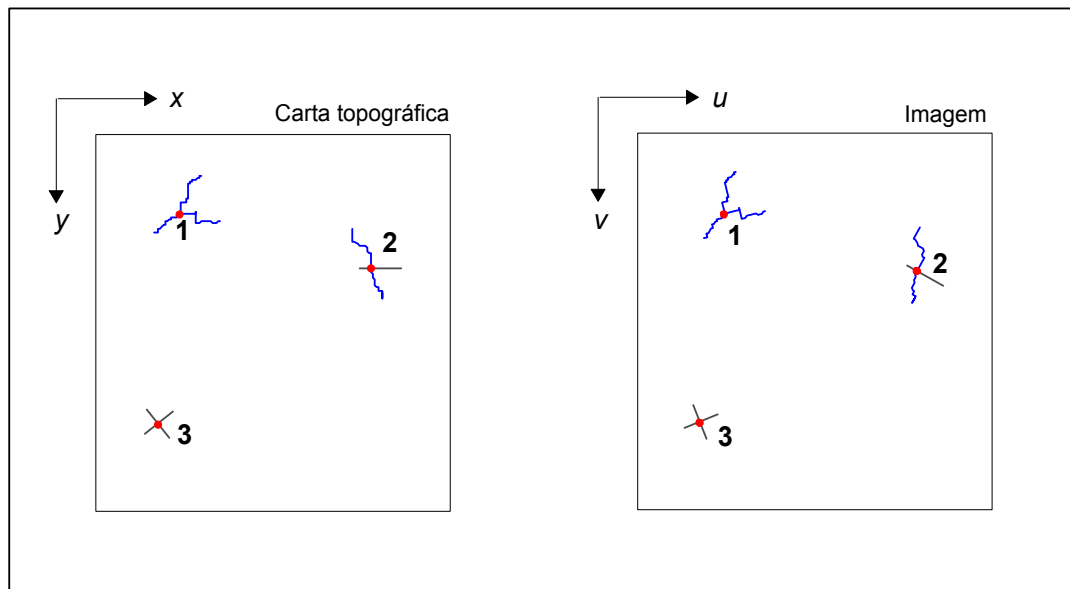


Figura 2.6 Sistemas de coordenadas cartesianas para carta topográfica e imagem, a partir da escolha de pontos de controle no terreno.



No entanto, como as funções de mapeamento dificilmente são conhecidas, consideram-se as funções como polinômios de 1º, 2º ou 3º grau. Por exemplo, se o polinômio for de 2º grau tem-se:

$$\begin{aligned}u &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\v &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2\end{aligned}\tag{2.5}$$

Se os coeficientes  $a_i b_i$  são conhecidos, a função de mapeamento polinomial pode ser usada para relacionar qualquer ponto na carta com os pontos correspondentes na imagem. Se  $a_i b_i$  não forem conhecidos, identificam-se pontos de controle na carta topográfica (cruzamento de estradas, rios, pontes), que possam ser reconhecidos na imagem, de modo que os coeficientes polinomiais sejam estimados. Com estes pontos de controle determina-se explicitamente os polinômios de mapeamento, que permitirão determinar a localização espacial de um pixel na imagem de saída.

A posição dos pixels da imagem de saída, determinada pela grade de centro de pixels, geralmente não coincide com a localização dos pixels da imagem pré-corrigida. Assim deve ser tomada a decisão para saber qual o valor de pixel para a imagem de saída deve ser interpolado pelos valores dos pixels adjacentes na imagem original. Este procedimento de interpolação é denominado de reamostragem, sendo comumente utilizadas as seguintes técnicas: interpolação do vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

A interpolação do vizinho mais próximo mantém o brilho original do pixel, apenas remanejando sua posição, para gerar uma imagem georreferenciada (corrigida).

A interpolação bilinear determina valores de brilho para os pixels da imagem de saída interpolando duas direções ortogonais, envolvendo cada um dos quatro pixels que circundam o ponto considerado. O valor do pixel para a imagem corrigida é ponderado, por meio da distância linear entre os centros dos pixels de entrada e o centro do pixel de saída. O valor médio dos quatro valores ponderados de brilho dos pixels de entrada será então o valor do pixel de saída.

A convolução cúbica determina o valor de brilho da imagem de saída utilizando também a interpolação bilinear, no entanto considera os valores ponderados de 16 pixels circundantes.

Tanto a interpolação de convolução cúbica como a bilinear fornecem imagens corrigidas com valores de brilho um pouco diferente do brilho real (radiância), não recomendados para imagens que serão classificadas (Menezes et al., 1995).

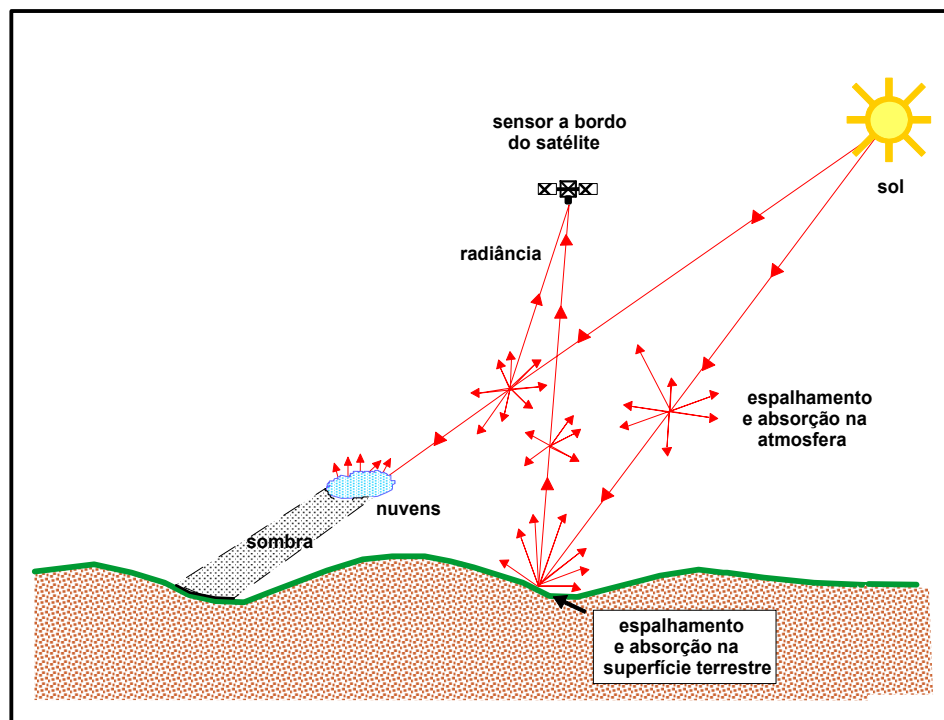
Representando o último tipo de pré-processamento de imagens digitais temos a correção atmosférica. Durante o seu caminho através da atmosfera a radiação solar interage com os gases e aerossóis que a compõem, prejudicando a interpretação da imagem em um primeiro momento. As degradações causadas pelo efeito atmosférico têm a intensidade diferenciada de banda para banda, em função do comprimento de onda, muitas vezes comprometendo a análise e interpretação das imagens.

A radiância medida pelo sensor é diferente da radiância intrínseca do material, devido à absorção e espalhamento causados pelos aerossóis, moléculas d'água e gases da atmosfera. O fluxo de radiação emitido pelo sol é parcialmente absorvido e/ou espalhado, quando penetra a atmosfera antes de atingir a superfície terrestre (figura 2.7). Desta forma a superfície terrestre é irradiada de duas maneiras: diretamente pelo fluxo solar e indiretamente pelo fluxo espalhado no céu.

Para a interpretação confiável das imagens torna-se obrigatório a correção desta interferência. Uma das técnicas mais utilizadas é a correção pelo uso do limite inferior do histograma dos valores dos números digitais de cada banda. Tal método é baseado em duas premissas. Na primeira, o espalhamento atmosférico relaciona valores de brilho ao sensor segundo uma relação inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (Efeito Rayleigh). Isto significa que os comprimentos de onda menores (visível) são mais afetados do que os comprimentos maiores (infravermelho).

Em relação a segunda premissa, a atmosfera subtrai valores de brilho dos comprimentos de onda maiores devido à absorção da energia pelas moléculas d'água, nesta região do espectro. O objetivo é reduzir os valores mínimos de brilho das bandas

do infravermelho para valores próximos ou iguais a zero, tentando eliminar a radiância adicionada pelo efeito atmosférico. Para isto deve-se determinar os valores digitais dos alvos que na cena deveriam ter valores nulos de reflectância, subtraindo o valor determinado, de toda imagem. Desta maneira são ajustados para zero os valores mínimos de brilho.



*Figura 2.7 Trajetória do fluxo de radiação emitido pelo sol e sua interação com a atmosfera e alvos terrestres (modificado de Gupta, 1991).*

Os valores mínimos de brilho a serem subtraídos são determinados procurando-se encontrar nas bandas do infravermelho, valores nulos de reflectância nas áreas de sombra formadas pelo relevo, onde os valores de brilho deveriam ser zero. O acréscimo encontrado representa a contribuição atmosférica gerada pelo espalhamento e deve ser subtraído de todos os pixels das respectivas bandas.

Para se extrair informações de dados de sensoriamento remoto, é necessário conhecer o comportamento espectral dos objetos da superfície da Terra e os fatores que nele interferem. Grande parte dos dados de comportamento espectral foram obtidos a partir de experimentos e missões de coleta de dados radiométricos.

Uma curva espectral é a representação gráfica da medida de reflectância de um determinado alvo ao longo do espectro eletromagnético. As variações de amplitude na curva espectral, também denominada assinatura espectral, são indicadoras das propriedades dos objetos, as quais se manifestam na interação energia radiante-objeto. O comportamento espectral dos principais componentes da superfície terrestre (figura 2.8) -vegetação, solo, água e superfícies construídas pelo homem- são descritos a seguir de maneira geral e sucinta.

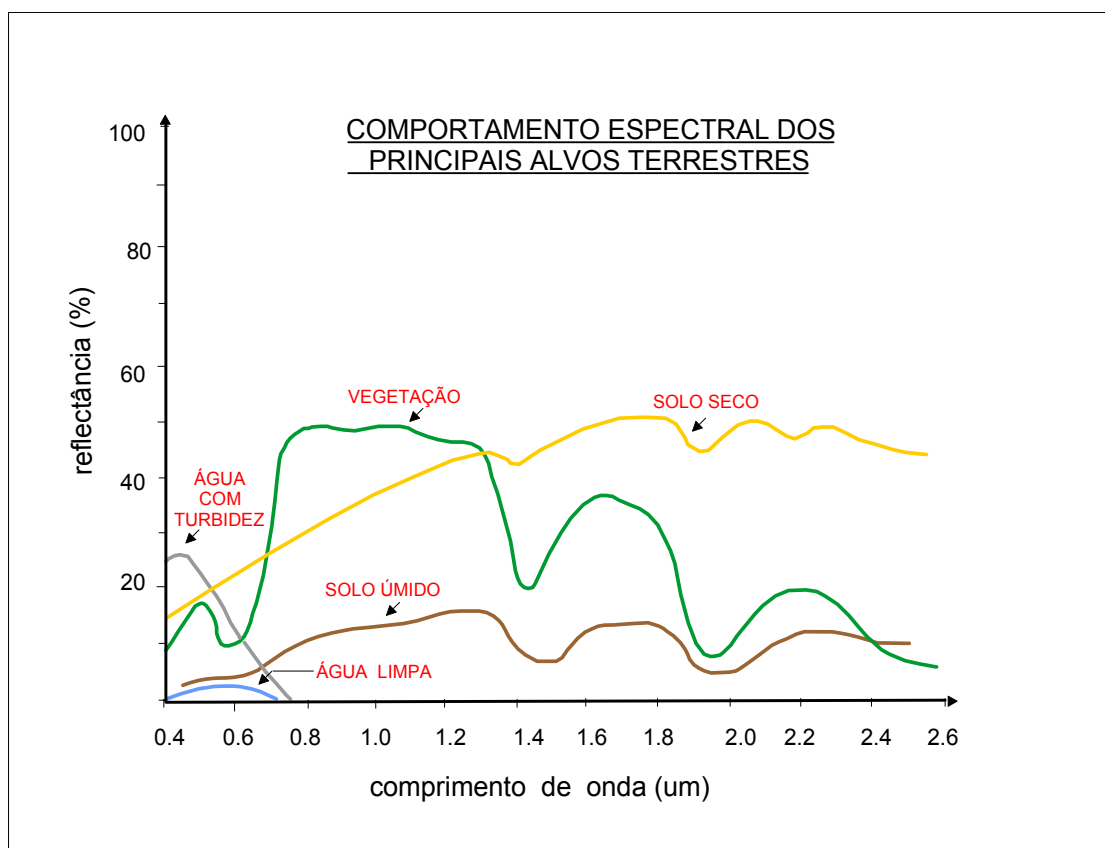


Figura 2.8 Comportamento espectral dos principais alvos terrestres (modificado de Barrett e Curtis, 1995).

A vegetação, de uma maneira geral, caracteriza-se pela absorção acentuada na região do visível, produzida por pigmentos carotenóides (480 nm) e pela clorofila (680 nm), passando para uma região de absorção mais fraca nos 560 nm (banda do verde). À partir de 700 nm nota-se um gradiente acentuado marcando a transição para uma alta reflectância no infravermelho, produzida pela estrutura interna das folhas. Esta re-

gião de alta reflectância se mantém até cerca de 1,3  $\mu\text{m}$ , à partir de onde a curva é modelada pelas bandas de absorção da água.

A assinatura espectral dos solos apresenta bandas de absorção determinadas pelo conteúdo de matéria orgânica (570nm), ferro (700, 900 e 1000 nm) e água (1450, 1900 e 2200 nm).

O comportamento espectral da água é determinado principalmente pelos processos de absorção e espalhamento produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão na mesma. A água limpa tem um espectro com reflectância mais elevada na faixa correspondente ao azul; a presença de matéria orgânica desloca o maior valor de reflectância para a faixa do verde-amarelo; a matéria inorgânica em suspensão causa um deslocamento para a direção do vermelho. Nas bandas do infravermelho a reflectância é praticamente nula, pois a água absorve toda a radiação a partir do comprimento de onda de 0,7  $\mu\text{m}$ .

As superfícies artificiais de concreto e asfalto, que compõem grande parte das áreas urbanas, apresentam segundo Novo (1989), os seguintes comportamentos. O concreto tem um comportamento bastante complexo caracterizado por um aumento de reflectância com o aumento do comprimento de onda, porém com grandes feições de absorção em 0,38  $\mu\text{m}$ , entre 0,6 e 0,8  $\mu\text{m}$  e em 1,1  $\mu\text{m}$ . O asfalto mostra uma reflectância baixa e decrescente entre 0,3 e 0,4  $\mu\text{m}$ ; reflectância crescente entre 0,4 e 0,6  $\mu\text{m}$ ; mantém uma constância de 0,2 de 0,6 a 1,0  $\mu\text{m}$ ; e finalmente a reflectância cresce até 1,3  $\mu\text{m}$ .

O conhecimento do comportamento espectral destes principais alvos é muito importante para a análise, interpretação e processamento das imagens digitais de satélite.

Com base no contexto anterior, um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é a distinção e identificação dos diferentes objetos que compõem a superfície terrestre, tal como tipos de vegetação, diferentes uso do solo, rochas, água e outros. Tal

separação e identificação é possível devido ao comportamento espectral específico de cada material.

Entre os vários procedimentos estatísticos de imagens digitais, existe a classificação de imagens multi-espectrais. O fundamento básico de uma classificação automática é associar a cada pixel da imagem um atributo que descreve um objeto real. Desta maneira, os valores numéricos associados a cada pixel, definidos pela reflectância de seus materiais componentes, são identificados conforme o tipo de cobertura de sua superfície imageada.

Os métodos de classificação são divididos em dois principais grupos: classificação supervisionada e não supervisionada. No primeiro tipo o analista interage com a máquina fornecendo áreas de treinamento, enquanto que no segundo, o analista tem pouco controle sobre as separações das classes. Dentre as classificações supervisionadas, a que interessa no caso desta pesquisa, será descrita de maneira resumida a classificação do tipo maxverossimilhança.

O algoritmo estatístico maxverossimilhança (maxver) considera a ponderação das distâncias médias classificando a imagem ponto por ponto. As classes são fornecidas pelo usuário adotando os seguintes passos (Mendes notas de aula):

- obtenção das amostras das classes
- avaliação das amostras
- classificação da imagem
- avaliação da classificação

Na classificação dos pontos supõe-se que a probabilidade de ocorrência de cada classe seja igual. Um ponto pertencerá a uma determinada classe 1 se  $\Pr(z/S1) > \Pr(z/S2) > \dots > \Pr(z/Sn)$  e  $\Pr(z/S1) > \text{limiar}$ . O limiar é um valor real positivo abaixo do qual um ponto não é considerado como pertencente a uma classe.

O algoritmo de classificação maxver apresenta uma série de restrições: a distribuição pode não ser do tipo gaussiana para todas as classes; a média e a variância

(covariância) podem não ser significativas, no caso de amostragens inadequadas; o tempo de processamento é grande e é necessário um bom conhecimento prévio da área a ser classificada.

Além das técnicas anteriormente apresentadas, existe uma linha de pesquisa em sensoriamento remoto diretamente aplicada às ciências geológicas e intensamente utilizada, que é a análise e extração de feições geológicas. Com o desenvolvimento das plataformas orbitais, das técnicas de processamento e interpretação de dados de sensoriamento remoto ocorreram avanços na análise de lineamentos e estudos tectônicos. As imagens produzidas em pequenas escalas servem para a análise de grandes estruturas de cunho regional, enquanto que as de grande escala são apropriadas para detalhes estruturais.

A análise de lineamentos iniciou-se com a introdução das fotografias aéreas, sendo incorporadas posteriormente imagens de satélite e mosaicos de radar, sendo de fundamental importância na caracterização de aquíferos fraturados.

Segundo O'Leary (1976), “um lineamento é uma feição linear mapeável da superfície cujas partes estão alinhadas numa relação retilínea ou levemente curvilínea que diferem dos padrões das feições adjacentes e que presumivelmente refletem um fenômeno de subsuperfície”.

Amaro e Strieder (1994) ressaltam a necessidade de se distinguir dois tipos de lineamentos: os lineamentos do tipo 1, referentes a estruturas penetrativas (foliações e/ou lineações); e os lineamentos do tipo 2, que representam estruturas frágeis como juntas e falhas.

Takahashi et al. (1993) definem que, para a caracterização hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado, é importante a distinção entre morfo-estrutura e lito-estrutura. Um lineamento é a morfo-estrutura que reflete, mas não se confunde com a lito-estrutura cujo domínio é subsuperficial.

Existem duas maneiras básicas de se extrair lineamentos de uma imagem; a extração visual e a extração automática por meio de técnicas digitais. O primeiro tipo é baseado na análise visual, embutindo a subjetividade do analista. A outra maneira, digital, tem uma grande desvantagem que é a impossibilidade de discernimento pela máquina das feições lineares, provavelmente morfo-estruturas, de outras linhas presentes na imagem de caráter antrópico como cercas, estradas, etc.

A escala das imagens deve ser compatível com o tipo e tamanho das feições procuradas (Amaral, 1994). Schuck et al. (1986) define a sistemática de extração de dados estruturais e morfológicos em diferentes bandas do espectro eletromagnético em várias escalas como conceito “multi”, o que permite a obtenção de um maior número de informações do que se as mesmas tivessem sido analisadas isoladamente.

Outro fator relevante é o tipo de imagem a ser utilizada, isto é, existem vários fatores inerentes aos sistemas sensores como a época do ano (azimute e elevação solar), faixa espectral, direção de vôo (radar), que poderão causar um realce diferencial nas feições a serem observadas. Liu e Rodrigues (1988) mostram a importância da sazonalidade da iluminação solar em relação à qualidade e quantidade de informações morfológicas extraídas, comparando imagens LANDSAT de verão e de inverno. Ressaltam que o azimute solar pode ser tão ou mais importante que a elevação solar, influenciando não só no número de lineamentos extraídos como também nas direções e no comprimento médio.

O processamento digital de imagens tem por objetivo melhorar a visualização dos lineamentos (Moore e Waltz, 1983), sendo representado por técnicas como a ampliação de contrastes, composições coloridas, realce de bordas e filtragens espaciais (Domínio de Fourier e Convolução). Dentre estas, as mais utilizadas são a ampliação de contraste e as filtragens espaciais.

A ampliação de contraste visa facilitar a discriminação visual de características de cenas com baixo contraste. Para isto deve-se analisar o histograma da imagem, que em geral tende a possuir uma forma aproximada à de uma distribuição gaussiana. Através da figura 2.9 é possível perceber que em cenas de baixa radiância o histograma



aproxima-se do eixo vertical, ocorrendo o contrário com cenas de alta radiância. Em cenas com baixo contraste, o histograma apresenta uma forma mais estreita (menor variância dos níveis de cinza), ao contrário das cenas de alto contraste.

A ampliação de contraste consiste em uma operação matemática que modifica a forma do histograma da imagem, aumentando o seu contraste e transformando os seus níveis de cinza.

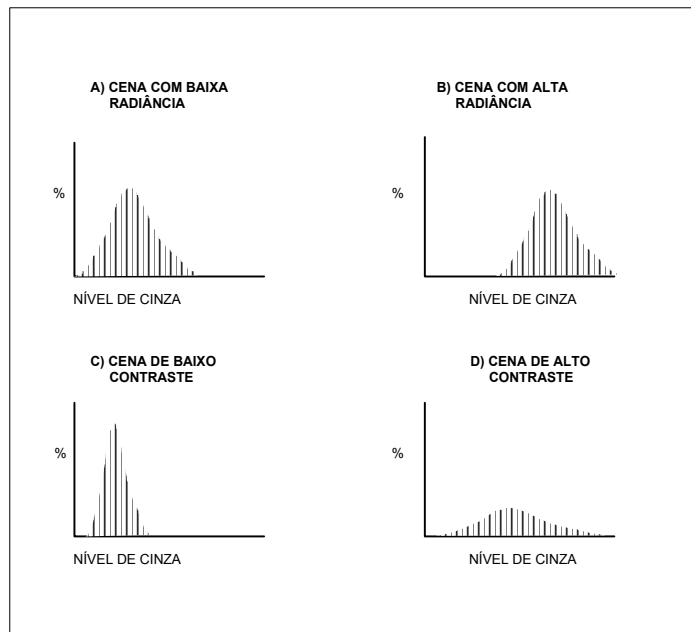


Figura 2.9 Características dos histogramas de diferentes tipos de cenas. Adaptado de Schowengerdt (1983).

As operações de filtragem tem sido largamente utilizadas, tanto para realçar como para suavizar a imagem digital. No primeiro caso são usados os filtros chamados “passa-alta” e no segundo os “passa-baixa”.

É possível mostrar que as linhas, bordas, ruídos e outras variações abruptas nos níveis de cinza ao longo de uma imagem estão associadas às freqüências espaciais altas no domínio de Fourier (Schuck et al, 1990). No domínio espacial as transformações são feitas “pixel” a “pixel”, levando em consideração além do valor do nível de cinza de um determinado pixel, o valor do nível de cinza dos “pixels” vizinhos. Desta maneira o realce se dá pela suavização ou eliminação de freqüências espaciais baixas, permitindo que as altas freqüências espaciais permaneçam inalteradas. Tal procedimen-

to pode ser executado tanto no domínio de Fourier como no domínio espacial (diretamente na imagem), sendo denominada de filtragem “passa alta”. Já os filtros do tipo “passa-baixa” são utilizados em geral para atenuar o efeito de ruídos existentes em uma cena imageada, tendo como resultado uma redução da variabilidade dos níveis de cinza da imagem.

Em estudos geológicos, muitas vezes, torna-se necessário definir feições morfotectônicas orientadas segundo certas direções. Para isso, utilizam-se filtros do tipo “passa-alta” direcionais, que têm a capacidade de detectar ou realçar tais feições segundo uma determinada direção. Estes filtros são feitos diretamente na imagem (domínio espacial), através de máscaras de pesos ou janelas móveis ao longo da mesma. Na figura 2.10 é possível observar exemplos de filtros “passa-alta” e “passa-baixa” e seus efeitos sobre o histograma da imagem. A janela móvel é um algoritmo que faz com que o deslocamento da mesma sobre a imagem substitua o valor do “pixel” central pela média dos seus nove “pixels” (no caso de matriz 3X3).

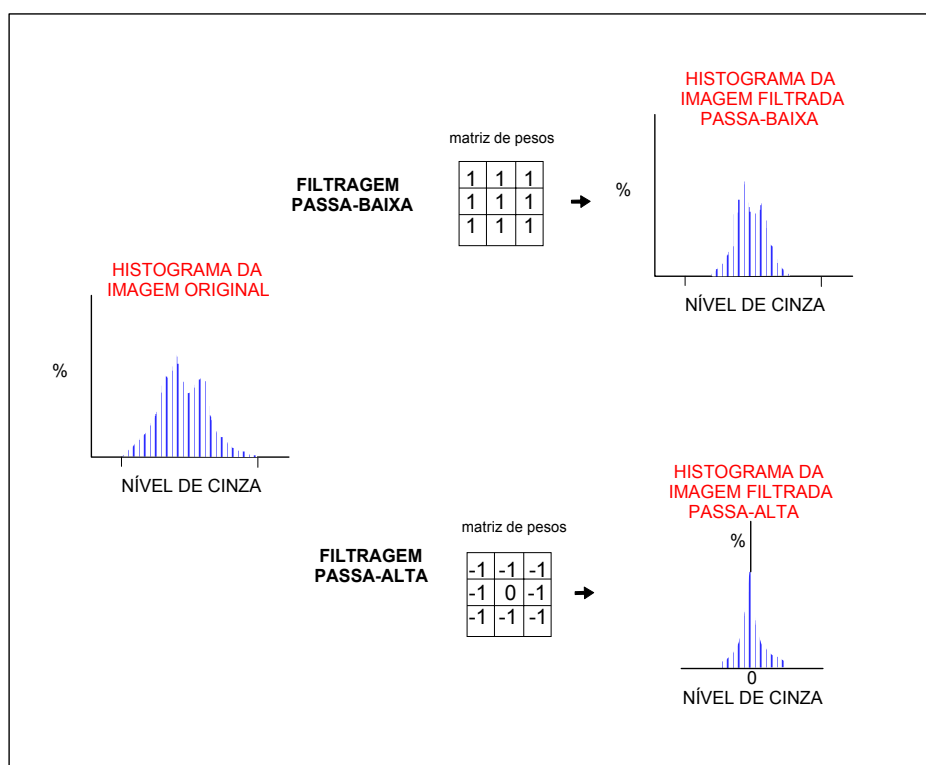
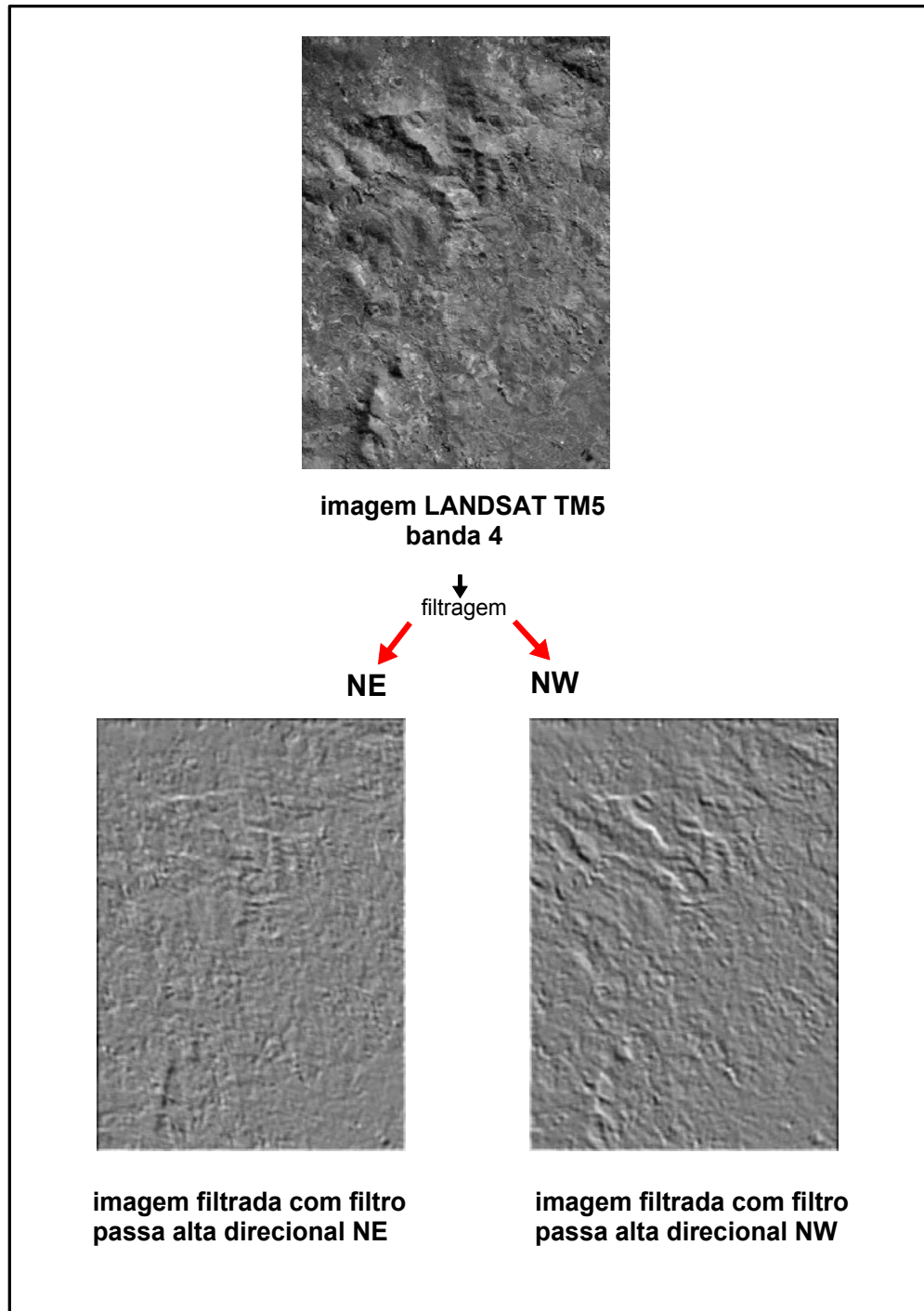


Figura 2.10 Efeitos da filtragem no domínio espacial sobre o histograma de uma imagem original. Modificado de Schowengerdt (1983).

A figura 2.11 ilustra a transformação de um imagem LANSAT TM5 banda 4 pelos processos de filtragem “passa-alta” em duas direções NE-SW e NW-SE, bem como mostra as matrizes de pesos utilizadas.



*Figura 2.11 Exemplo de imagem LANDSAT TM-5 banda 4 filtrada no domínio espacial do tipo passa-alta na direção NE-SW e NW-SE.*

### 2.3.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIGs)

Inicialmente serão definidos alguns conceitos e aplicações dos sistemas de informações geográficas (SIGs). Numa segunda etapa será descrita a estruturação dos mesmos, com ênfase nos programas computacionais destinados à manipulação de dados georreferenciados.

Um sistema de informações geográficas (SIG) pode ser definido em poucas palavras como um sistema computadorizado para gerenciamento de dados espaciais (Bonham-Carter, 1996).

A palavra *sistema* implica que um SIG é constituído por vários componentes interligados com diferentes funções, como aquisição, manipulação, transformações, visualizações, combinação, análise, modelamento e exportação de dados. O SIG consiste de um pacote computacional com interface para o usuário, que permite acessar funções particulares e controlar as operações com interface gráfica.

O termo *informação* implica que os dados em um SIG são organizados para alimentar o conhecimento do usuário através de mapas, imagens, tabelas, gráficos estatísticas, etc..

A localização espacial dos dados é conhecida ou pode ser calculada em coordenadas geográficas ou qualquer outro sistema de projeção, fazendo referência à palavra *geográficas*.

Os SIGs dispõem de ferramentas computacionais para a manipulação de mapas, imagens digitais e tabelas de dados georeferenciados, permitindo juntar diversos dados de fontes diferentes em um banco de dados único.

Encontram-se entre as aplicações gerais do SIG o planejamento ambiental, gerenciamento de recursos naturais, planejamento e gerenciamento urbano. Recentemente a tecnologia dos SIGs vem sendo utilizada para apoio a programas de proteção de qualidade da água.

O SIG é composto basicamente por dois importantes componentes: equipamento computacional e os programas aplicativos.

O equipamento computacional (figura 2.12), também chamado de “hardware”, é formado por uma unidade central de processamento (CPU) ligada a uma unidade de disco, permitindo o armazenamento dos dados e programas. Para a conversão de dados gráficos para a forma digital é usada uma unidade de digitalização (mesa digitalizadora). A representação gráfica dos dados processados é feita por um sistema de saída gráfica, como uma impressora ou “ploter”. O operador controla o computador e os periféricos por intermédio de um monitor de vídeo, denominado unidade de visualização.

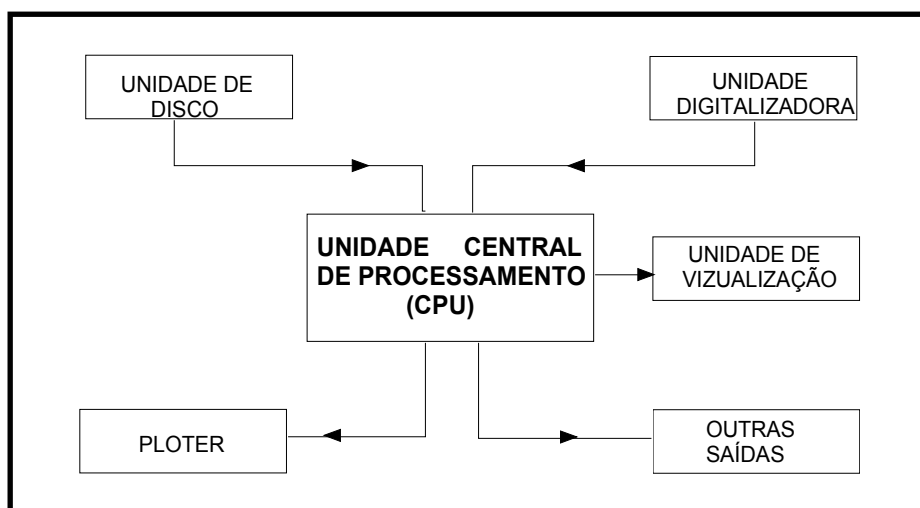
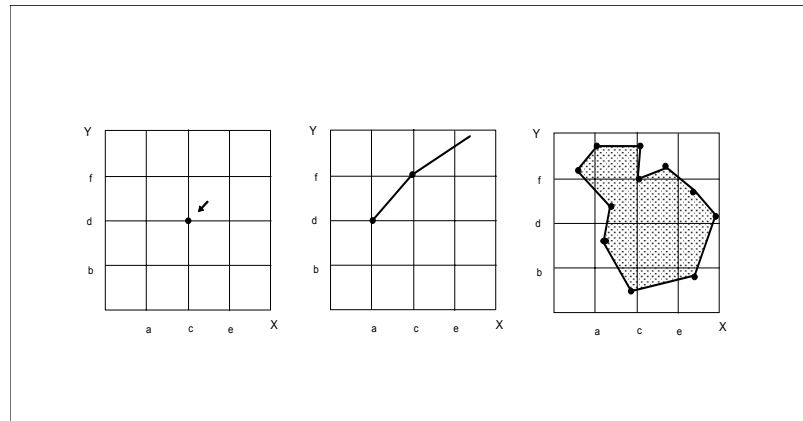


Figura 2.12 Componentes básicos de “hardware” de um SIG.

Existem uma série de programas computacionais desenvolvidos para manipular e integrar dados georeferenciados. Muitos destes programas são similares ao SIG, mas não em todos os aspectos. Tais programas apresentam uma série de propriedades funcionais, alguns são excelentes na produção cartográfica, outros são bons no modelamento de mapas, outros proporcionam um gerenciamento de banco de dados, etc.. Desta série pode-se destacar três sistemas que apresentam grande importância para esta pesquisa: “softwares para digitalização (CAD - computer aided drawing), sistemas de processamento de imagens, pacotes de interpolação e contorno.

Os sistemas de digitalização foram criados originalmente para produção de desenhos de engenharia, posteriormente sendo utilizados em geoprocessamento. Eles implementam uma estrutura vetorial de dados para a representação de pontos, linhas e

símbolos gráficos. O uso de vetores significa que um ponto em um desenho é definido por um par de coordenadas espaciais, e que linhas são construídas por uma série de pontos ordenados. As áreas ou polígonos são representadas por um conjunto de linhas; assim um desenho em formato digital consiste de um grande número de pares de coordenadas (figura 2.13).



*Figura 2.13 Formato digital de pontos, linhas e polígonos em um SIG.*

Os sistemas de processamento de imagens, já discutidos anteriormente, foram desenvolvidos para manipular e visualizar imagens digitais em formato “raster”, originadas principalmente a partir de sensores orbitais. São formadas por matrizes onde cada célula possui um valor digital que representa alguma medida (radiância, brilho, etc). Possibilitam uma grande variedade de processamentos, como também permitem a integração com os SIGs.

Os programas de interpolação e contorno são utilizados para a geração de mapas de contorno e/ou superfícies, partindo de dados organizados em tabelas, nas quais cada linha registra a posição geográfica e seu atributo. Um bom exemplo da utilização dos programas de interpolação é o modelo numérico do terreno (MNT) ou modelo digital do terreno (MDT), que pode ser definido como a representação numérica do relevo de uma superfície através de pontos individuais.

Os dados de um MNT são formados por um conjunto de vetores X,Y,Z sendo X e Y definidores de uma posição no espaço e Z o atributo associado àquela posição, no caso do MNT, a altitude. Além de serem utilizados para modelos de altimetria (figu-

ra 2.14), podem representar qualquer outra variação contínua de qualquer atributo Z ao longo de uma superfície (dados climáticos, geoquímicos, hidrológicos, níveis freáticos, batimetria, etc.). O modelo numérico do terreno normalmente é obtido através da digitalização de pontos e/ou curvas de nível (figura 2.13.A e B), que por processos matemáticos de interpolação fornecem uma grade de elevações (figura 2.13.C e D).

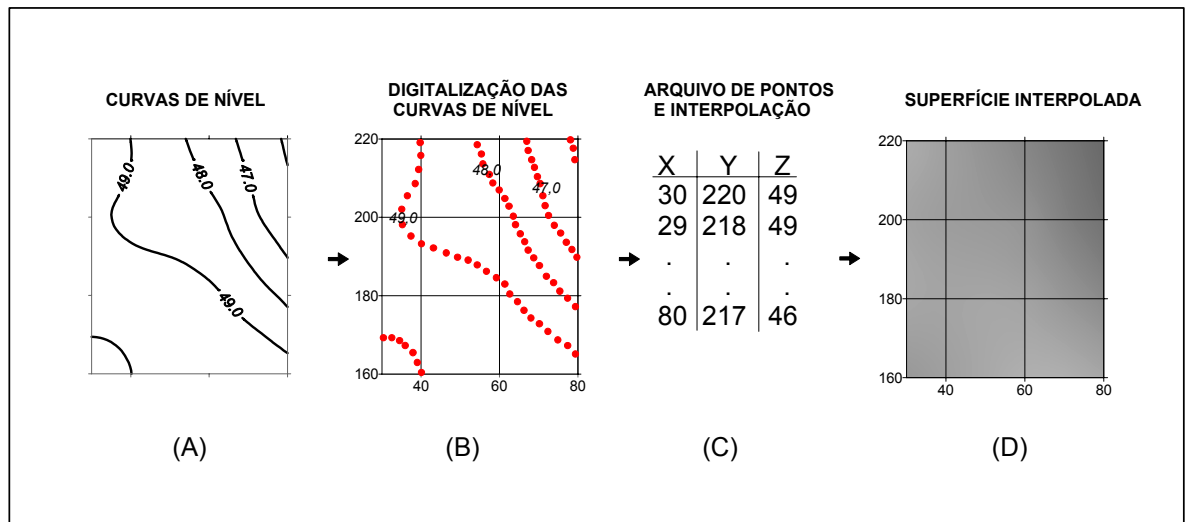


Figura 2.14 Representação esquemática de um modelo numérico do terreno (MNT).

É muito importante ressaltar a diferença entre o modelo e a sua representação visual. Uma equação matemática permite descrever de maneira contínua o relevo de uma superfície, no entanto para visualizar o modelo é necessário gerar a sua imagem. A imagem, portanto, é uma simples representação gráfica da discretização da equação matemática. Vários produtos podem ser obtidos a partir de um MNT como: blocodiagramas, perfis topográficos, cálculos de volume, mapas de contorno, mapas de declividade e aspecto, imagens sombreadas, delimitação de redes de drenagem e bacias hidrográficas, etc.

### 2.3.3 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Um mapa topográfico, com suas curvas de nível construídas a partir da restituição de fotografias aéreas, é algo bastante familiar. A observação de fotografias aéreas com estereoscópio permite visão de toda a superfície real do terreno e o traçado das curvas de contorno. Com os pontos de observação de solo, níveis freáticos, dados climá-

ticos, teores de minério, e outras variáveis naturais; o padrão real de variação não pode ser visto, mas pode ser amostrado por um conjunto de pontos (Burrough, 1986). O valor de uma entidade entre pontos amostrados pode ser interpolado, a partir do ajuste de um modelo de variação para os valores do conjunto de pontos. Assim é possível estimar o valor do local desejado.

Os métodos de interpolação englobam um modelo de variação espacial contínuo, que pode ser definido como uma suavização de uma superfície matematicamente definida (Burrough, op. cit.). Tais métodos incluem técnicas como as funções “splines”, superfícies de tendência, séries de Fourier e as médias móveis que incluem a krigagem; podendo ser divididos em métodos globais e localizados. Nos métodos globais ou universais, um modelo é construído a partir de todas as observações da propriedade em interesse para todos os pontos da área de estudo. São exemplos de métodos globais a análise de superfície de tendência e as séries de Fourier. Se caracterizam por não representar bem as pequenas variações locais, sendo mais utilizados para modelar grandes variações regionais. As técnicas de modelagem locais, como as “splines” e as médias móveis, estimam valores baseados na observação da vizinhança, permitindo que anomalias locais sejam acomodadas, sem afetar os valores da interpolação para os outros pontos da superfície.

O método global que mais facilmente descreve uma variação regional é o modelo de regressão polinomial. Uma linha ou superfície é ajustada pelos mínimos quadrados dos pontos amostrados, assumindo que as coordenadas espaciais X e Y são variáveis independentes, e o Z, propriedade de interesse, é a variável dependente. Na maioria das vezes Z não representa uma função linear de X, sendo necessário utilizar polinômios quadráticos, cúbicos ou de maior ordem (Figura 2.15). A grande vantagem da análise de superfície de tendência é que ela constitui uma técnica bastante fácil de ser entendida, com respeito à maneira como as superfícies são calculadas. Grandes feições podem ser modeladas com superfícies de tendência de pequena ordem. As superfícies de tendências são funções de suavização e por isso raramente passam sobre os pontos amostrados. O principal uso de uma superfície de tendência não é como interpolador,



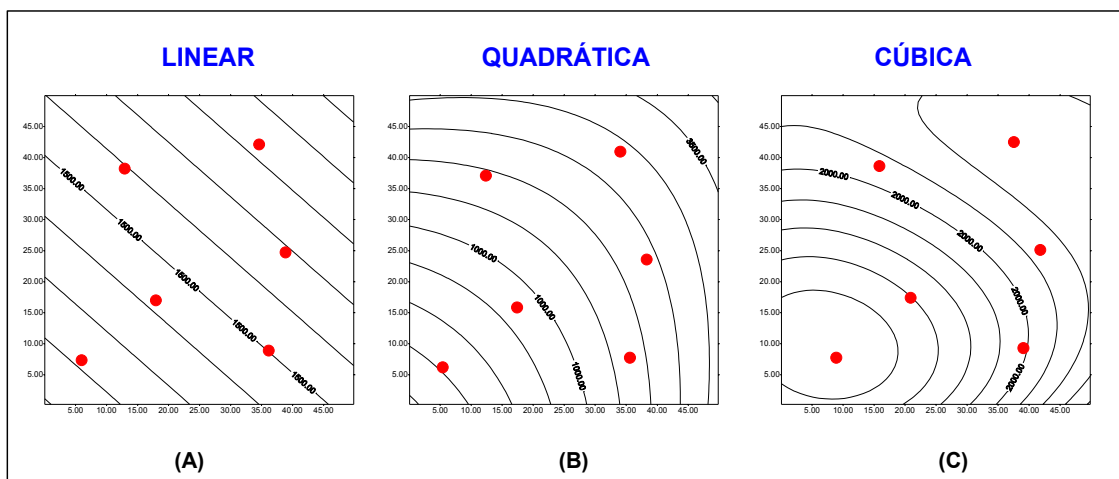


Figura 2.15 Três exemplos de superfícies de tendência geradas a partir de polinômios do tipo linear (A), quadrático (B) e cúbico (C).

mas como um modo de remover amplas feições de dados dando prioridade ao uso de interpoladores locais. A significância estatística de uma superfície de tendência pode ser testada usando a análise de variância entre a tendência e seus resíduos

As séries de Fourier são usadas para descrever variáveis uni ou bidimensionais por modelagem de variações observadas através de uma combinação de senos e cossenos. Séries de Fourier unidimensionais são utilizadas na análise de séries temporais com aplicações diretas em estudos de mudanças climáticas, enquanto que as séries bidimensionais tem sido usadas em geologia sedimentar (Burrough, 1986). Outra aplicação das séries de Fourier é no tratamento de imagens. Como a maioria das feições naturais são complexas e não apresentam variações de caráter periódico, exceto as marcas de onda (ripple-marks) e dunas de areia, este método é substituído por outros interpoladores.

As funções “splines” são equivalentes matemáticos das régua flexíveis utilizadas por desenhistas. São funções que ajustam um pequeno número de pontos de maneira exata, enquanto que ao mesmo tempo garantem que as juntas entre uma parte da curva e outra mantém continuidade. Isto significa que é possível modificar uma parte da curva sem alterar o total. Podem ser lineares como planares. As “splines” podem ser usadas tanto como interpoladores exatos como funções de suavização. Suas vantagens constituem em rapidez na interpolação dos dados, representando bem as feições

locais. Tanto as “splines” lineares como as planares são esteticamente favoráveis e produzem uma clara visão espacial dos dados. Uma das principais deficiências deste método é a impossibilidade de se avaliar diretamente os erros ligados à interpolação.

Um outro método de interpolação local, e dos mais utilizados, é o método das médias móveis. Baseia-se na interpolação de uma variável  $Z$  em um ponto não amostrado, computando um valor médio local determinado pelos dados da vizinhança, ou janela. Para dados regularmente espaçados, a média móvel para um ponto  $x$  no centro de uma janela simétrica é dado por:

$$Z(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i)] \quad (2.6)$$

onde  $\hat{Z}$  é o valor estimado para a posição  $x$  e  $n$  é o número de vizinhos. As médias móveis podem ser ponderadas por uma função da distância entre aquela observação e o lugar. A mais comum função ponderadora é a do inverso do quadrado da distância dada por:

$$Z(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \cdot d_{ij}^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2}} \quad (2.7)$$

onde  $x_j$  são os pontos através dos quais a superfície é interpolada e  $d$  é a distância entre os pontos. A forma da superfície de contorno resultante da interpolação por média ponderada depende da função, dos parâmetros da função usada, ou ainda pelo tamanho da janela na qual os pontos são analisados. A figura 2.16 ilustra três mapas de contorno obtidos por interpolação com diferentes ponderadores que variam o valor do peso.

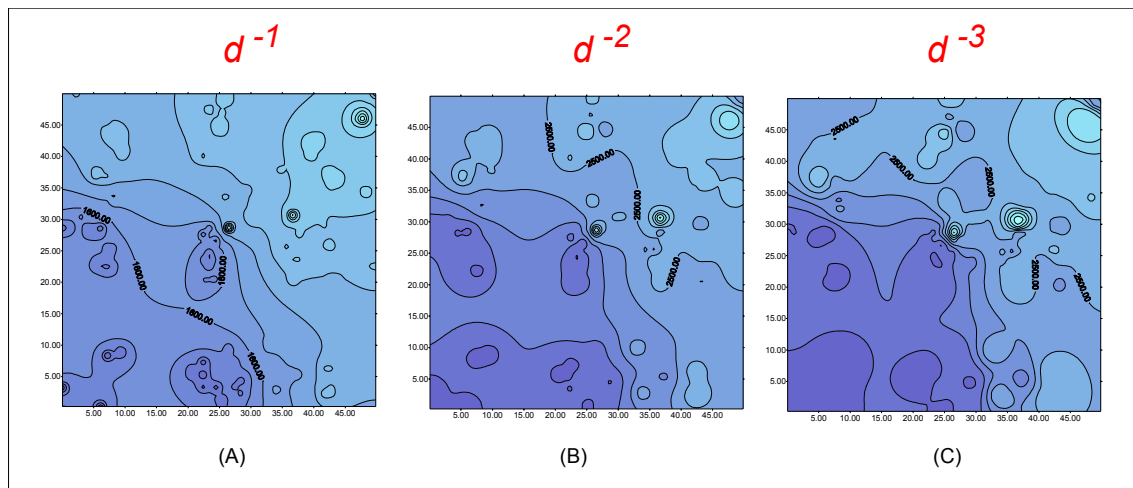


Figura 2.16 Efeito da variação do valor do peso nos ponderadores do inverso da distância:  $d^{-1}$  (A),  $d^{-2}$  (B) e  $d^{-3}$  (C).

Um método de interpolação bastante utilizado é o da autocovariância espacial (krigagem) inicialmente estudado, na década de 70, por geomatemáticos franceses e sul africanos para o desenvolvimento de métodos de interpolação ótimos com aplicação na mineração. O método reside na suposição que a variação espacial de qualquer propriedade geológica, hidrogeológica, pedológica, hidrológica, etc., conhecida como variável regionalizada, é muito irregular para ser modelada por funções matemáticas de suavização, sendo melhor representadas por uma superfície estocástica. A interpolação inicia-se pela exploração e modelagem dos aspectos estocásticos da variável regionalizada. A informação resultante é então usada para estimar os pesos  $\lambda_i$  para a interpolação. O sucesso da krigagem como interpolador exato baseia-se em certas suposições importantes em relação à natureza estatística da variação. Tais suposições, básicas para a krigagem, fundamentam-se na teoria variável regionalizada, assumindo que a variação espacial de qualquer variável pode ser expressa como a soma de três componentes maiores: componente estrutural, associada com um valor médio constante; uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e um termo de erro residual ou resíduo.

A krigagem fornece além dos valores estimados o erro associado a tal estimação, distinguindo-a dos demais algoritmos disponíveis. O método usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, ou uma área ou um volume. O variograma é a ferramen-

ta matemática que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas fornecendo uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos no espaço. Por definição o variograma de uma variável qualquer tem a seguinte expressão:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [x(z_i) - X(z_i + h)]^2 \quad (2.8)$$

onde  $X(z_i)$  é o valor da variável no ponto  $z_i$ ;  $(z_i + h)$  é o valor da variável no ponto  $z_i + h$ ;  $n(h)$  é o número de pares separados a uma distância  $h$ .

Como o semivariograma é uma função da distância entre locais amostrados, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos serão diferentes conforme o arranjo geográfico. As formas mais usuais de krigagem, não discutidas nesta pesquisa, são krigagem simples, ordinária e universal.

## 2.4 TEORIA DE CONJUNTOS BINÁRIOS (BOOLEANOS) E NEBULOSOS (FUZZY)

Uma das razões dos sistemas de informações geográficas é permitir juntar e combinar dados espaciais de diversas fontes, com a finalidade de descrevê-los e analisá-los interativamente fazendo previsões com modelos, dando subsídios para tomada de decisões ou planejamento. Dois modelos de distribuição de dados espaciais facilmente implementáveis num SIG serão discutidos; a Lógica Booleana e a Lógica Fuzzy.

A lógica Booleana é utilizada quando o critério define-se através de uma série de regras determinísticas que utilizam operadores algébricos como *E*, *OU*, *E/OU*, *NÃO*; para verificar se uma determinada condição é verdadeira ou falsa (Tabela 2.4).

Cada um dos mapas utilizados como uma condição podem ser tomados como planos de evidência, que são combinados para suportar uma hipótese ou proposição. Cada posição no espaço é testada para verificar se ela pertence ao conjunto pelo qual a hipótese é satisfeita, resultando em um mapa binário com valores de 0 (falso) e 1

(verdadeiro). A figura 2.17 ilustra uma operação binária na qual o objetivo é a obtenção de um mapa, que represente mata nativa ocorrendo sobre solo arenoso. São atribuídos valores de 1 para mata nativa e solo arenoso, e 0 para outras classes. A operação do tipo  $A \text{ E } B$  resulta em um mapa binário onde 1 representa a hipótese verdadeira (mata nativa e solo arenoso) e 0 as demais áreas consideradas como condição falsa.

*Tabela 2.4 Operadores de lógica Booleana (Adaptada de Burrough, 1986).*

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>NÃO A</b>	<b>A E B</b>	<b>A OUB</b>	<b>A E/OU B</b>
1	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	1
0	0	1	0	0	0
1=verdadeiro		0=falso			

A grande vantagem da abordagem Booleana é a sua simplicidade. A combinação lógica de mapas em um ambiente de geoprocessamento é análoga ao empilhamento de mapas em uma mesa de luz, método tradicional e largamente utilizado por muitos geólogos (Bonham-Carter, 1996).

Em casos onde normas tem sido estabelecidas por lei ou por código, as combinações Booleanas são práticas e de fácil aplicação. No entanto, na prática não é comum atribuir igual importância para cada um dos parâmetros que estão sendo combinados. Outro fator limitante é, que devido às complexidades dos processos naturais, as aplicações de regras de decisão simplificadas proporcionadas pela lógica binária não refletem as incertezas do processo.

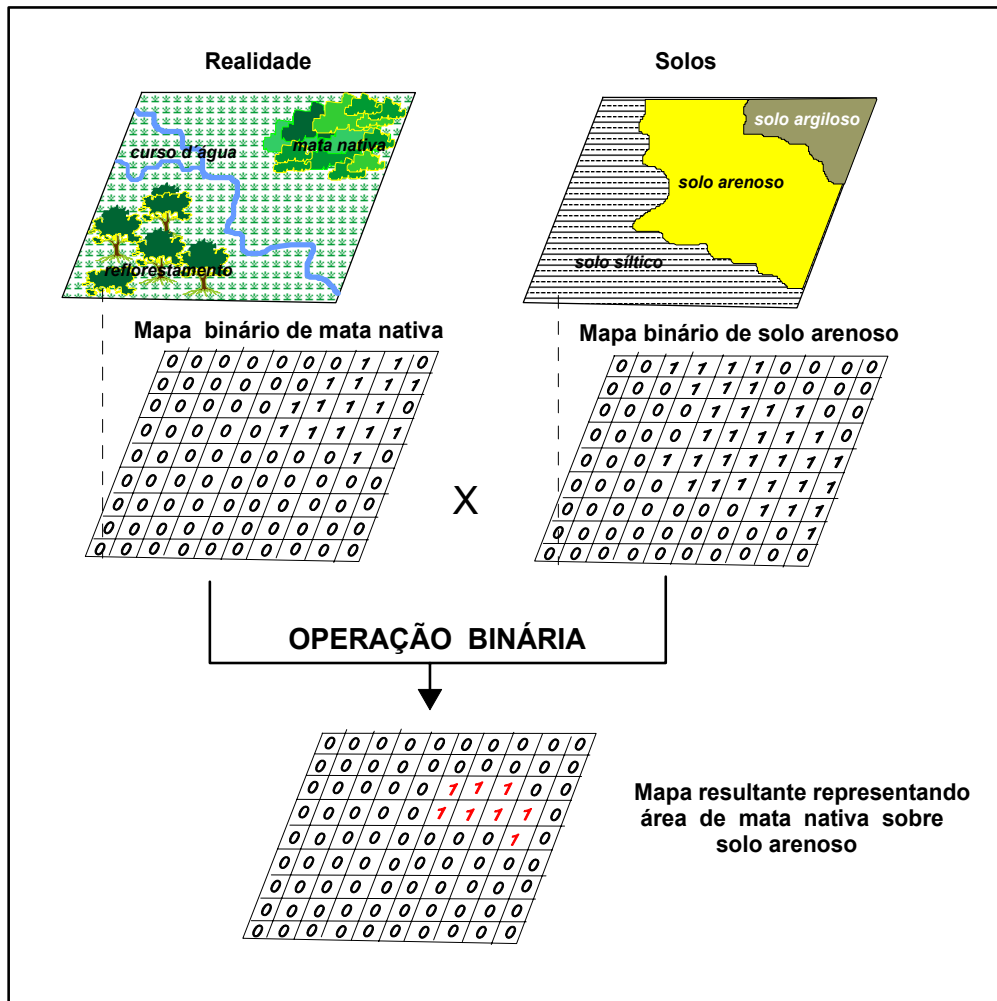


Figura 2.17 Exemplo de operação binária, onde o objetivo é a determinação de um mapa de mata nativa em solo arenoso.

Fuzzy é um tipo de imprecisão característica das classes que por muitas razões não podem, ou não tem limites bem definidos (Burrough, 1989). Tais classes indefinidas são denominadas conjuntos fuzzy. O termo fuzzy é normalmente associado com imprecisão e complexidade. É adequado usar conjuntos fuzzy sempre que se lidar com ambiguidade, imprecisão e ambivalência em modelos ou conceitos matemáticos de fenômenos empíricos.

Segundo Kandel apud Burrough (1989), a teoria dos conjuntos fuzzy classificam três tipos de erros:

- generalidade, que um conceito único aplica-se a uma variedade de situações

- ambiguidade, que um conceito único engloba mais do que um subconceito perceptível
- incerteza, que precisa limites indefinidos

Os conjuntos convencionais seguem somente funções de pertinência binárias (verdadeiro ou falso), isto é, um indivíduo é ou não é membro de um dado conjunto. Ao contrário, os conjuntos fuzzy admitem a possibilidade de uma pertinência parcial, configurando uma situação, onde os limites das classes não são, ou não podem ser bem definidas (figura 2.18).

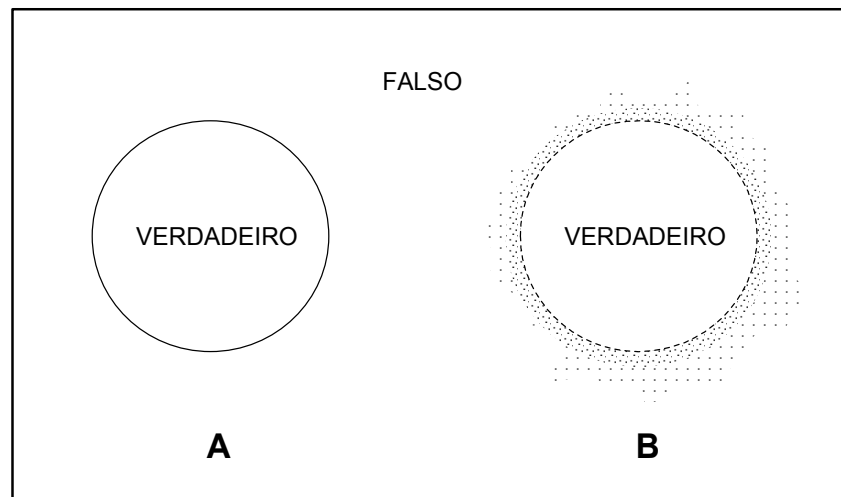


Figura 2.18 Comparação entre um conjunto (A) Booleano e um conjunto (B) Fuzzy. Adaptado de Burrough (1989).

Um conjunto fuzzy é definido matematicamente como : se  $X = \{x\}$  denota um espaço de objetos, então um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$  é o conjunto de pares ordenados

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \quad x \in X \quad (2.9)$$

onde  $\mu_A(x)$  é conhecido como o grau de pertinência de  $x$  em  $A$  e  $x \in X$  significa que  $x$  está contido em  $X$ . Normalmente  $\mu_A(x)$  é um número que varia de 0 a 1, com 1 representando a total pertinência e o 0 significando uma não pertinência. Os graus de pertinência de  $x$  em  $A$  reflete um tipo de ordenamento que não se baseia na probabilidade,

mas possibilidade admitida (Burrough, 1989). O valor de  $\mu_A(x)$  do objeto  $x$  em  $A$  pode ser interpretado como o grau de compatibilidade do atributo associado com o conjunto  $A$  e o objeto  $x$ ; isto é,  $\mu_A(x)$  de  $x$  em  $A$  quantifica o quanto  $x$  pode pertencer a  $A$ . A figura 2.19, adaptada de Van Ranst et al. (1996), ilustra graficamente a diferença entre os conjuntos binários tradicionais (booleano) e os conjuntos nebulosos (fuzzy), com um exemplo de “stress” em vegetação gerado pela disponibilidade de água no solo.

As funções de pertinência de um conjunto fuzzy define como o grau de pertinência de  $x$  em  $A$  é determinado. Para os conjuntos binários a função de pertinência é dada pela seguinte relação:

$$\mu_A(x) = 0 \text{ para } x < b, \text{ e } \mu_A(x) = 1 \text{ para } x \geq b \quad (2.10)$$

onde  $b$  define a condição limite exata.

Segundo Burrough (1989), existem duas maneiras de deduzir as funções de pertinência para os conjuntos fuzzy. A primeira é análoga às determinadas por análise de agrupamento (estatística multivariada) e taxonomia numérica nas quais o valor da função de pertinência é uma função de um classificador adotado. Existem diversos modelos para determinar tais funções, que fogem ao escopo desta pesquisa.

A segunda e mais simples maneira é baseada no uso de uma função de pertinência *a priori*, através da qual podem ser designados graus de pertinência a indivíduos.



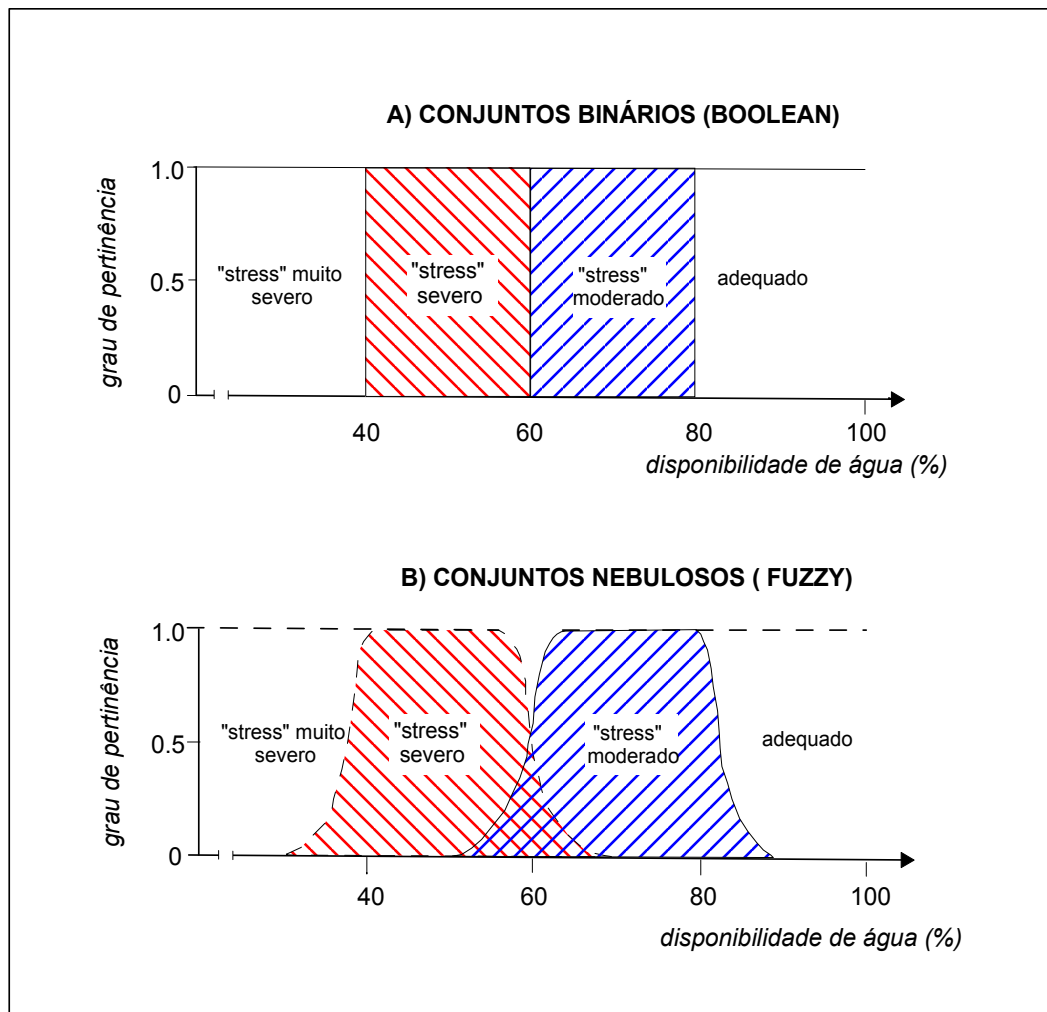


Figura 2.19 Representação gráfica da diferença entre conjuntos binários (booleanos) e conjuntos nebulosos (fuzzy), adaptado de Van Ranst et al. (1996).

A escolha de limites para conjuntos binários e de intervalos de classe pode ser feita de maneira objetiva ou subjetiva, dependendo da maneira pela qual os especialistas acreditam definir as classes (Burrough op. cit). Isto não significa afirmar que a escolha das classes é um processo arbitrário, entretanto, e muito freqüentemente, várias opiniões e discussões de especialistas ajudam na escolha dos limites de tais classes. No caso da escolha dos limites dos conjuntos fuzzy ocorre o mesmo fato. A função de pertinência deveria assegurar que o grau de pertinência seja 1,0 no centro do conjunto e que caia de maneira conveniente até a região periférica dos limites do conjunto, onde terá valor nulo. O ponto onde o grau de pertinência é igual a 0,5 é denominado ponto de

cruzamento (Burrough op. cit.). A função de pertinência deve ser definida de maneira que estas condições sejam asseguradas, o que não é possível para todas funções.

Entre as várias funções de pertinência, podem ser consideradas como as mais utilizadas as funções sigmoidal, forma de “J”, linear e definidas pelo usuário.

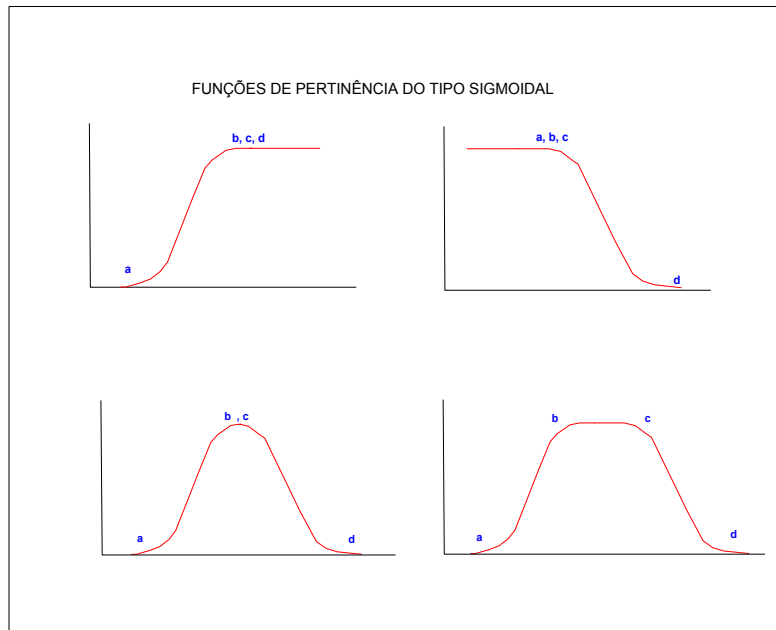
A função de pertinência sigmoidal, também conhecida como forma de “S”, é talvez a mais utilizada na modelagem fuzzy. (Eastman, 1995). Na lógica fuzzy é necessário ter a posição ao longo do eixo X de quatro pontos que definem o formato da curva indicados na figura 2.20 como a, b, c e d. Eles representam os pontos de inflexão da curva da seguinte maneira:

- a = pertinência acima de 0
- b = pertinência torna-se unitária
- c = pertinência abaixo de 1
- d = pertinência torna-se nula

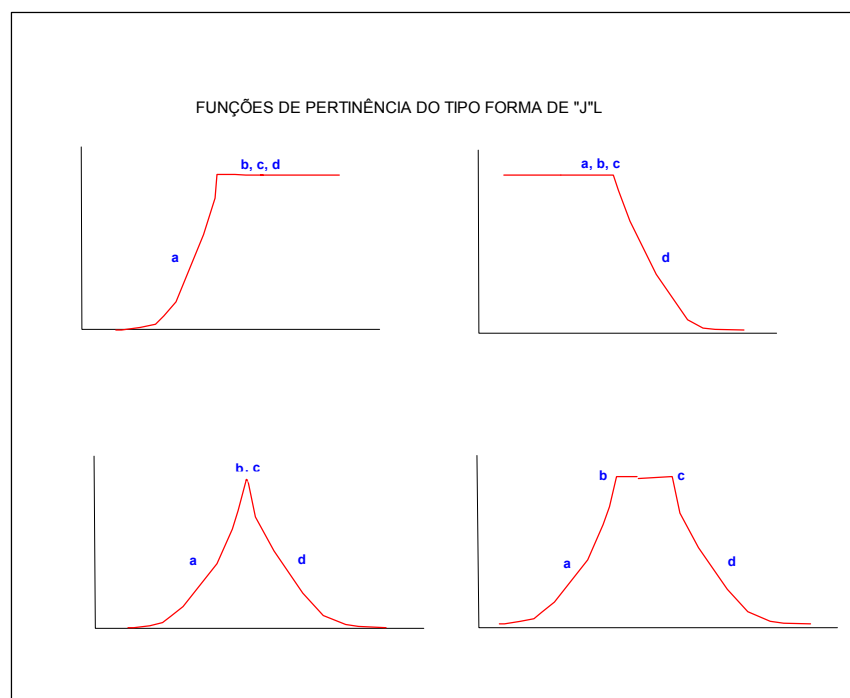
A função de pertinência sigmoidal apresenta quatro comportamentos distintos ilustrados na figura 2.20.: curva crescente, curva decrescente e duas curvas simétricas.

O outro tipo de função de pertinência é a de forma de “J” um pouco menos comumente utilizada que a anterior. A figura 21 mostra suas diferentes funções e as posições dos pontos de inflexão. A função aproxima-se de 0, mas tende ao infinito, e os pontos de inflexão *a* e *d* indicam os pontos onde a função atinge 0,5 até menos do que zero.

A função de pertinência linear é muito usada em projetos de painéis eletrônicos que utilizam a lógica fuzzy, devido a sua simplicidade e ao fato dos monitores trabalharem com sensores lineares. A figura 2.22 ilustra tais funções lineares e suas variantes.



*Figura 2.20 Diversas formas da função de pertinência sigmoideal e seus quatro pontos de inflexão da curva (adaptado de Eastman, 1995).*



*Figura 2.21 Diversas formas da função de pertinência em forma de "J" e seus quatro pontos de inflexão (adaptado de Eastman, 1995).*

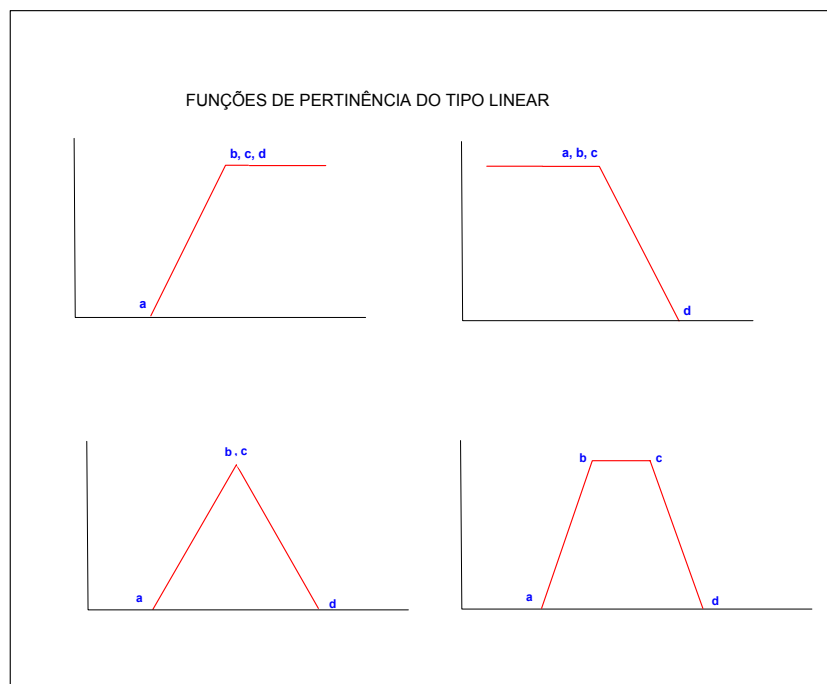


Figura 2.22 Formas da função de pertinência linear e suas variantes (adaptado de Eastman, 1995).

Quando a relação entre os valores e as funções de pertinência não se encaixam em nenhuma das situações vistas anteriormente, as funções devem ser definidas pelo usuário. Pontos de controle usados nesta função podem ser tantos quanto forem necessários para definir a curva da função de pertinência. A função de pertinência entre dois pontos de controle é obtida através de uma interpolação linear (Eastman, 1995).

As operações em conjuntos nebulosos (fuzzy) são similares às dos operadores binários. Burrough (1989) apresenta as seguintes definições em relação às operações de lógica fuzzy:

- Dois conjuntos fuzzy são ditos iguais ( $A=B$ ) se somente se:

$$\int_X \frac{\mu_A(x)}{x} = \int_X \frac{\mu_B(x)}{x} \quad \mu_A = \mu_B \quad (2.11)$$

- $A$  está contido em  $B$ , ( $A \subseteq B$ ) se:

$$\int_X \frac{\mu_A(x)}{x} \leq \int_X \frac{\mu_B(x)}{x} \quad (2.12)$$

- A união dos conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  é simbolizado por  $A \cup B$  como o menor subconjunto fuzzy que contém ambos  $A$  e  $B$ , e definido por:

$$A \cup B = \int_X \mu_A(x) \vee \frac{\mu_B(x)}{x} \quad (2.13)$$

onde  $\vee$  é o símbolo que representa o máximo. A união corresponde ao “OU”.

- A intersecção dos conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  é denotado por  $A \cap B$  e definido por:

$$A \cap B = \int_X \mu_A(x) \wedge \frac{\mu_B(x)}{x} \quad (2.14)$$

onde  $\wedge$  representa o mínimo. A intersecção corresponde ao “E”.

- O complemento de  $A$ , denotado por  $\bar{A}$ , é definido por:

$$\bar{A} = \int_X \frac{1 - \mu_A(x)}{x} \quad (2.15)$$

correspondente ao “NÃO”.

- O produto  $A$  e  $B$  é definido por:

$$AB = \int_X \frac{\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)}{x} \quad (2.16)$$

- A soma de  $A$  e  $B$  é definida por :

$$A \oplus B = \int_X 1 \wedge \frac{\mu_A(x) + \mu_B(x)}{x} \quad (2.17)$$

onde  $+$  é a soma aritmética. Pode ser interpretada como “OU”.

- A diferença de  $A$  e  $B$  é representada por:

$$A \ominus B = \int_X 1 \vee \frac{\mu_A(x) + \mu_B(x)}{x} \quad (2.18)$$

- Se  $A_1, \dots, A_k$  são subconjuntos fuzzy de  $X$ , e  $w_1, \dots, w_k$  são pesos não negativos, então a combinação de  $A_1, \dots, A_k$  é um conjunto fuzzy  $A$ , no qual a função de pertinência é a soma ponderada:

$$\mu_A = w_1\mu_{A1} + \dots + w_k\mu_{Ak} = \sum_{j=1}^k w_j\mu_{Aj} \quad (2.19)$$

onde  $\sum_{j=1}^k w_j = 1$ ,  $w_j > 0$ .

O conceito de combinação convexa é profícuo quando os modificadores lingüísticos como “essencialmente” e “tipicamente” são usados, os quais modificam os pesos associados com os componentes de um conjunto fuzzy. Tal idéia é particularmente apropriada na avaliação das ciências da terra (Burrough, 1989).

## 2.5 PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM MEIO FRATURADO

Inúmeros trabalhos referentes à pesquisa e captação de água subterrânea em rochas ígneas e metamórficas vêm sendo publicados desde o início do século. No entanto, ultimamente tem se verificado uma intensa utilização de métodos de pesquisa mais amplos usando não somente os métodos hidrogeológicos clássicos, mas também empregando outras técnicas mais recentes como o sensoriamento remoto, geoprocessamento, técnicas geomatemáticas, geofísica, etc.

A finalidade do presente levantamento é a apresentação dos principais artigos publicados em áreas de rochas duras nas várias partes do mundo e que envolvam, principalmente, o enfoque de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

De cada trabalho consultado foram considerados os aspectos fundamentais, possibilitando uma visão dos objetivos, metodologia empregada, características, resultados alcançados e por vezes uma breve discussão críticas dos mesmos.

Sampaio et al..(1986), desenvolvem um estudo de interpretação sistemática de dados de sensores remotos no Complexo Cristalino Sergipano com objetivo de delimitar áreas potenciais de exploração de água subterrânea. Adotam como metodologia a análise de relevo e drenagem para delinear os principais sistemas de falhas e juntas, caracterizando as morfo-estruturas favoráveis. Os produtos de sensoriamento remoto

utilizados são mosaicos de radar do Projeto RADAMBRASIL (1:250.000), imagens MSS-TM/LANDSAT papel fotográfico e fotografias aéreas pancromáticas (1:70.000); que são posteriormente integradas a uma escala final de 1 :100.000. O procedimento adotado partiu de uma escala regional para o detalhe. Os resultados apresentaram três áreas, que variam de muito favorável a desfavorável, ressaltando que as áreas são favoráveis à prospecção e não propriamente à locação de poços. Sugerem ainda que nas áreas determinadas como favoráveis fossem efetuados levantamentos geofísicos e estudos hidrogeológicos de detalhe.

Em um enfoque semelhante ao anterior Roccio e Veneziani (1992) utilizam dados de imagens LANDSAT-TM e fotografias aéreas para o estudo estrutural, integrados com o modelo numérico do terreno e curvas de fluxo de água subterrânea, que delimitam zonas segundo critérios de Mattos et al.. apud Roccio e Veneziani op. cit., na região do Vale do Paraíba em São Paulo. A geologia bem conhecida da área permite a separação de sistemas de fraturamentos abertos e fechados. A superposição dos vários planos de informações são feitos no sistema de informações geográficas do Inpe-SGI (Engespaço). Entretanto, tal trabalho apresenta uma incoerência evidente na determinação das linhas de fluxo, que foram tomadas como em meio poroso, o que não condiz com a realidade do meio anisotrópico típico das rochas cristalinas ocorrentes na área pesquisada.

Möbus (1987) emprega técnicas geomatemáticas de superfície tendência, tratando dados de distribuição espacial de lineamentos extraídos de fotografias aéreas 1:110.000 e imagem LANDSAT papel fotográfico 1:250.000. Também analisa parâmetros hidrodinâmicos e hidroquímicos de poços tubulares mediante a aplicação de análise de agrupamento. A área de estudo localiza-se na fronteira oeste do Rio Grande do Sul onde ocorrem aquíferos fraturados relacionados às efusivas da Formação Serra Geral. Aliando os dados da análise dos lineamentos aos dados da análise de agrupamento define áreas de potencial nesta região. A metodologia mostrou eficiência para a caracterização preliminar de áreas de potencial hidrogeológico a nível regional, apesar de ter enfrentado problemas com o número e a distribuição dos poços, que se distribuíam em aglomerados nas sedes municipais.

Em uma abordagem metodológica semelhante a de Mobüs (op. cit.), Takahashi (1991) utiliza também superfície de tendência, porém complementando com a análise do comprimento dos lineamentos além da frequência. A área estudada também localiza-se na Formação Serra Geral e enfrenta o mesmo problema da distribuição espacial dos poços, isto é, os mesmos concentram-se nas sedes dos municípios.

Barbosa et al (1994) analisa visualmente imagens LANDSAT-TM5 papel fotográfico, da região do Alto Sucuru (PE), definindo oito direções principais de falhamentos e duas zonas de cisalhamento. Baseado na análise de lineamentos, no tratamento estatístico para produtos de pequena escala, estudando a frequência de fraturas, tomadas em imagem e correlacionando com dados geo-estruturais de campo, o estudo determina treze áreas favoráveis à pesquisa de água subterrânea.. Assim definiu áreas, conforme a favorabilidade em relação à pesquisa de água subterrânea, agrupadas segundo os elementos estruturais abertos, híbridos e fechados.

Hardcastle (1995) integra vários produtos de sensoriamento remoto em diversas escalas para definir áreas onde o cristalino encontra-se mais fraturado. O objetivo é estudar o potencial de armazenamento e transmissão de significativos volumes de água subterrânea para grandes áreas ( $> 10 \text{ km}^2$ ). Para isto foi definido um fator fotolineamento baseado na soma normalizada de três parâmetros delimitados em células circulares: número de fotolineamentos, número de famílias direcionais e comprimento. O fator é calculado para cada célula, e atribuído ao seu centro denominado de nó, formando uma grade que posteriormente foi interpolada e assim gerado um mapa de contorno, que indica áreas com maior probabilidade de se encontrar água subterrânea. Uma limitação de tal método é que ele leva em conta somente a presença de lineamentos, sem separá-los em classes (vales e cristas, por exemplo), e não analisa outros parâmetros como litologia, topografia, etc.

Krishnamurthy et al (1996) delimitam zonas de potencial aquífero da Bacia do Marudaiyar na Índia, utilizando a integração de mapas temáticos como litologia, formas de relevo, lineamentos, densidade de drenagem, solos e classes de declividade. Estes mapas temáticos em escala 1:50.000 foram integrados e analisados segundo um modelo lógico desenvolvido em um sistema de informações geográficas, onde foram



atribuídos pesos às diversas classes envolvidas. Os polígonos referentes às áreas potenciais foram obtidos por meio de operadores binários de soma ou produto.

Sander (1997) utiliza uma abordagem de estatística bayesiana estudando três áreas de rochas cristalinas em Bostwana e Gana, na África. Foram integrados vários planos de informação em um ambiente de geoprocessamento produzindo mapas de probabilidade posterior para futuros detalhamentos. Os parâmetros analisados foram lineamentos, anomalias de vegetação, drenagem e geologia do substrato rochoso. As probabilidades de ocorrência de água subterrânea associadas aos parâmetros analisados foram baseadas na opinião de especialistas. Os lineamentos obtidos em imagens de satélite LANDSAT, SPOT, fotografias aéreas e mapas topográficos foram processados para geração “buffers”, os quais foram integrados com os demais parâmetros. Os mapas de probabilidade obtidos foram confrontados com dados de vazão de poços, obtendo uma correlação positiva média a alta para duas das áreas e ausência de correlação para a terceira.

Freitas e Mendes (1997) definem áreas de proteção de aquíferos fraturados na região de Porto Alegre, através de lógica booleana e fuzzy ,em ambiente de geoprocessamento. Os parâmetros utilizados foram litologia, uso do solo, classes de declividade e fraturamento. A lógica fuzzy mostrou uma maior variabilidade em termos de áreas de proteção, indicando valores entre 0 e 1, predominando valores médios de 0,5.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia adotada para esta pesquisa pode ser dividida em quatro etapas básicas: aquisição de dados básicos; processamento inicial de dados; análise conjunta de lógica booleana e fuzzy para avaliação do potencial hidrogeológico e validação dos resultados.

#### **3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS BÁSICOS**

Tal etapa se deu inicialmente através do levantamento bibliográfico de assuntos pertinentes ao tema, como sensoriamento remoto aplicado à geologia estrutural, geoprocessamento e técnicas de prospecção hidrogeológica.

Posteriormente, definida a área do estudo de caso, foram selecionados os trabalhos anteriormente executados na região e os dados básicos necessários para a execução da pesquisa, estes resumidos na tabela 3.1.

Os dados relativos à caracterização geológica da área foram obtidos de várias fontes : Schneider *et al.* (1974), Philipp *et al.*(1994.), Philipp (1995), Ramgrab e Wildner (1996). O mapa base é o da primeira referência citada, Mapa Geológico da Folha de Porto Alegre, revisado e atualizado pelas demais publicações. Etapas de campo foram necessárias para a verificação das feições lito-estruturais, pedológicas, bem como geomorfológicas.

A base cartográfica foi formada pelas cartas topográficas 1:50.000 do Serviço Geográfico do Exército SH-22Y-B-III-2 Porto Alegre, SH-22-V-D-VI-4 São Leopoldo, SH-22-Y-B-III-1 Guaíba, SH-22-Y-B-III-4 Itapuã, e folhas 1:10.000 da Metroplan para complementar áreas com menor detalhe altimétrico (áreas planas junto ao Guaíba) nas cartas do exército.

*Tabela 3.1 Base de dados utilizada na pesquisa.*

<b>DADOS</b>	<b>TIPO</b>	<b>DATA</b>	<b>FONTE</b>
MAPA GEOLÓGICO	mapa escala 1:50.000	1974	Instituto de Geociências UFRGS
CARTAS TOPOGRÁFICAS	Folha Porto Alegre, Guaíba, São Leopoldo e Itapuã Escala 1:50.000	1977	Serv. Geográfico do Exército
IMAGEM LANDSAT TM5	Imagem digital órbita 221 ponto 81	agosto de 1988 e novembro de 1995	CEPSRM e Inst. Geociências
AEROFOTOS	Fotografias escala 1:110.000 e 1:60.000	1975 e 1964, respectivamente	CPRM e Dep. Geodésia Instituto de Geociências
80 POÇOS	Planilha	diversas	Empresas construtoras: Coperbrás, Corsan, Hidrocon e Hidrogeo

Foram utilizadas imagens de satélite de duas épocas diferentes; uma de agosto de 1988 e a outra de novembro de 1995. A primeira, de baixa elevação e baixo azimute solar, foi usada para a extração de feições morfo-estruturais, devido ao alto sombreamento apresentado. A mais recente foi utilizada para a determinação das classes de uso do solo.

As fotografias aéreas foram usadas para o traçado de lineamentos morfo-estruturais e feições geomorfológicas em duas escalas diferentes: 1:110.000 e 1:60.000. Tais fotos foram emprestadas pela Companhia de Recursos Minerais (CPRM) e pelo Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da UFRGS, respectivamente. As primeiras são do levantamento de 1977, executadas pela Cruzeiro do Sul em 1975, a uma altitude de 9800 metros. As aerofotos 1:60.000, executadas pelo

Ministério do Exército, datam de novembro de 1964 e à exemplo das primeiras, as faixas de vôo são leste-oeste.

Os dados de 80 poços tubulares cadastrados na área de estudo foram gentilmente cedidos pelas empresas construtoras de poços Coperbrás, Corsan, Hidrocon e Hidrogeo, sob a forma de perfis litológicos-construtivos e fichas de análises químicas

### **3.2 PROCESSAMENTO INICIAL DE DADOS**

Todos os dados básicos obtidos foram inicialmente digitalizados em um sistema de digitalização, composto por uma Unidade Central de Processamento (CPU), duas Unidades de Visualização (UVI) e uma mesa digitalizadora tamanho A-0. O tratamento e processamento dos dados foram posteriormente desenvolvidos em outros pacotes auxiliares, os quais serão descritos a seguir.

O mapa geológico escala 1:50.000, após revisão e atualização, foi colocado sobre a mesa digitalizadora, onde foi feita a calibração segundo o sistema de coordenadas planas UTM. Desta maneira os polígonos (total de 13) e linhas das várias unidades lito-estratigráficas digitalizadas tiveram seu atributo espacial georeferenciados. Tais dados vetoriais foram rasterizados com resolução espacial de 100 metros e exportados para o pacote computacional de tratamento de imagens.

As cinco unidades de natureza sedimentar e idade quaternária foram agrupadas, através de uma rotina de reclassificação, em uma única unidade denominada de Quaternário. As seis unidades granitóides mais os depósitos de encosta derivados de alteração do cristalino foram ordenados conforme sua importância hidrogeológica.

A ordenação baseada na idade, constituição mineralógica, granulometria, estado de deformação e grau de alteração, se constituiu num dos parâmetros para a avaliação do potencial hidrogeológico.

As cartas topográficas serviram para a geração do modelo numérico do terreno (MNT), o qual foi construído a partir da digitalização de 815 curvas de nível (eqüidistância de 20 m) e de pontos retirados de tais cartas. Os dados foram exporta-

dos do sistema de digitalização em formato ASCII, no total de 106082 pontos organizados em três colunas: coordenada UTM Leste, coordenada UTM Norte e altitude em relação ao nível do mar em metros (tabela 3.2). Tais pontos foram processados em um programa de interpolação com função de mínima curvatura. Desta maneira obteve-se uma imagem raster com 255 níveis de cinza correspondentes às altitudes determinados pelo modelo.

*Tabela 3.2 Representação dos pontos obtidos pela digitalização das curvas e pontos das cartas topográficas, necessários para a geração do MNT.*

PONTO	UTM-E	UTM-N	ALTITUDE (m)
1	482931	6655021	20
2	482923.9	6655053	20
3	482919.3	6655087	20
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
106081	497613.8	6685658	1.5
106082	497640.3	6685689	1.5

A partir do modelo numérico do terreno obteve-se as 5 classes de declividades separadas conforme o potencial de infiltração de água proveniente da precipitação utilizado no modelo DRASTIC (United States Protection Agency apud Evans e Myers, 1990), ou seja, por exemplo, declividades acima de 18 % foram consideradas como situação não favorável, pois a água tende a permanecer menos tempo sobre a superfície escorrendo mais rapidamente.

As imagens de satélite LANDSAT TM 5 foram submetidas inicialmente a um pré-processamento digital, onde foi feita a correção geométrica das mesmas. Foram selecionados 12 pontos de controle facilmente identificáveis na imagem com correspondência nas cartas topográficas e distribuídos regularmente pela área. No sistema de tratamento de imagens, onde foi feito o georeferenciamento, optou-se pelo polinômio de 1<sup>o</sup> grau (linear) e reamostragem para um pixel de 100 metros pelo método do vizi-

nho mais próximo, obtendo-se um erro médio de 27,58 metros para a imagem de inverno e 28,8 metros para a de verão.

A imagem digital LANDSAT TM5-bandas 4 e 5, de agosto de 1988 serviu para o traçado dos lineamentos morfo-estruturais, adotando o princípio da não inferência (Schuck *et al.*, 1988). O traçado foi feito diretamente no monitor de vídeo da unidade de visualização (UVI) do sistema de digitalização, em escala aproximada de 1:150.000.

Para a classificação digital foi utilizada a imagem de novembro de 1995, pelo fato de ser mais nova e apresentar menor sombreamento. Quatro classes foram escolhidas de acordo com as suas influências no comportamento hidrogeológico da área, principalmente no tocante às condições de recarga: área urbana, floresta, campo e solo exposto. A classe água representada pelo Lago Guaíba, apesar de não exercer influência nenhuma na hidrogeologia do cristalino da área, foi separada para efeito estético. Foram amostradas várias áreas de treinamento representativas das classes, devidamente reconhecidas em campo, e posteriormente avaliadas no sistema de tratamento de imagens. O algoritmo adotado foi o maxverossimilhança já que existia um bom conhecimento prévio da área.

A fotointerpretação foi executada em estereoscópio de espelhos adotando o princípio da não inferência. Inicialmente foram analisadas visualmente imagens digitais LANDSAT-TM 5 com baixa elevação solar as bandas 3, 4 e 5 (escala 1:250.000) e Mosaicos de Radar do Projeto RADAM-BRASIL (escala 1:250.000), para fornecer uma visão regional sinóptica das principais estruturas geológicas ocorrentes na região, além de aspectos gerais da geomorfologia.

Os lineamentos morfoestruturais do tipo 2 (Amaro e Strieder, 1994) traçados em transparências de acetato sobre as fotografias aéreas foram levados para a mesa digitalizadora, onde se fez a calibração com a base cartográfica e a sua digitalização. Tais dados vetoriais (figura 3.1), representados pelas coordenadas UTM de seus pontos extremos  $\{(x_1, y_1); (x_2, y_2)\}$  foram exportados em um arquivo ASCII,

dando suporte para a etapa de cálculo estatístico e da geração de grades usadas para determinação do índice de fraturamento.

A partir dos arquivos ASCII acima descritos foram gerados vários diagramas estatísticos de roseta para a determinação das direções preferenciais de fraturamento nas diversas escalas analisadas.

As grades, com células de 100X100 metros, foram obtidas a partir da integração dos dados vetoriais dos vários produtos de sensoriamento remoto como a imagem digital de baixa elevação solar e fotografias aéreas nas escalas 1:110.000 e 1:60.000. Três parâmetros normalizados foram envolvidos na geração das grades: comprimento, frequência e intersecção de lineamentos, (figura 3.2). Um grande comprimento sugere que os lineamentos têm maior probabilidade de serem interceptados por outros, além de representar a magnitude da deformação. A presença de numerosos lineamentos indicam que tais feições têm uma forte expressão e aumentam a probabilidade de ocorrência de água subterrânea. O parâmetro intersecção representa a interligação dos lineamentos, também sendo diretamente proporcional à possibilidade de ocorrência de água subterrânea.

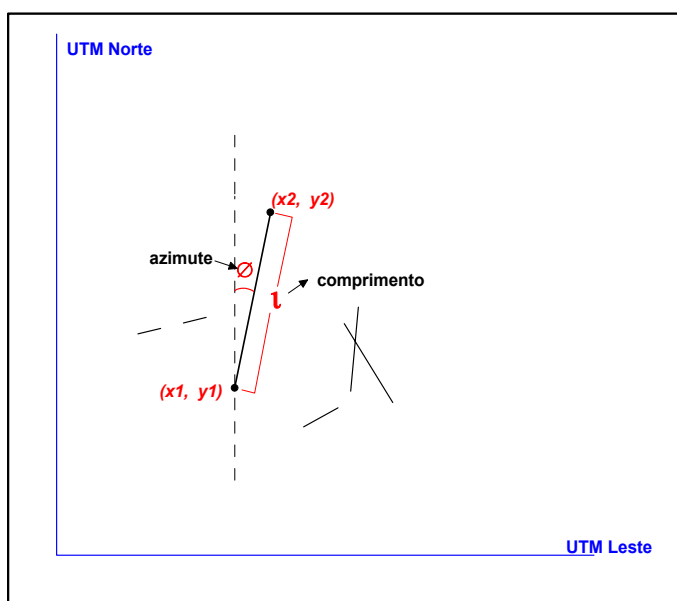
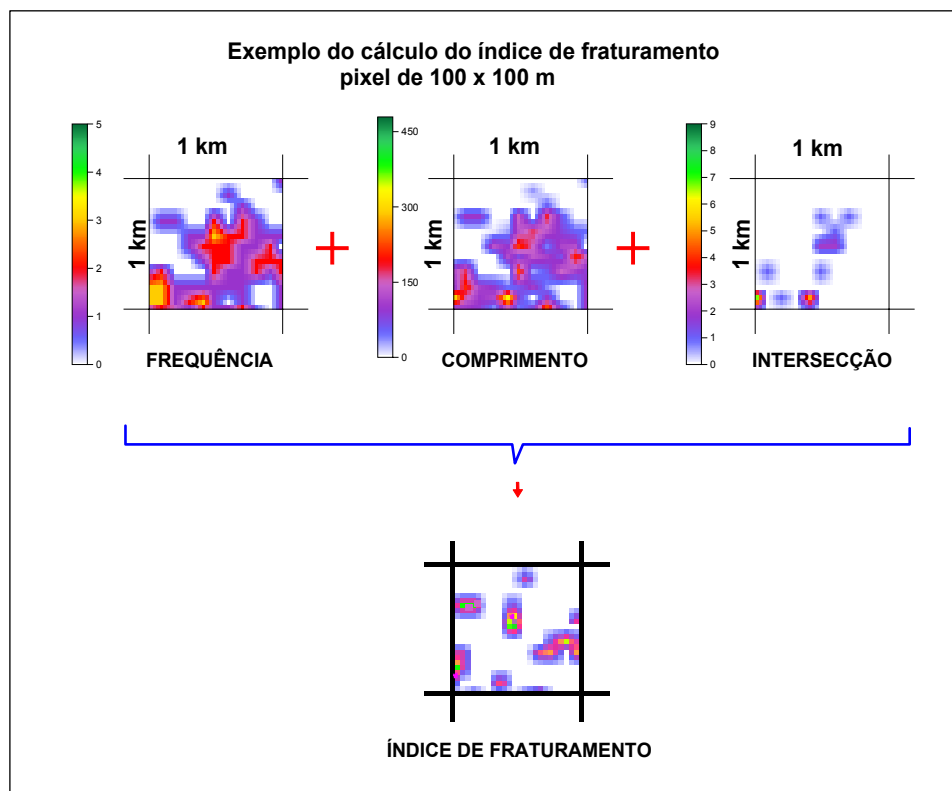


Figura 3.1 Esquema da representação vetorial de um lineamento morfoestrutural.



*Figura 3.2 Esquema mostrando como foi calculado o índice de fraturamento através das grades normalizadas de frequência, comprimento acumulado e intersecção de lineamentos morfoestruturais.*

Os poços tubulares, após a identificação, consistência dos dados e localização, foram georeferenciados. Além das coordenadas, parâmetros como cota da boca, profundidade, quantidade de revestimento, filtros, entrada d'água, vazão, nível estático, nível dinâmico e capacidade específica, foram digitados em uma planilha. Convém ressaltar que nem todos os poços contém dados completos, principalmente os referentes ao ensaio de bombeamento.

Os dados relativos à espessura da camada de solo, alteração de rocha e rocha alterada, indicados pela quantidade de revestimento, serviram juntamente com os dados de 334 sondagens geotécnicas spt e registros de afloramentos, para a determinação do comportamento e distribuição do manto de alteração das rochas granitóides. Os dados foram submetidos a um processo de interpolação, através de krigagem, que gerou



o mapa de tendência da espessura do manto de alteração, usado como um dos parâmetros na determinação do potencial hidrogeológico

Alguns programas específicos tiveram de ser desenvolvidos para a compatibilização de dados na fase de processamento inicial, principalmente na exportação de dados da digitalização para a interpolação e contagem dos lineamentos morfoestruturais.

### 3.3 ANÁLISE CONJUNTA DE LÓGICA BOOLEANA E FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO

Esta fase do desenvolvimento metodológico é marcada pela integração de todos os parâmetros envolvidos no modelo de caracterização do potencial hidrogeológico, isto é, unidades litológicas, declividade do terreno, uso do solo, índice de fraturamento e espessura do manto de alteração, potencial este modelado através de lógica booleana e lógica nebulosa (fuzzy).

O primeiro passo foi a normalização das variáveis quantitativas para valores compreendidos entre 0 e 100, com a finalidade de permitir a comparação e a integração dos parâmetros envolvidos. Tal procedimento foi realizado a cada plano de informação por meio da seguinte expressão:

$$V_p = \left( \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

onde  $V_p$  significa o valor padronizado obtido,  $V_i$  é o valor original dos dados e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  são os limites determinados na normalização. Os parâmetros normalizados em conjunto com os dados qualitativos (classes litológicas e de uso do solo) foram classificados segundo a sua influência no potencial hidrogeológico, designando notas de 0 a 100 baseadas na experiência e conhecimento da área.

No caso da lógica booleana três operações foram realizadas: multiplicação, soma e soma ponderada. Para isto os mapas foram reclassificados em termos de valores

binários, ou seja leva valor “1” se for favorável ao potencial hidrogeológico e “0” se for desfavorável.

O primeiro operador binário utilizado foi o tipo “E” (AND) que consiste em uma multiplicação de mapas, na qual onde existir pelo menos um parâmetro de valor nulo o resultado é anulado.

O segundo caso de análise estudado foi o operador de soma entre os planos, onde se obteve resultados de potencial em ordem crescente reclassificados em 0, 1, 2, 3, 4 e 5, onde:

- 0 -potencial nulo
- 1 -potencial muito baixo
- 2 -potencial baixo
- 3 -potencial médio
- 4 -potencial alto
- 5 -potencial muito alto

O terceiro caso foi analisado adotando-se uma ponderação dos parâmetros conforme sua importância relativa em relação ao potencial hidrogeológico, também baseado no conhecimento da área e em pesos clássicos consagrados da literatura. Para a litologia (LITOL) foi considerado um peso 8, 7 para a declividade (DECL), 5 para o uso do solo (USOL), 10 para o índice de fraturamento (IFRAT) e 5 para a espessura do manto de alteração (ALTER). Assim foi obtida a seguinte expressão para o potencial hidrogeológico:

$$\text{Pot.Hidro.} = \frac{(8 \times \text{LITOL} + 7 \times \text{DECL} + 5 \times \text{USOL} + 10 \times \text{IFRAT} + 5 \times \text{ALTER})}{35} \quad (3.2)$$

No caso da lógica fuzzy foi feito para cada um dos parâmetros uma padronização “fuzzy” dos dados definindo o grau de pertinência das classes de cada variável em relação ao potencial hidrogeológico. Adotou-se como função de pertinência uma função equivalente a uma do tipo sigmoideal. Critérios semelhantes ao caso booleano foram adotados para os parâmetros analisados, porém ao invés de 0 e 1, definiu-se para

cada variável os limites em relação ao comportamento hidrogeológico isto é, favorável ou não favorável. Foram realizadas três operações fuzzy: multiplicação, soma e soma ponderada dos parâmetros.

A operação de multiplicação fuzzy equivale ao operador binário “E”, porém no processo foram considerados os valores mínimos dos planos de informações envolvidos. Na operação de soma fuzzy, correspondente ao “OU” binário, foram considerados os valores máximos de cada parâmetro limitado a 1, ou seja, se a soma entre dois parâmetros fosse superior a 1, o resultado era 1; se a soma fosse inferior a 1 então considerou-se o valor obtido. A avaliação fuzzy ponderada é uma operação de soma ponderada na qual os valores dos ponderadores variam de 0 a 1, e foram baseados no conhecimento da área, à exemplo da lógica booleana de som ponderada.

### **3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS**

Nesta fase foi feita a comparação dos mapas de potencial hidrogeológico, obtidos através da lógica binária e fuzzy, com os dados de poços tubulares construídos na área de estudo (anexo 1).

O ideal para testar os modelos seria utilizar os dados de capacidade específica, porém a maioria dos poços não dispõe de registro de níveis estático e dinâmico. Assim optou-se pela plotagem dos valores de vazão sobre cada mapa de potencial, a fim de verificar a correlação entre a produtividade dos poços e os diferentes potenciais hidrogeológicos mapeados.

A partir de então foi elaborada uma análise da tendência da distribuição dos pontos em um gráfico onde foram confrontados o valor do pixel (potencial) e a vazão do poço. Foi realizada uma análise de regressão simplificada com o intuito de determinar o coeficiente de correlação e de determinação para um intervalo de confiança de 95 %. Anteriormente os perfis e dados dos poços foram analisados um a um, e aqueles que apresentaram problemas construtivos como desmoronamentos, má captação, colmatação, etc, foram descartados para não tornar a análise tendenciosa ou incoerente.

## **4 ESTUDO DE CASO: A REGIÃO DE PORTO ALEGRE**

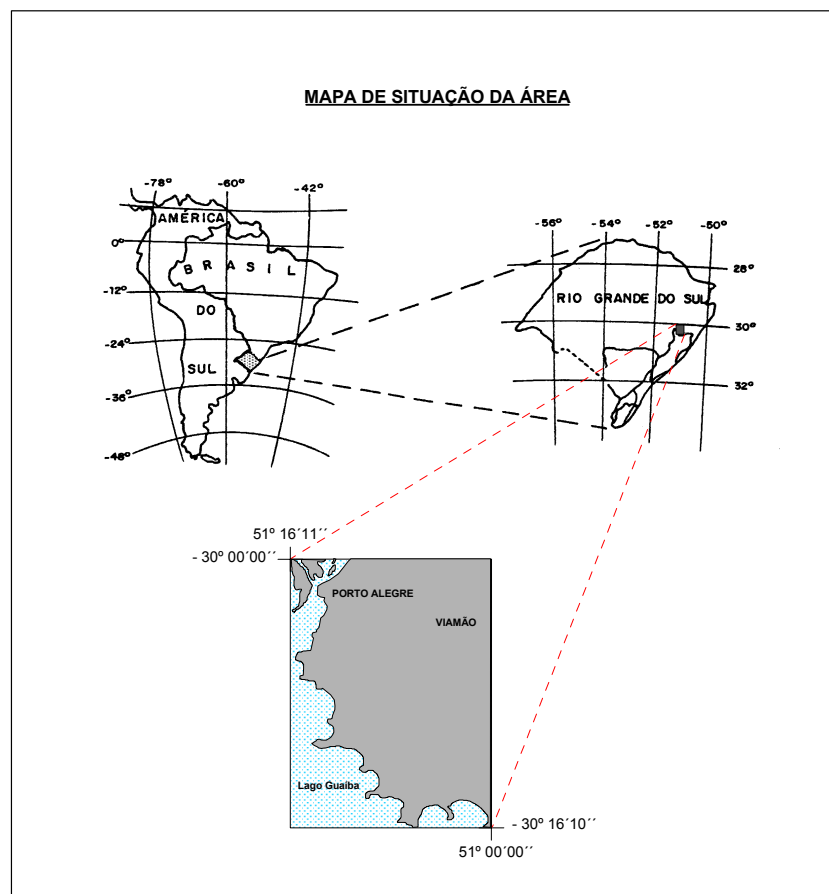
Devido ao fato de ocorrerem na maior parte da área aquíferos de meio fraturado, se ter um bom conhecimento da área permitindo uma melhor validação dos resultados, disponibilidade de dados, e à crescente demanda de utilização de água subterrânea verificada ultimamente com a construção de vários poços tubulares, muitos improdutivos, decidiu-se por aplicar esta metodologia na região de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.

### **4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA**

A área de estudo compreende o município de Porto Alegre e porções de Alvorada e Viamão. Situado na porção leste do estado do Rio Grande do Sul (figura 4.1), à margem esquerda do chamado Rio Guaíba, ultimamente denominado Lago Guaíba.

### **4.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS**

A região de Porto Alegre tem um clima subtropical úmido sem estiagens; com temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio oscilando entre 3° C e 18° C. A média é de, aproximadamente 19,3° C, variando entre os valores mensais médios de 24,6° C e 13,8° C, respectivamente nos meses de janeiro e julho. A amplitude térmica vai de 40,7° C a 4° C, representando uma diferença de 36,7° C.



*Figura 4.1 Esquema de localização da área de estudo de caso*

A precipitação anual na região é de aproximadamente 1277 mm, com valores mensais mínimo de 76 mm e máximo de 136 mm. As chuvas caem regularmente durante o ano todo e as diferenças entre os valores mensais extremos não são significativas, embora as maiores precipitações ocorram nos meses de inverno e início da primavera. O número médio de dias por ano com chuva na região (102 dias) cujos valores médios extremos são de 7 a 10 dias/mês, não sendo constatada época do ano atípica com referência ao número de dias de chuva fora deste intervalo. A umidade relativa do ar apresenta a média anual de 77%, com variações mensais entre 72% e 83%, respectivamente, nos meses de janeiro e junho. Estas características climáticas além da influência direta na recarga dos aquíferos, desempenharam importante papel, ao longo dos tempos, no intemperismo das rochas gerando espessos mantos de alteração, que além de constituir um aquífero superior, na maioria das vezes favorece a recarga do aquífero fraturado.

O balanço hídrico para a região de Porto Alegre, calculado baseado em dados obtidos junto ao 8º Distrito de Meteorologia e resumidos na tabela 4.1 (Brum e Freitas, 1992), demonstra que a recarga dos aquíferos ocorre no período de junho a setembro, em um montante de 71 mm anuais, correspondendo a 71.000 m<sup>3</sup> / km<sup>2</sup>. O solo permanece saturado apenas de maio a setembro, verificando-se o déficit de umidade no restante do ano.

*Tabela 4.1 Demonstrativo do balanço hídrico para a região elaborado com médias históricas dos dados do 8º Distrito de Meteorologia (adaptado de Brum e Freitas, 1992).*

MÊS	*PPT . (mm)	**DEF. (mm)	***PPTUT (mm)	◇ EVTP (mm)	PPTU -EVTP (mm)	ÁGUA NO SOLO	ÁGUA P/ RECARGA
janeiro	105	12	93	137	-44	-	-
fevereiro	96	10	86	117	-31	-	-
março	93	12	81	108	-27	-	-
abril	99	34	65	71	-6	-	-
maio	100	29	71	50	+21	21	21
junho	128	61	67	33	+44	30	44
julho	116	66	50	32	+18	30	18
agosto	136	80	56	40	+16	30	16
setembro	129	76	53	51	+2	30	2
outubro	106	67	39	74	-35	-	-
novembro	76	28	48	88	-40	-	-
dezembro	93	17	76	123	-47	-	-
<b>ANO</b>	<b>1277</b>	<b>492</b>	<b>785</b>	<b>944</b>			<b>71</b>

\* Precipitação total em mm

\*\*\* Precipitação útil

\*\*Deflúvio em mm

◇ Evapotranspiração

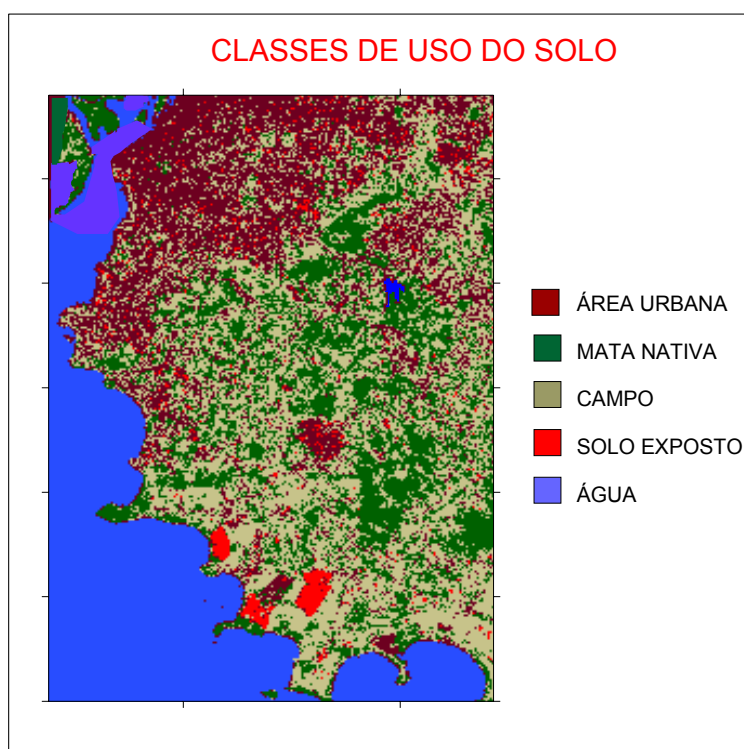
### 4.3 USO DO SOLO

A classificação digital maxverossimilhança da imagem LANDSAT TM 5 de novembro de 1995, com boa iluminação e pouco sombreamento, onde quatro classes foram escolhidas conforme suas influências na hidrogeologia da região. As classes ilus-

tradas na figura 4.2 são : área urbana, mata nativa, campo e solo exposto. Convém lembrar que a quinta classe, a água, foi separada somente para efeito visual.

A primeira classe, a área urbana ocupa 180.04 km<sup>2</sup> representando 28,24 % da área total estudada, distribuída preferencialmente na porção norte e noroeste da área, também apresenta algumas concentrações esparsas como no centro da área correspondendo ao Bairro Restinga. Esta classe tem influência negativa sobre o comportamento do aquífero fraturado, pois as construções, o asfalto e o concreto causam uma impermeabilização do solo, prejudicando a recarga.

A classe mata nativa representada por florestas de médio porte bastante densas que se distribuem principalmente nas encostas dos morros, especialmente na zona centro-sul, ocupa uma área de 134,59 km<sup>2</sup> , ou seja, 21,11%. Esta classe desempenha importante papel na recarga dos aquíferos, isto é, além de proteger o solo dos impactos das gotas de chuva, retém a umidade permitindo um melhor infiltração.



*Figura 4.2 Mapa de uso do solo obtido a partir da classificação digital da imagem LANDSAT TM5 de novembro de 1995 (Escala aproximada 1:357000).*

A terceira classe, os campos cobertos por vegetação de gramíneas e arbustos, ocorrem principalmente no topo dos morros e possuem a maior cobertura em área das classes analisadas: 204,29 km<sup>2</sup> (32,04%). À exemplo da classe anterior, também favorece a infiltração de água no solo, porém em menor escala.

O solo exposto formados por áreas degradadas e áreas de lavoura em fase de preparo do plantio, ocupam 18,43 km<sup>2</sup> o que equivale a 2,9 % da área. Tais áreas são problemáticas em relação à recarga dos aquíferos, pois a superfície descoberta do solo está sujeita ao impacto dos pingos de chuva, o que causa uma certa compactação do material. Além disto pode ocorrer erosão do solo expondo rocha alterada também diminuindo a capacidade de infiltração.

A classe água que ocorre no lago Guaíba e na Barragem da Lomba do Saibão tem uma superfície de 100,27 km<sup>2</sup> perfazendo 15,72 % do total. Não influi de maneira alguma no comportamento dos aquíferos fraturados. Está representada somente como ilustração.

#### **4.4 GEOLOGIA**

A Geologia da Região de Porto Alegre é apresentada a seguir de uma forma resumida e bastante objetiva, com ênfase voltada para fornecer subsídios à definição do comportamento hidrogeológico da região. A figura 4.3. modificada de Schneider et al. (1974). ilustra as várias litologias que ocorrem na área.

As rochas graníticas da região de Porto Alegre representam a continuidade da parte central do Cinturão Dom Feliciano no setor oriental do Escudo Sul-Rio-Grandense. Tal terreno geológico é formado por uma extensa associação de rochas granitóides e gnáissicas de alto grau metamórfico. Tanto as estruturas primárias, quanto as secundárias, são fortemente influenciadas pela direção nordeste o que evidencia o controle da tectônica brasileira no posicionamento dos corpos graníticos (Philipp et al., 1994). Segundo o mesmo autor, os grandes lineamentos de direção nordeste representam falhamentos transcorrentes. Posterior ao período da atividade transcorrente, uma fase



distensiva se desenvolveu, na qual várias fraturas de distensão foram preenchidas por diques ácidos.

A unidade litológica mais antiga está representada por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos, que em conjunto com os biotita-monzogranitos porfíricos representam o Complexo Granito-Gnássico Pinheiro Machado (Ramgrab e Wildner, 1996) . Os granitóides pertencentes ao Domínio Dom Feliciano são representados, em ordem decrescente de idade, por, biotita-sienogranitos, sienogranitos róseos e feldspato- alcalino-granito.

Os ortognaisses são compostos por gnaisses granodioríticos a monzoníticos de cores negras com bandamentos finos descontínuos e polideformados. Por vezes encontram-se recortados por diques e apófises de sienogranitos esbranquiçados. Em geral apresentam intenso grau de alteração com solos bem desenvolvidos, criando uma boa expectativa para ocorrência de água subterrânea, desde que esteja fraturado.

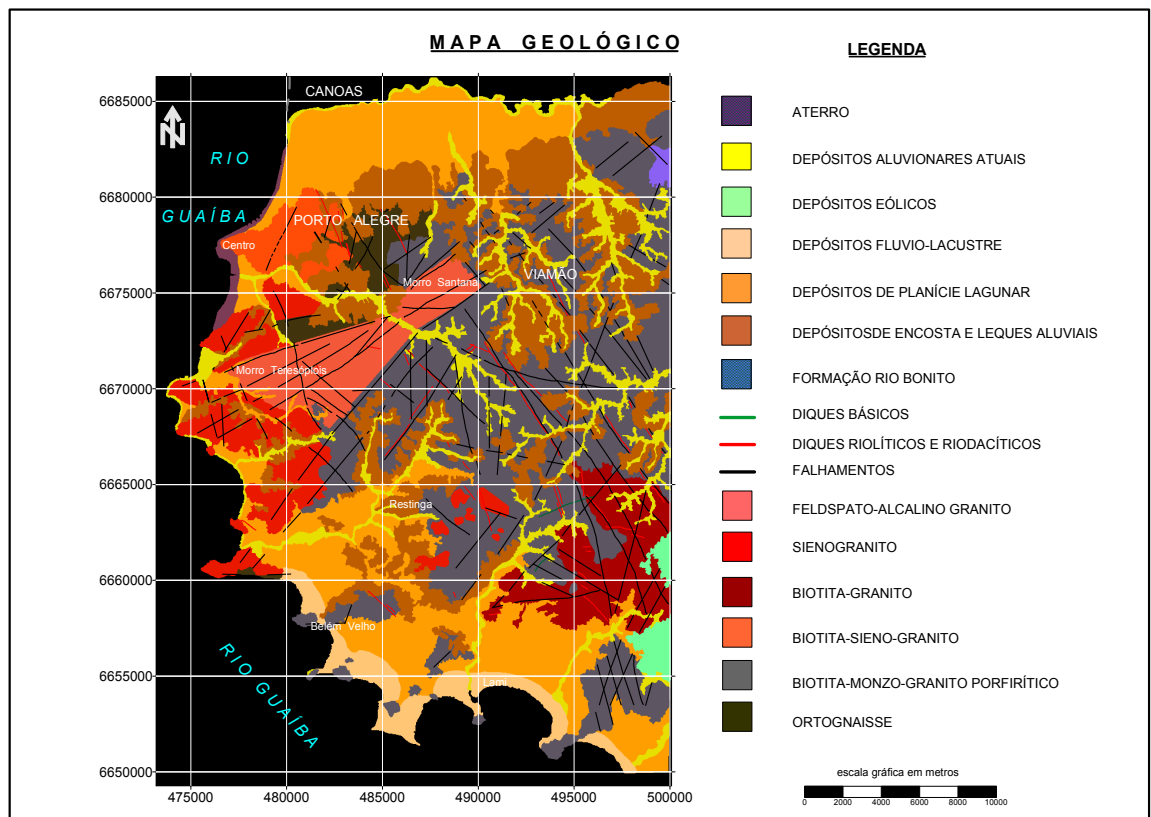


Figura 4.3 Mapa geológico modificado de Schneider et al. (1974).

Os biotita -monzogranitos porfiríticos ocupam a maior parte da área e são caracterizados por apresentarem megacristais de ortoclásio e microclínio rosados (2 a 10 cm) em matriz hipidiomórfica cinzenta de composição granodiorítica rica em biotita. Uma marcante foliação é marcada pelo alinhamento dos pórfiroclastos de feldspato e filossilicatos, bem como o estiramento dos minerais da matriz. Em certos locais, principalmente em vales encaixados em zonas de fraturamento, desenvolvem espessos mantos de alteração podendo ter influência positiva no comportamento hidrogeológico.

A terceira unidade granítica, biotita sienogranito, é constituída por granitóides esbranquiçados de textura média a grossa composta por ortoclásio-microclínio, plagioclásio, quartzo, muscovita e biotita. Nas zonas de falha costumam apresentar forte “graisenização”. Em geral possuem espessura de solo e alteração de rocha moderado. Seu potencial hidrogeológico está praticamente restrito à zonas de fraturamento cobertas por manto de alteração moderado.

Os sienogranitos são rochas rosadas a avermelhadas, médias a grossas, isotropas em geral (exceção à pequenas faixas miloníticas), muitas vezes diferenciando-se das anteriores pelo menor teor de biotita, normalmente apresentam fluorita e apatita. De modo geral seu grau de alteração é incipiente com solos médios a rasos. Seu potencial hidrogeológico está restrito a grandes fraturamentos. A sudeste da área ocorre uma variação desta litologia, de granulação mais grossa, com feldspatos alcalinos zonados e grau de alteração intenso, antigamente denominado por Schneider et al. (1974) de Granito Cantagalo.

A última unidade granítica Pré-Cambriana é o feldspato-alcalino-granito, o qual ocorre sob a forma alongada de direção nordeste (Morros Santana e da Polícia) controlada por falhamentos e disposta em uma zona de cisalhamento de idade Brasileira (Philipp, 1995), o que confere à rocha uma textura milonítica (Philipp et al., op. cit.). Em geral é hipidiomórfica grossa com a foliação magmática marcada pela orientação do feldspato potássico e biotita, como também pelo quartzo alongado. Há ocorrências de fluorita e molibdenita. Esta unidade é a que apresenta as piores condições para a ocor-

rência de água subterrânea, pois além de estar em uma zona elevada, não possui quase solo e suas fraturas encontram-se na maioria das vezes preenchidas por sílica.

Por último, interceptando as unidades anteriores, ocorrem os diques de riolitos e dacitos porfíricos de espessura métrica, com direção predominante NW, atingindo por vezes extensões quilométricas. Estes diques vêm a prejudicar a ocorrência de água subterrânea pois quando intrusionados tendem a ocupar a maioria dos espaços vazios.

Em períodos mais recentes (mesozóico), uma série de eventos tectônicos causaram intenso fraturamento sobre o embasamento cristalino, muitos deles reativando os sistemas mais antigos, onde muitas vezes se instalaram diques básicos (diabásios da Formação Serra Geral). Em geral quando se apresentam alterados e fraturados contribuem com entradas d'água, o que é verificado em alguns poços da região.

No extremo nordeste da área ocorrem sedimentos do Permiano inferior, Formação Rio Bonito em discordância com o embasamento cristalino, sem expressão como aquífero.

O Cenozóico está representado por sedimentitos de depósitos de encosta e leques aluviais, de planície lagunar, flúvio-lacustre, eólicos e depósitos aluvionares atuais.

Os depósitos gravitacionais de encosta (elúvios e colúvios) são constituídos por conglomerados, diamictitos, arenitos conglomeráticos imaturos, arenitos e lamitos, maciços ou com estruturas acanaladas, com cores entre o vermelho e amarelo, gradando para sistemas de leques aluviais e canais anastomosados nas porções mais distais. Ocorrem muitas vezes sobre zonas de fratura, e devido à sua composição e granulometria possibilitam a recarga do meio fraturado. Também podem constituir bons aquíferos granulares.

Depósitos de barreira marinha, compostos por areias quartzosas finas a médias, bem selecionadas, semiconsolidadas, ocorrem a leste-sudeste da área.

Os depósitos de planície lagunar são formados por uma sequência mista de areias finas a médias, imaturas e mal classificadas, depósitos siltico-argilosos e intercalações de argilas plásticas. Geralmente constituem um aquífero muito produtivo, porém com pobre qualidade de água (cloretos elevados). A quarta unidade sedimentar cenozóica, os depósitos flúvio-lacustres compõem areias e argilas inconsolidadas ligadas aos sistemas flúvio-deltáico e flúvio-lacustre, estabelecidos sobre os depósitos lagunares. À exemplo da unidade anterior apresentam grandes vazões com águas de má qualidade.

Por último, nas planícies aluviais, encontram-se depositados areias e cascalhos imaturos e mal selecionados, localmente areias finas, siltes e argilas orgânicas, sem expressão como aquífero.

## **4.5 GEOLOGIA ESTRUTURAL**

Este item, fundamental no estudo de aquíferos de meio fraturado, refere-se a análise da estruturação geológica, iniciando com uma panorâmica da tectônica atuante na região, limitando-se à descrição de feições de meso e mega-escala, principalmente àquelas decorrentes de tectônica rúptil. Tais feições foram extraídas através de técnicas de sensoriamento remoto.

A obtenção e interpretação de maior número de dados de afloramentos foi prejudicada pela intensa ocupação urbana, aliada a presença de espesso manto de alteração das rochas na maior parte da área. Na zona menos urbanizada foi possível medir atitudes em alguns afloramentos e pedreiras a fim de verificar a correlação com os dados obtidos na análise das imagens.

### **4.5.1 Tectônica regional e implicações na área**

As rochas cristalinas da região de Porto Alegre representam a continuidade do Cinturão Dom Feliciano (Phillip et al., 1994) e apresentam uma tectônica que é reflexo do que ocorreu nas demais áreas a sudoeste.

Picada (1971) discorre sobre a tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense classificando as direções de falhamentos em quatro sistemas principais:

- Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (N-40° -E)
- Sistema de Falhas Passo do Marinheiro (N-S)
- Sistema de falhas Açotéia-Piquirí (N-30° -E)
- Sistema de Falhas Noroeste (N-70° -W)

O primeiro sistema compreende os grandes falhamentos de direção N-35 a 75° -E de idade pré-cambriana, com direção típica de N-40<sup>0</sup>-E. Corresponde a uma antiga fratura abissal ao longo da qual se alinham corpos graníticos recortados por brechas, milonitos e cataclasitos de grandes dimensões. No decorrer dos tempos geológicos inúmeras reativações têm ocorrido sendo as principais na época do rasgamento do Sistema do Passo do Marinheiro e a segunda, posterior ao permo-carbonífero onde se originou a Falha do Leão (Picada, 1971).

A maioria das falhas são acompanhadas de brechas, milonitos e faixas de cataclases (granitos) quase sempre cimentadas por sílica (quartzo e calcedônia) altamente resistente à erosão, fato que mantém a topografia sob a forma de cristas alinhadas e bem ressaltadas.

O sistema de Falhas Passo do Marinheiro engloba as falhas de direção N-S com variações de N-05 a 15<sup>0</sup> -W do tipo transcorrente, com planos de falha e brechas cimentadas por sílica à exemplo da anterior.

O terceiro sistema, Açotéia-Piquirí, é formado por falhas de direção N-30<sup>0</sup> -E com variações para N-20 a 35<sup>0</sup> -E e são responsáveis pela formação dos “grabens” e “horsts”. O movimento predominante foi vertical enquadrando tais falhamentos no tipo falhas de gravidade (Bagdley apud Picada, 1971).

Por último, o sistema de Falhas Noroeste, constituído por falhas de direção N-65 a 75<sup>0</sup> -W. Não atingem dimensões regionais, ficando na ordem de 5 a 10 km de extensão. São fraturas trativas com movimentos verticais predominantes, os planos de

falha são verticalizados ou subverticais preenchidos por sílica, riolitos e, ocasionalmente, por diabásio.

Os quatro sistemas têm sido reativados durante a evolução geológica dos tempos. As falhas sobre os depósitos permo-carboníferos da Bacia do Paraná são regidas pelas antigas direções dos sistemas antigos do seu embasamento.

Segundo Picada (1970) a última reativação ocorreu no Pleistoceno na ocasião da formação da Coxilha das Lombas na Planície Costeira, dado posteriormente muito contestado pois as sondagens para carvão executadas pela CPRM não encontraram rejeitos de falha.

Observando a figura 4.4 verifica-se cinco sistemas de falhamentos além da distribuição espacial de diques ácidos e foliações. Os sistemas de falhas são:

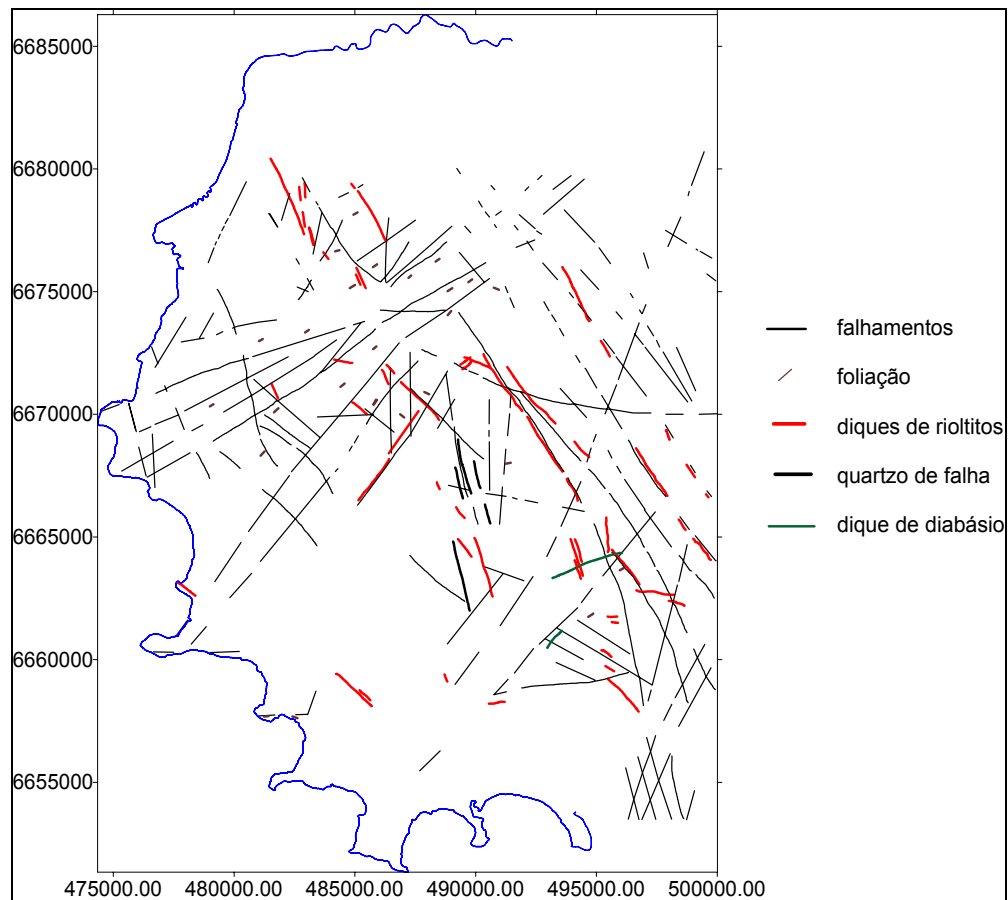
- N-40-70<sup>0</sup>-E
- N-20-30<sup>0</sup>-E
- N-20-40<sup>0</sup>-W
- N-S
- E-W

No primeiro sistema ocorrem grandes falhamentos (maiores que 15 km) com direção N-60<sup>0</sup>-E predominantes, que coincidem com a zona de cisalhamento dúctil (Philipp et al., 1994). As foliações no feldspato-alcalino-granito e em suas encaixantes tem direções N-50-70<sup>0</sup>-E subvertical (figura 4.5), muitas vezes conferindo uma textura milonítica à rocha. Provavelmente está relacionada ao sistema de falhas da Dorsal de Canguçu (Picada, 1970).

O sistema N-20-30<sup>0</sup>-E ocorre em menor número, no entanto apresenta as maiores extensões (até 30 km). Pode estar ligada ao sistema de falhas Açotéia-Piquirí descrito anteriormente.

O terceiro sistema, N-20-40<sup>0</sup>-W, está representado por um grande número de falhas com extensão variando de 11 a 16 km, muitas vezes associadas a diques riolí-

ticos e riódacíticos, o que lhe confere caráter distensivo na época em que foram geradas (pré-cambriano), e que podem ter sido reativados em eventos tectônicos mais jovens.



*Figura 4.4 Caracterização estrutural das rochas granitóides, exibindo os sistemas de falhas, foliações, diques ácidos e cataclasitos; adaptado de Schneider et al. 1974 (Escala aproximada 1:312.500).*

O sistema N-S está bem marcante na porção central da área, possivelmente corresponde ao sistema de falhas Passo do Marinheiro, já que normalmente está associado a cataclasitos e brechas bastante silicificadas.

O último sistema ocorre principalmente ao sul e sudoeste da área onde estão alinhados a Ponta Grossa e Belém Novo, atingindo até a localidade do Cantagalo. Nesta faixa as rochas graníticas apresentam à nível de afloramento uma intensa protomilitarização N- 80 °-E a E-W.

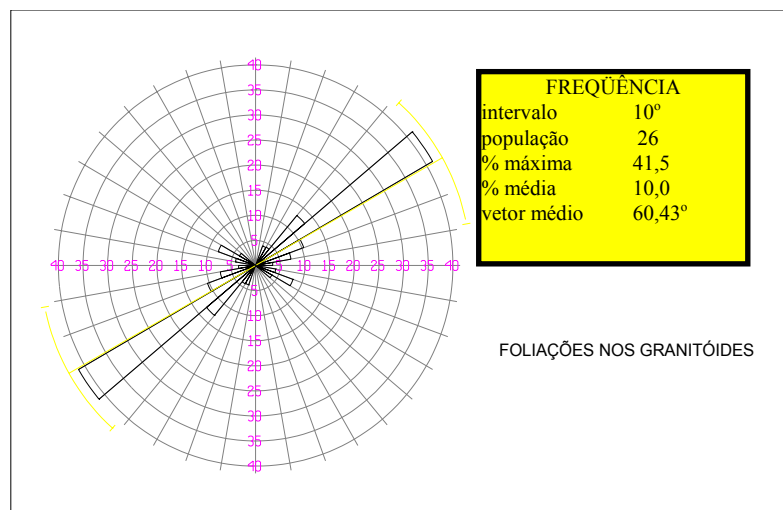


Figura 4.5 Diagrama de roseta das foliações desenvolvidas sobre as rochas granitóides. Notar a direção N-60°-E predominante.

Faixas cataclásticas e presença de pequenos diques riolíticos também ocorrem na direção E-W. A presença dos protomilonitos bem como das faixas cataclásticas podem indicar que a deformação ocorreu em um nível crustal não muito profundo. Também ocorrem estruturas com esta direção sobre os granitos do Morro Santana. Os diagramas de roseta das figuras 4.6. e 4.7. ilustram a distribuição das direções das falhas e diques riolíticos, respectivamente.

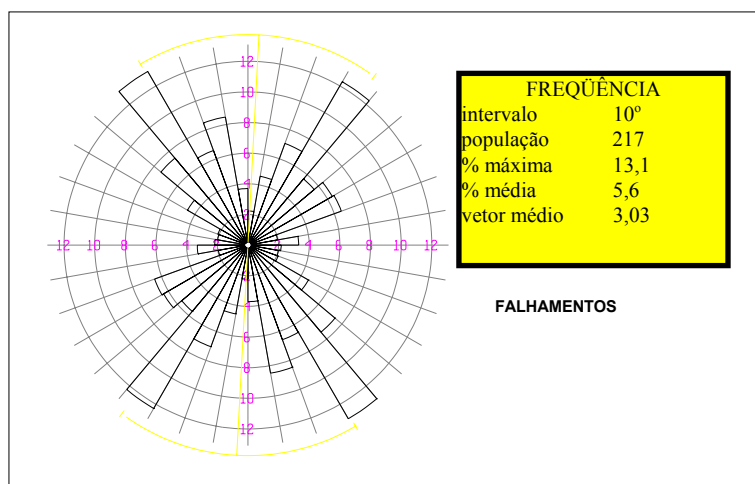
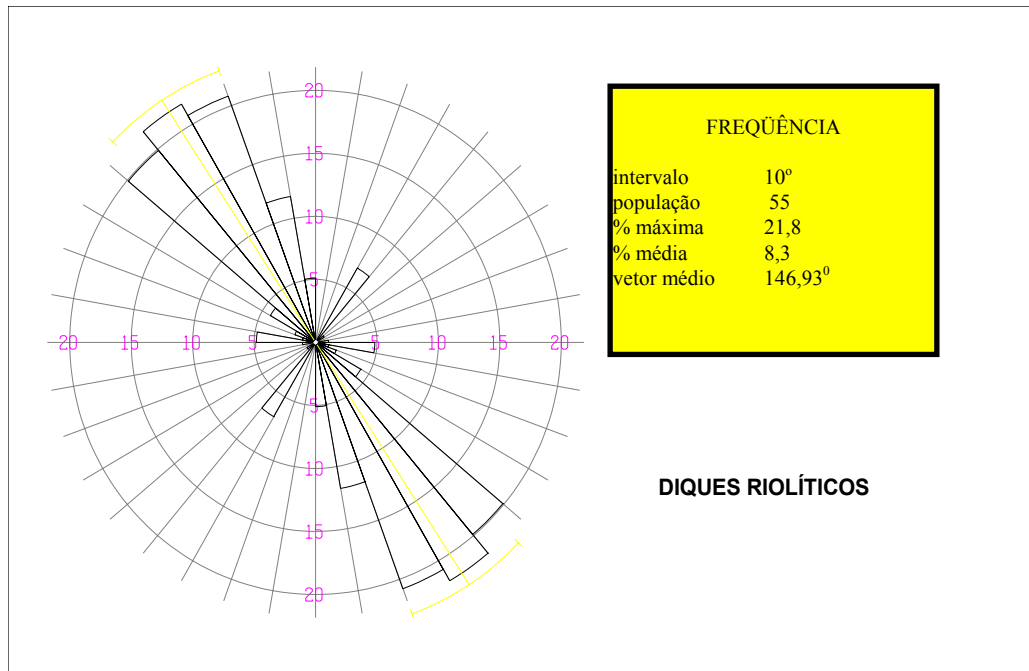


Figura 4.6 Diagrama de roseta dos falhamentos mapeados por Schneider et al. (1974).





*Figura 4.7 Diagrama de roseta dos diques de riolitos e riodacitos exibindo uma predominância da direção noroeste.*

#### **4.5.2 LINEAMENTOS EXTRAÍDOS DE IMAGEM LANDSAT**

Esta escala de trabalho serviu para a determinação da tendência estrutural regional da área ilustrado pela figura 4.8. Foram traçados visualmente 474 lineamentos diretamente no monitor de vídeo usando técnicas de realce como composição colorida e análise em várias bandas. A estatística está resumida no diagrama de roseta da figura 5.8. É notável a predominância da direção NW-SE sobre as demais.

Este fato se deve ao problema do azimute e elevação solar que nesta latitude e época do ano favorece o sombreamento das estruturas noroeste perpendiculares à direção de iluminação (fonte), em detrimento das feições NE-SW.

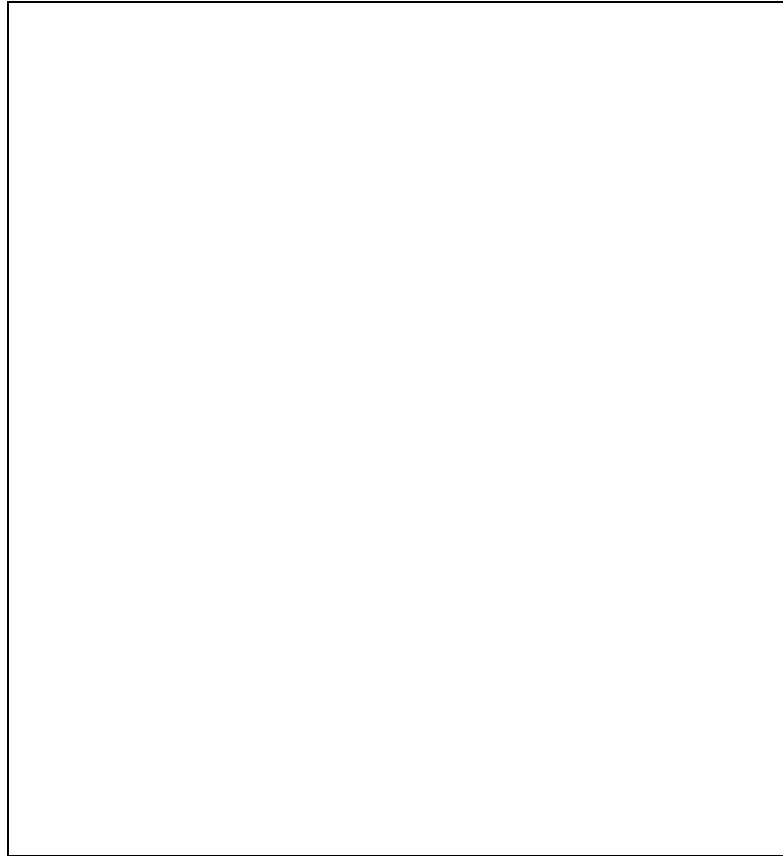


Figura 4.8 Lineamentos morfo-estruturais obtidos na imagem digital LANDSAT-TM5 (Escala aproximada 1:278.000).

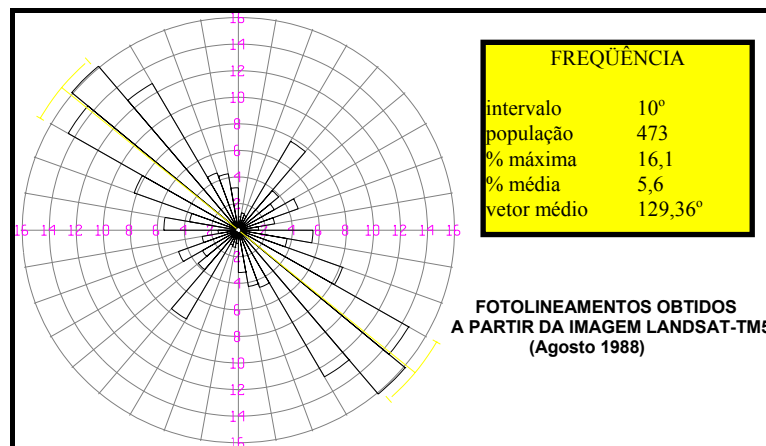
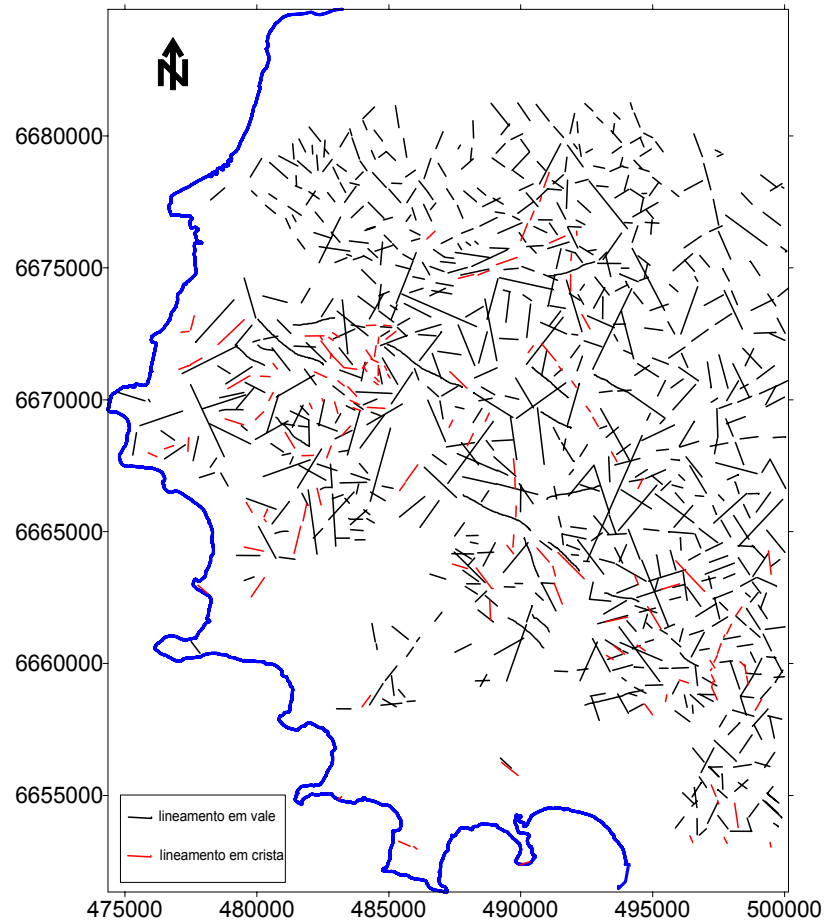


Figura 4.9 Diagrama de roseta dos lineamentos morfoestruturais obtidos pela análise da imagem LANDSAT-TM-5 de agosto de 1988. Notar a predominância da direção noroeste decorrente do sombreamento (baixo azimuth e elevação elevação solar).

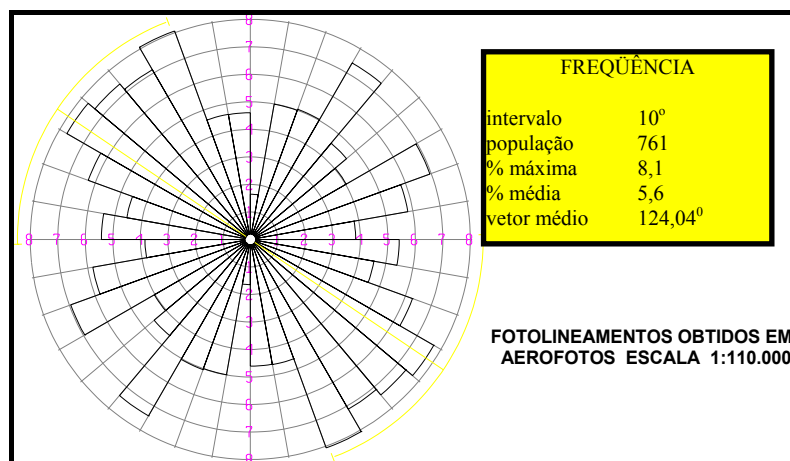
### 4.5.3 Lineamentos extraídos de aerofotos 1:110.000

As fotografias aéreas na escala 1:110.000 permitiram o traçado de 761 lineamentos (figura 4.10), os quais foram processados e tiveram sua estatística apresentada no diagrama de roseta exibido na figura 4.11.



*Figura 4.10 Fotolineamentos obtidos em escala 1:110.000. Observar em vermelho os lineamentos formados por altos topográficos preservados (cristas silicificadas). Escala aproximada da figura 1:277.000.*

Tal diagrama mostra que, ao contrário da imagem de satélite, ocorrem também duas evidentes direções nordeste (N30-40E e N60-70E), representando a tectônica Brasiliana citada por Phillip et al. (1994), referindo-se à continuidade desta área com o Cinturão Dom Feliciano. Apesar disto as direções noroeste predominam nesta análise, com sistemas que variam de N-20-W a N-60-W.



*Figura 4.11 Diagrama de roseta dos lineamentos morfo-estruturais obtidos em fotografias aéreas na escala 1:110.000.*

Em afloramentos próximos a Lomba do Pinheiro, o k-feldspato-granito, apresenta várias fraturas abertas (juntas centimétricas) com espaçamento de algumas dezenas de centímetros e forte paralelismo. A direção predominante é de N-50-60°-W, muitas delas com intensa alteração devido à percolação de água e outras apresentam registro de movimento de blocos, caracterizando falhamentos, por vezes intrudidos por diques básicos muito alterados.

#### **4.5.4 Lineamentos extraídos em aerofotos 1:60.000**

Este produto de sensoriamento remoto permitiu a extração mais detalhada da área, gerando um mapa de 3004 lineamentos (figura 4.12). Nota-se na referida figura que uma pequena porção da área não foi fotointerpretada devido a não disponibilidade de fotografias aéreas. Tal como a aerofoto 1:110.000 registrou muito bem as direções N-E, já que a fotografia aérea, ao contrário da imagem de satélite, não sofre tanta influência da posição solar, e se trabalhou com estereoscopia.

A estatística representada na figura 4.13, mostrou como sistemas principais: as direções N20-30E, N30-50W; associados a um sistema N-S e E-W secundário.

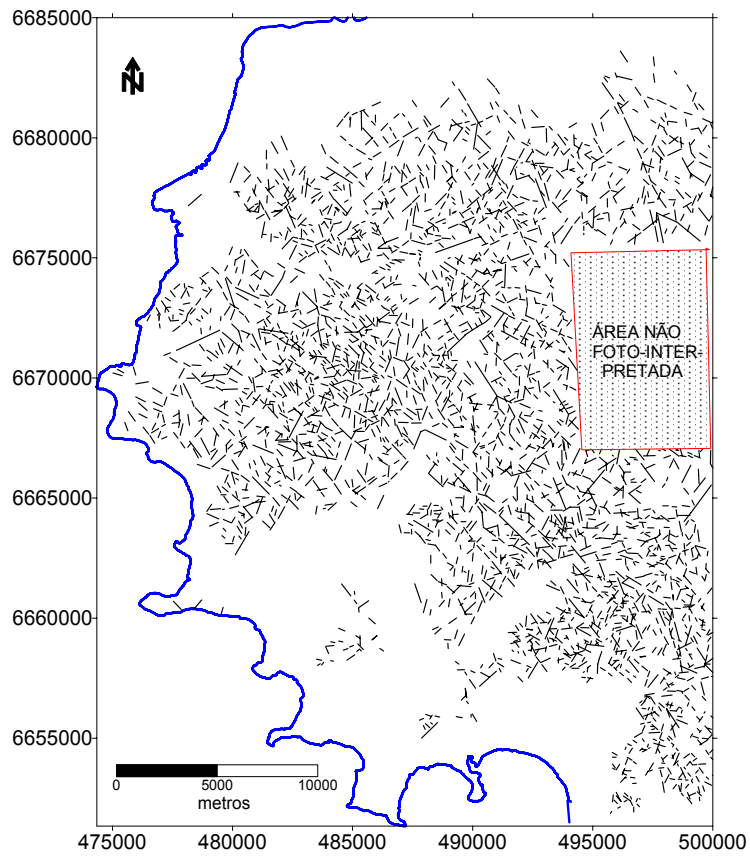


Figura 4.12 Fotolineamentos obtidos na escala 1:60.000 .

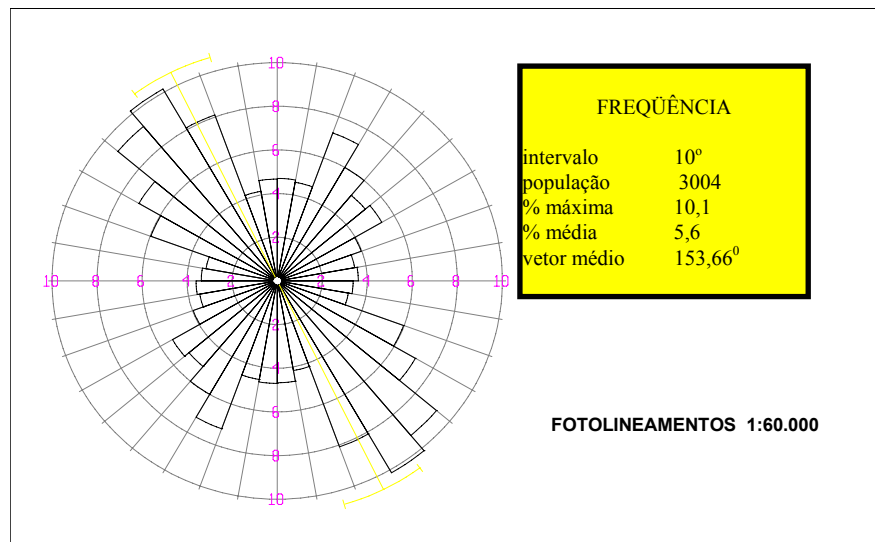
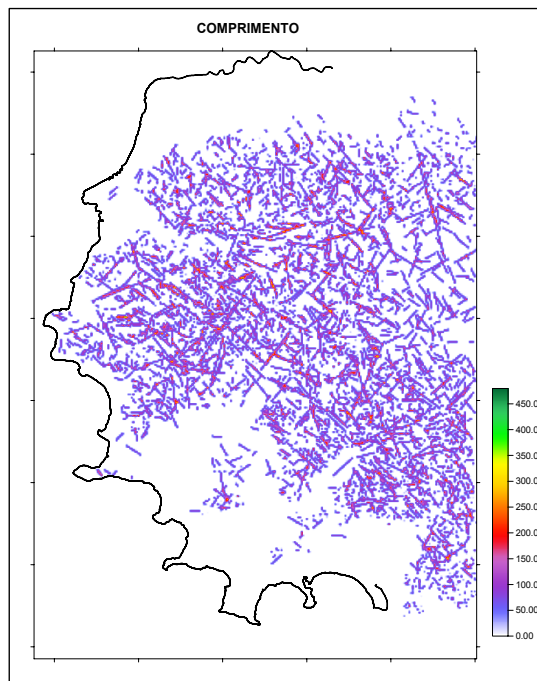


Figura 4.13 Diagrama de roseta dos lineamentos traçados em aerofoto escala 1:60.000.

#### 4.5.5 Índice de fraturamento

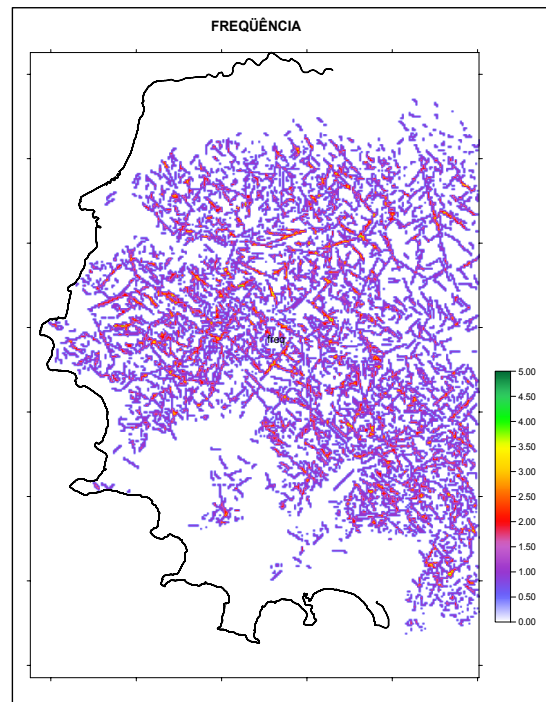
O índice de fraturamento, proposto como fator mais importante no estudo do aquífero fraturado, é um somatório de três parâmetros: o comprimento acumulado, a frequência e o número de intersecções de lineamentos para cada célula de dimensão de 100 metros quadrados. As três grades relativas aos parâmetros componentes do índice foram geradas individualmente e somadas a fim de se obter uma grade final representativa do grau de fraturamento, fundamental na avaliação de aquíferos fissurais. Convém lembrar que foram traçados, analisados e integrados somente lineamentos do tipo 2 (Amaro e Strieder, 1994) dos planos de informação .lineamentos morfoestruturais extraídos de imagem LANDSAT, de aerofotos 1:110.000 e 1:60.000.

A grade relativa ao comprimento acumulado dos lineamentos por célula, (figura 4.14) apresentou valores entre 0 e 479,47 m, com valor médio de 90,03 m e desvio padrão de 55,03 m. Representa a magnitude da deformação sofrida pelas rochas, sugerindo que quanto mais extensa a fratura, maior a chance ser interceptada por outras estruturas, tendo reflexo direto na possibilidade de se encontrar água subterrânea.



*Figura 4.14 Grade relativa ao comprimento acumulado dos lineamentos morfoestruturais traçados em vários produtos de sensoriamento remoto (Escala aproximada 1:455.000).*

A frequência, parâmetro que fornece uma visão da densidade de fraturas, ou seja, o número de lineamentos que ocorrem dentro de cada célula (figura 4.15), apresenta extremos entre 0 e 5, com média de 1,2 lineamentos e desvio padrão de 0,49. Indica o quanto uma área está fraturada e conseqüentemente a chance de ocorrer água subterrânea.

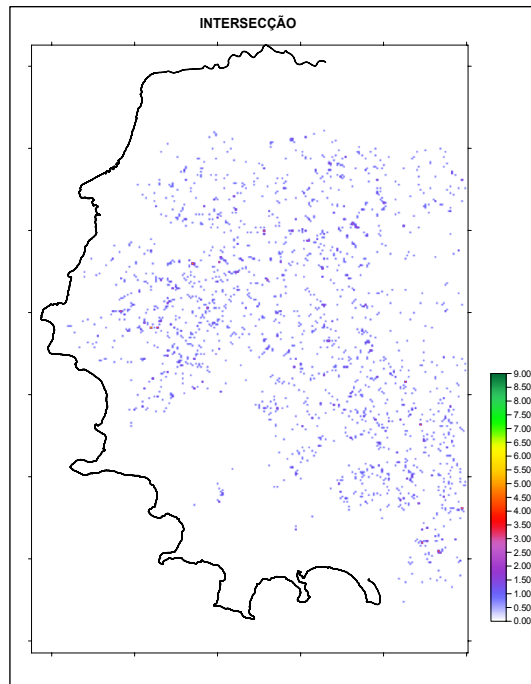


*Figura 4.15 Grade da frequência de lineamentos morfoestruturais obtida através da integração de vários produtos de sensoriamento remoto (Escala aproximada 1:455.000).*

Outro parâmetro analisado é o número de intersecções dos lineamentos, que permite avaliar a conexão entre as fraturas e portanto reflete a possibilidade de interconexão hidráulica, que aumenta a chance de ocorrência de água subterrânea. A grade referente a este parâmetro (figura 4.16), apresentou valores entre 0 e 9, com média de 1,18 e desvio padrão de 0,56.

O índice de fraturamento calculado e normalizado entre valores de 0 a 100 apresentou um valor médio de 3,34 para toda a área de estudo e 18,24 para as áreas com presença de rochas fraturadas.

A tabela 4.2. resume as estatísticas do índice de fraturamento e dos vários parâmetros utilizados para a sua determinação.



*Figura 4.16 Grade do cálculo da intersecção de lineamentos morfoestruturais (Escala aproximada 1:455.000).*



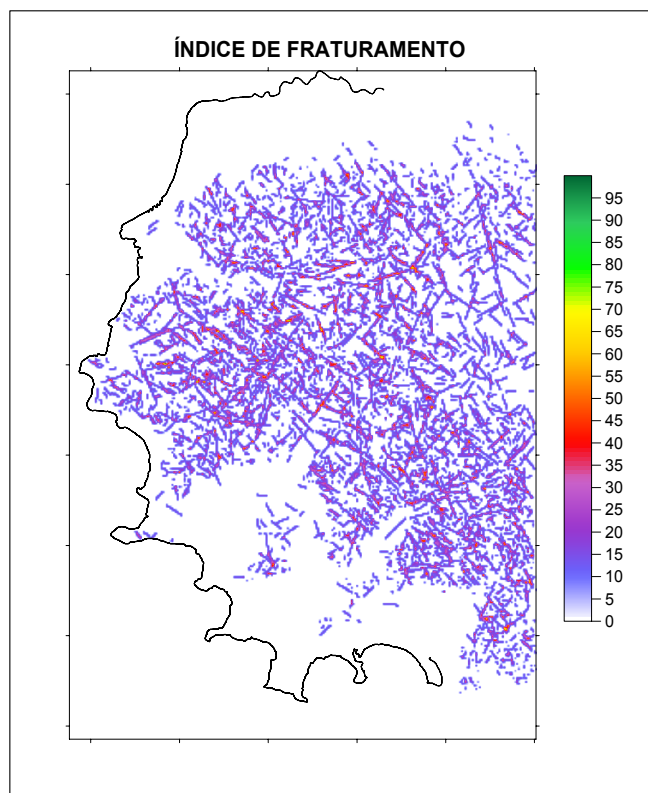


Figura 4.17 Índice de fraturamento obtido a partir da integração das grades de comprimento, frequência e intersecção de lineamentos morfoestruturais extraídos de imagem orbital, aerofotos escala 1:110.000 e 1:60.000 (Escala aproximada 1:455.000).

Tabela 4.2 Estatísticas dos parâmetros envolvidos no cálculo do índice de fraturamento

GRADES	VALOR ORIGINAL			VALOR NORMALIZADO		
	mínimo	máximo	média	mínimo	máximo	médio
COMPR.	0	479,47	90,03	0	100	18,77
FREQ.	0	5	1,2	0	100	4,49
INTER.	0	9	1,18	0	100	0,24
IFRAT.	-	-	-	0	100	3,34

#### 4.6 FORMAS DE RELEVO E DRENAGEM

A área encontra-se inserida na transição de dois compartimentos morfoestruturais: o relacionado ao Escudo-Sul-Riograndense e à Planície Costeira. A figura 4.18, representada pelo modelo numérico do terreno e a rede de drenagem até a 4ª ordem, exibe o panorama geral do relevo da área de estudo e escoamento regional das águas superficiais

O primeiro compartimento, relacionado às rochas graníticas do embasamento cristalino, apresenta formas de relevo acidentadas, com predomínio de colinas baixas a moderadamente altas com altitudes em torno de 180 metros. As vertentes são convexas, determinando vales em “V” geralmente amplos. Na sua região centro-oeste, a topografia é dominada por morros altos e salientes na paisagem orientados segundo a direção nordeste, formados por rochas graníticas mais silicificadas, e conseqüentemente mais resistentes à erosão, atingindo altitudes de até 311,00 metros. O padrão de drenagem predominante é dendrítico a retangular em algumas regiões, onde se verifica uma subordinação às estruturas tectônicas, ocorrendo de maneira localizada um padrão radial centrífugo.

O compartimento relacionado à Planície Costeira, corresponde aos depósitos recentes, configurando uma zona plana de terras baixas e monótonas, com colinas de vertentes muito suaves, que em geral não ultrapassam os 30 metros. O padrão de drenagem predominante é meandrante de baixa densidade, muitas vezes com afloramento do nível freático (banhados).

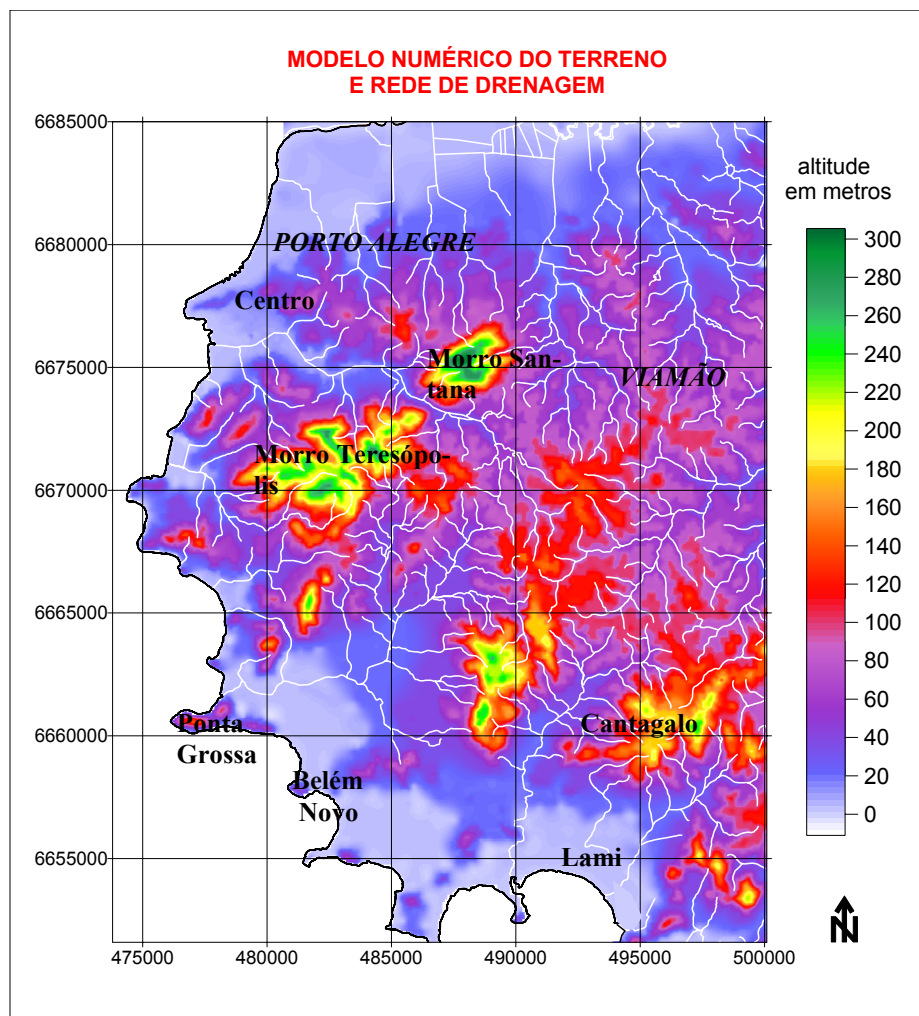
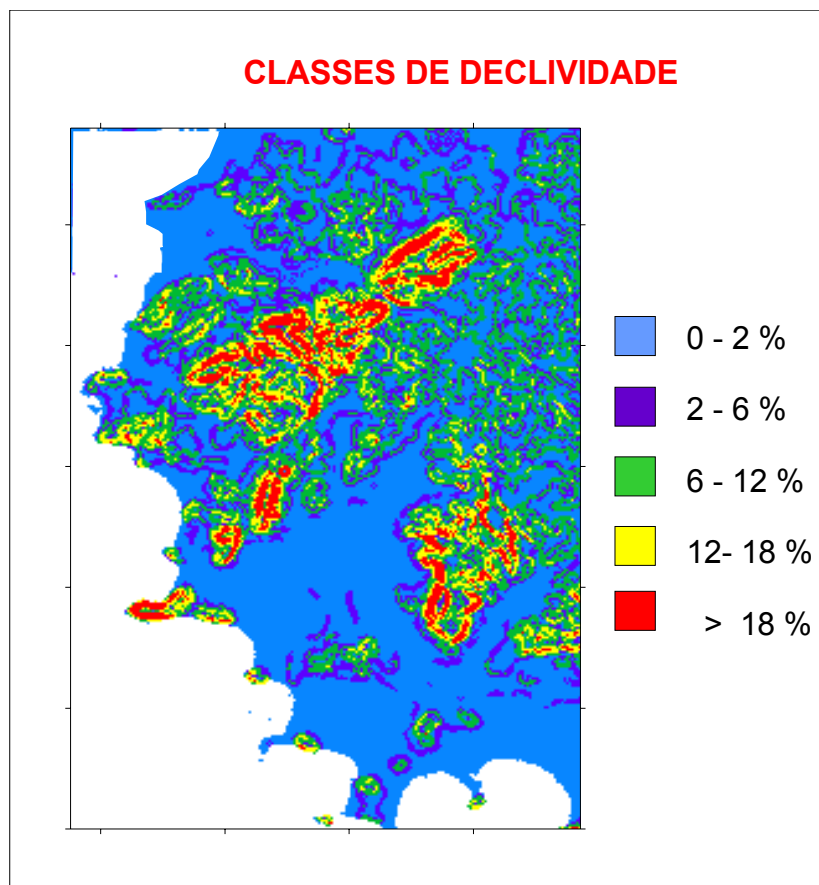


Figura 4.18 Modelo numérico do terreno e rede de drenagem exibindo as diferentes formas de relevo ocorrentes na área do estudo de caso (Escala aproximada 1:312.500).

A carta de declividades gerada a partir do mesmo modelo numérico (figura 4.19), um dos parâmetros utilizados na avaliação do potencial hidrogeológico, apresenta no compartimento relacionado aos terrenos graníticos uma declividade que varia de mais de 2 % até 44 %, predominando declividades em torno de 12 %. As maiores declividades estão nas encostas dos morros graníticos, principalmente do feldspato-alcalino-granito. Nas zonas correspondentes os depósitos quaternários da Planície Costeira oscilam de 0 a 2%.



*Figura 4.19 Mapa das classes de declividades geradas a partir do modelo numérico do terreno (Escala aproximada 1:312.500).*

#### **4.7 COMPORTAMENTO DO MANTO DE ALTERAÇÃO**

Em climas úmidos as condições de intemperismo químico facilitam a formação de mantos de alteração sobre as rochas graníticas. As rochas com composição mais ricas em minerais ferromagnesianos (menos diferenciadas) apresentam uma capa de alteração mais espessa constituída por materiais de cores vermelho a amarelo, textura média argilosa a cascalhenta. Próximo à rocha sã (horizonte C) as rochas graníticas e ortognáissicas exibem diversos estágios de alteração, sendo que nas porções mais inferiores menos intemperizadas, é possível notar a presença de minerais primários como o quartzo, dispersos na massa ou como veios, bem como feldspatos semi-alterados. Micas biotita e muscovita parcialmente alteradas têm presença muito comum.

Nas rochas granitóides mais diferenciadas como os biotita-sienogranitos e feldspato-alcalino granitos o manto de alteração se desenvolve com menor magnitude, onde podem ocorrer matacões e blocos de rochas alteradas. Possuem uma textura média cascalthenta, com cores em tons de vermelho e ou amarelado. A transição para o horizonte C é abrupta e irregular. Este horizonte apresenta-se por vezes mosqueado com tons amarelo-róseos e avermelhados de textura arenosa e com características estruturais ligadas à rocha mãe. A presença de linhas de seixos de quartzo leitoso é muito comum nestas unidades.

A modelagem da tendência da espessura do manto de alteração na área, baseada na interpolação de dados de perfurações, principalmente executadas para a construção de poços tubulares, e dados de campo forneceu o mapa da figura 4.20. O resultado obtido representou de maneira muito satisfatória o comportamento do manto de alteração e dos sedimentos quaternários. A tendência geral é de pequenas espessuras nos topos dos morros (no máximo 5 metros) aumentando nas encostas representando os espessos depósitos de tálus. Observa-se também no setor sul e no setor norte da área grandes espessuras (mais de 40 metros) correspondendo aos sedimentos inconsolidados do quaternário.

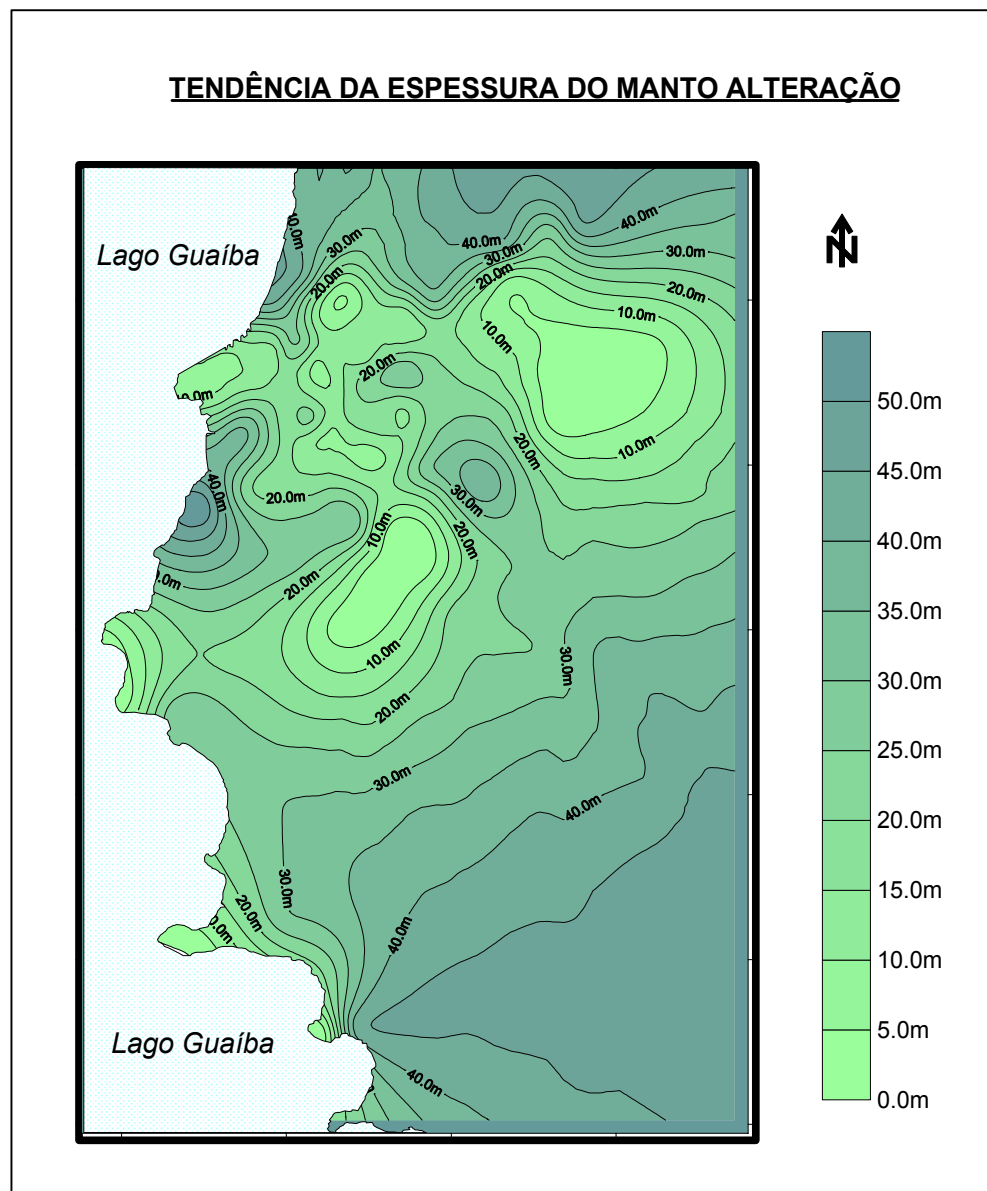
## **4.8 ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS**

Inicialmente, baseado nos tipos litológicos e suas estruturas, os aquíferos locais foram divididos em dois sistemas básicos: sistema aquífero fraturado e sistema aquífero granular (figura 4.21). Após foram estudados os poços construídos sobre o sistema aquífero fissural.

### **4.8.1 Sistemas aquíferos**

O sistema aquífero fraturado, caracterizado por rochas cristalinas com presença ou não de manto de alteração, ocorre na maior parte da área (64,68%), constituindo aquíferos descontínuos associados a zonas fraturadas. Muitas vezes espessos mantos de alteração, principalmente sobre os granitóides mais antigos e de composição menos diferenciada, ampliam o potencial aquífero do fraturado. Seus depósitos de encosta e leques aluviais, quando apresentam espessura considerável, constituem aquíferos inter-

granulares extensos livres ou confinados de boa potencialidade, com vazão média de 2,0 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica média de 0,2 m<sup>3</sup>/h/m. Também possui grande importância hidrogeológica como área de recarga e circulação de água subterrânea. Quando estes depósitos interdigitam-se com depósitos do tipo lagunar e flúvio-lacustre, podem apresentar águas de má qualidade (excesso de cloretos e ferro).



*Figura 4.20 Mapa de tendência da espessura do manto de alteração e depósitos inconsolidados (Escala aproximada 1:227.000).*

O sistema aquífero granular origina-se a partir de sedimentitos cenozóicos, que englobam depósitos de leques aluviais, de planície lagunar, flúvio-lacustre e depósitos aluvionares atuais. Os primeiros constituem aquíferos intergranulares extensos

livres ou semiconfinados, enquanto que os depósitos atuais dão origem a aquíferos intergranulares descontínuos livres.

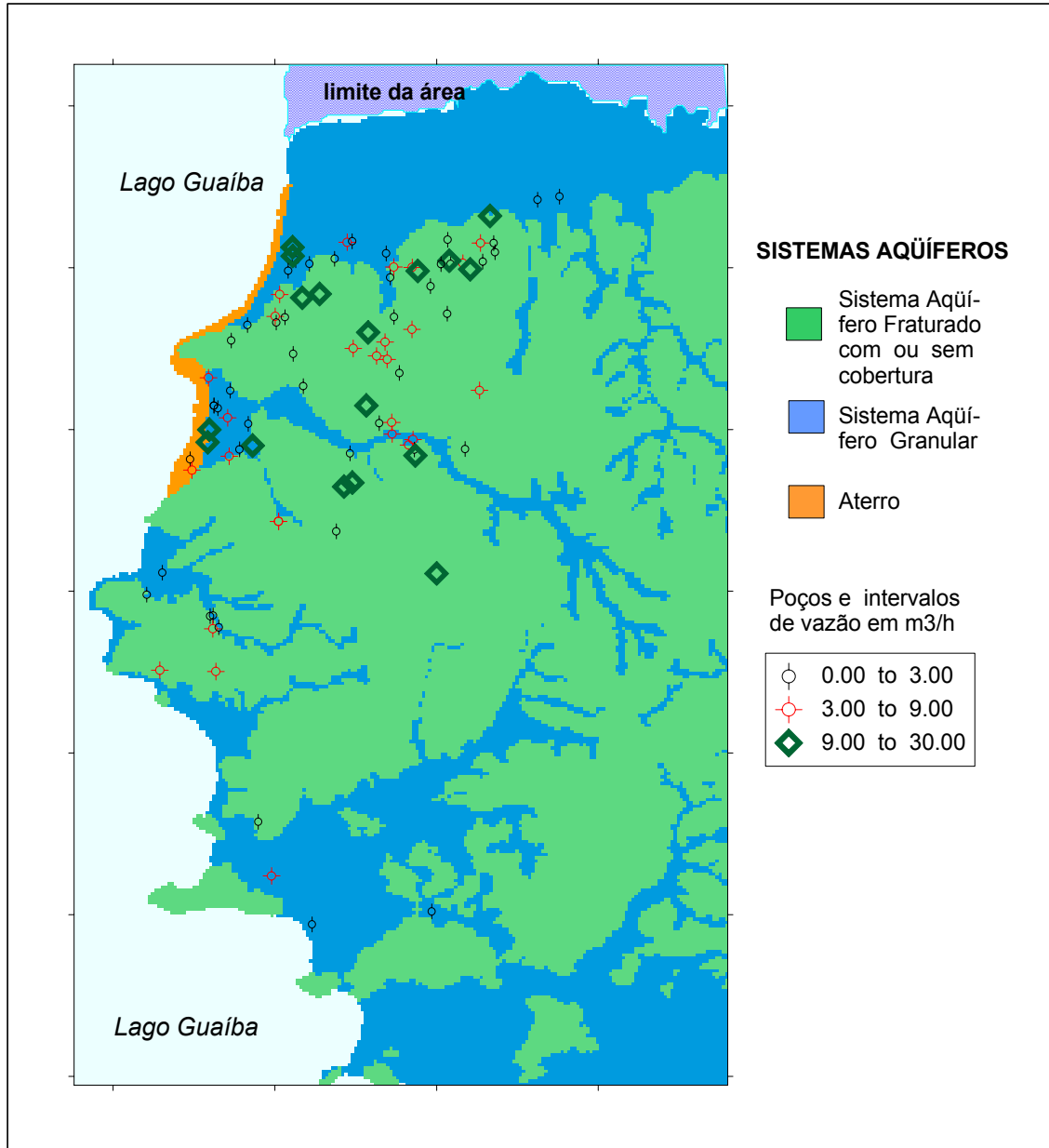


Figura 4.21 Principais sistemas aquíferos da região de Porto Alegre: sistema aquífero fraturado e sistema aquífero granular, e a distribuição dos poços tubulares com intervalos de vazão (Escala aproximada 1:227.500).

#### 4.8.2 Poços tubulares

Em relação aos aspectos construtivos dos poços tubulares construídos na área, nos aquíferos fraturados, cabe ressaltar a presença de duas formas básicas de captação; a que utiliza exclusivamente a contribuição de fraturas e a que utiliza, não só as fraturas como também, contribuições do manto de alteração.

O primeiro tipo de captação apresenta poços com revestimento fechado na parte correspondente ao manto de alteração, sendo as entradas d'água restritas às fraturas (figura 4.22.A). Os dados dos poços cadastrados mostram que cerca de 60% das entradas d'água registradas estão entre 35 e 80 metros e apenas 10 % ultrapassam a profundidade de 90 metros. A outra forma de captação (figura 4.22.B), dá-se pela construção de poços com filtros, por vezes envoltos por pré-filtros, ao longo do manto de alteração e principalmente no contato deste com a rocha sã. Muitas vezes tais contribuições representam quase que a totalidade das entradas d'água dos poços.

Os métodos de perfuração utilizados na área são basicamente dois: à percussão e roto-percussão. O primeiro método executa a perfuração mediante a suspensão e queda de uma pesada composição de ferramentas dentro do furo. O trépano rompe e esmaga a rocha, enquanto que o material é retirado pela caçamba com o avanço da perfuração. No método à roto-percussão é empregado o ar comprimido como fluido de perfuração, o qual circula através da haste saindo pelo "bit"(broca) e subindo pelo espaço anular. Compressores fornecem pressões de até 14 kg/cm<sup>2</sup> causando movimentação do ar em alta velocidade, que arrasta os fragmentos para a superfície ou os faz penetrar nas fendas das rochas (OPAS-UFPR, 1969). Este método é muito eficaz porém os poços devem ser submetidos, após sua construção, a um processo de desenvolvimento, o que não ocorre na maioria das vezes. É muito comum poços construídos sem a etapa de desenvolvimento serem considerados improdutivos e muitas vezes com o bombeamento ao longo do tempo podem apresentar um acréscimo de vazão.

Os dados de poços deste sistema, resumidos na tabela 4.3., indicam uma profundidade média de 95,70 metros, predominando a profundidade de 87,00 metros. A menor profundidade é de 17,00 metros em um poço que capta água quase que exclusivamente do manto de alteração, enquanto que a maior é a do poço do Centro de Trei-



namento da CRT na Av. Antônio de Carvalho, que atinge 300,00 metros. A maioria das entradas d'água ocorrem entre 40 e 90 metros. A figura 4.23 ilustra a frequência da profundidade e da quantidade de revestimento para todos os poços analisados

As vazões encontradas variam de 0 a 25,54 m<sup>3</sup>/h com média de 5,49m<sup>3</sup>/h, no entanto, a moda indica a predominância da vazão de 2,2 m<sup>3</sup>/h, confirmando a baixa produtividade deste sistema aquífero. A frequência dos intervalos de vazão nos poços, mostra que cerca de 52 % dos poços possuem vazões até 4 m<sup>3</sup>/h (figura 4.24).

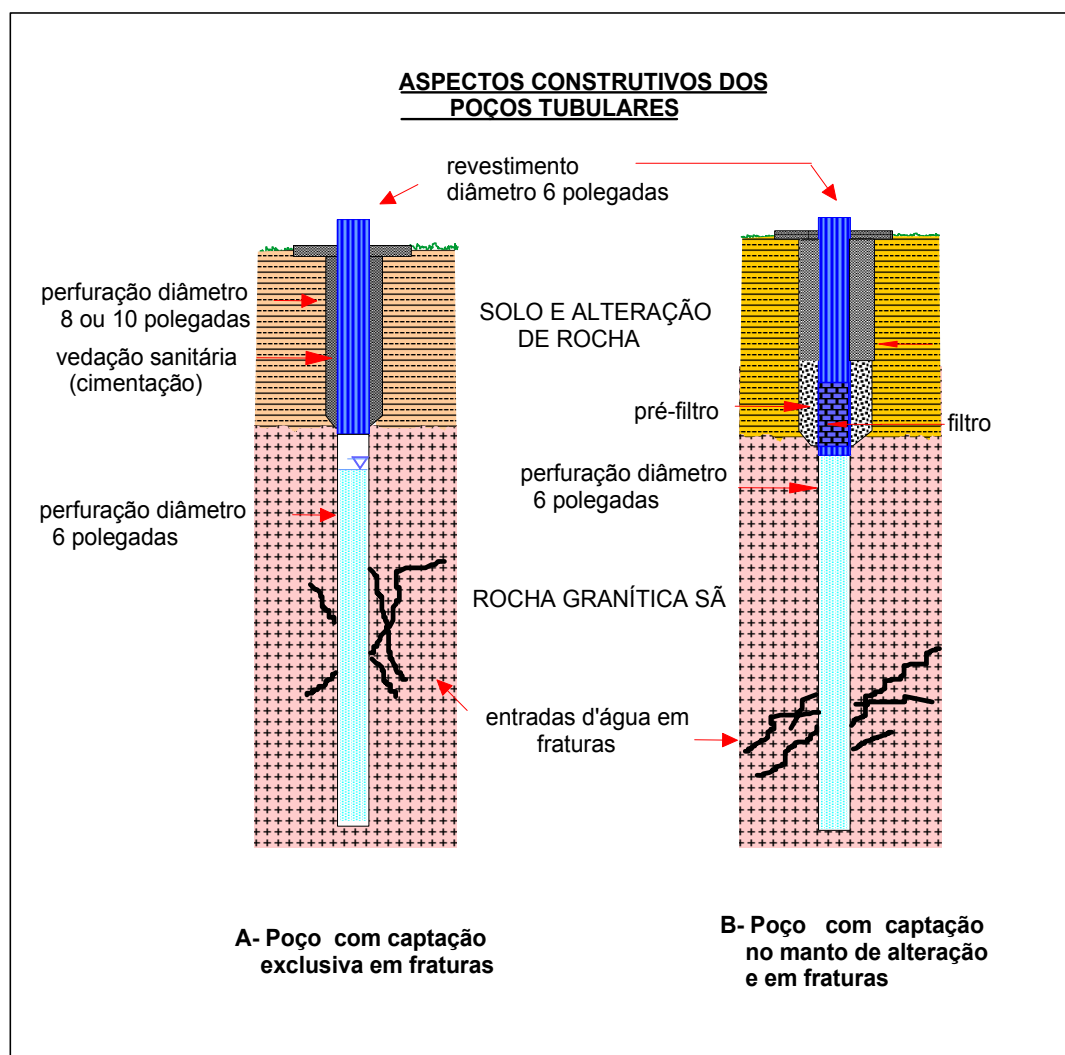


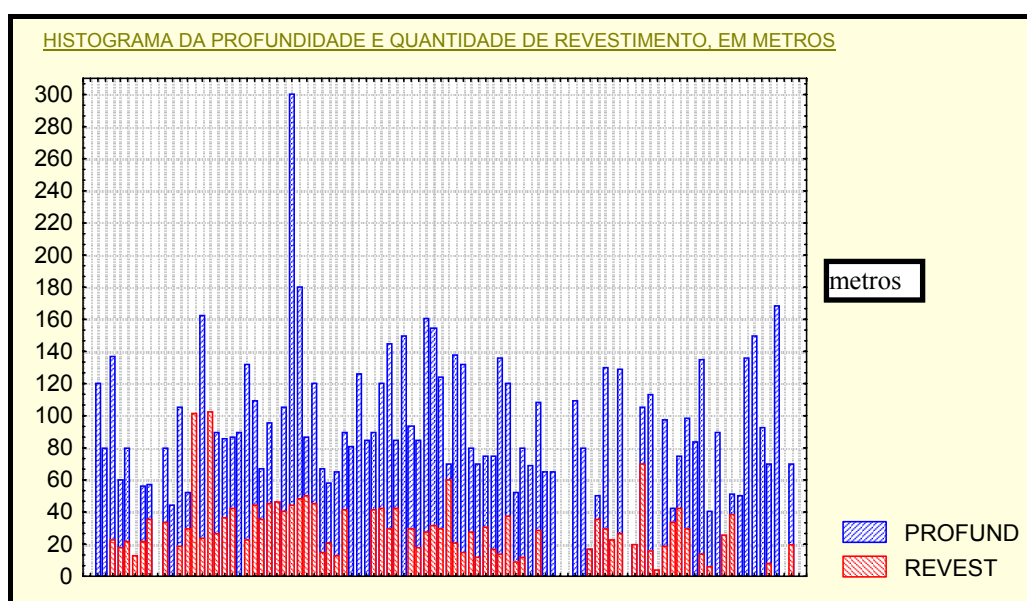
Figura 4.22 Esquema construtivo dos poços tubulares da área de estudo, um captando água somente das fraturas (A) e outro captando água das fraturas e do manto de alteração (B).

Os poucos dados de capacidade específica mostram variações de 0 a 3,92 m<sup>3</sup>/h/m, com média de 0,36 m<sup>3</sup>/h/m e moda de 0,06, à exemplo dos dados de vazão, confirmando a pequena produtividade dos poços (figura 4.25).

Os níveis estáticos encontram-se entre 0 e 28,46 metros, com média 5,81 metros e moda 3,0 metros, enquanto que os níveis dinâmicos variam de 14,00 a 150,51 metros com média de 47,83 metros.

*Tabela 4.3 Estatística dos principais parâmetros analisados nos poços construídos no sistema aquífero fraturado.*

	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Moda</b>
Profundidade (m)	17,00	300,00	95,71	80,00
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	0,0	25,54	5,49	2,2
Cap.específica(m <sup>3</sup> /h/m)	0,0	3,92	0,36	0,06
Nível estático (m)	0,0	28,46	5,81	3,0
Nível dinâmico (m)	14,00	150,51	47,83	65,00



*Figura 4.23 Histograma múltiplo da profundidade dos poços (azul) e da quantidade de revestimento (vermelho)*

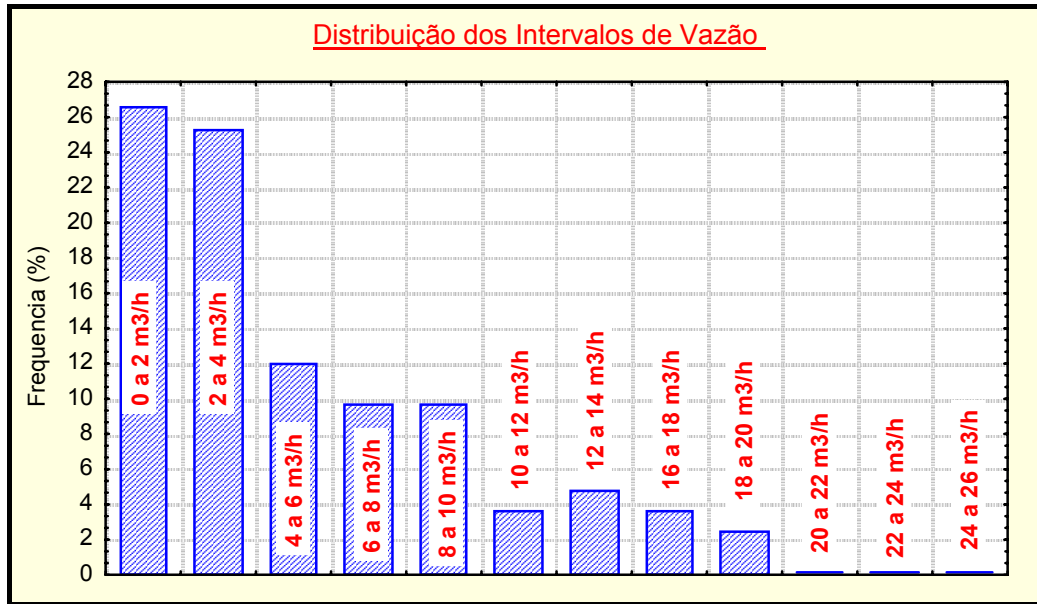


Figura 4.24 Frequência dos intervalos de vazão para os poços do cristalino, mostrando que mais de 50% dos poços possuem vazões menores que 5 m<sup>3</sup>/h.

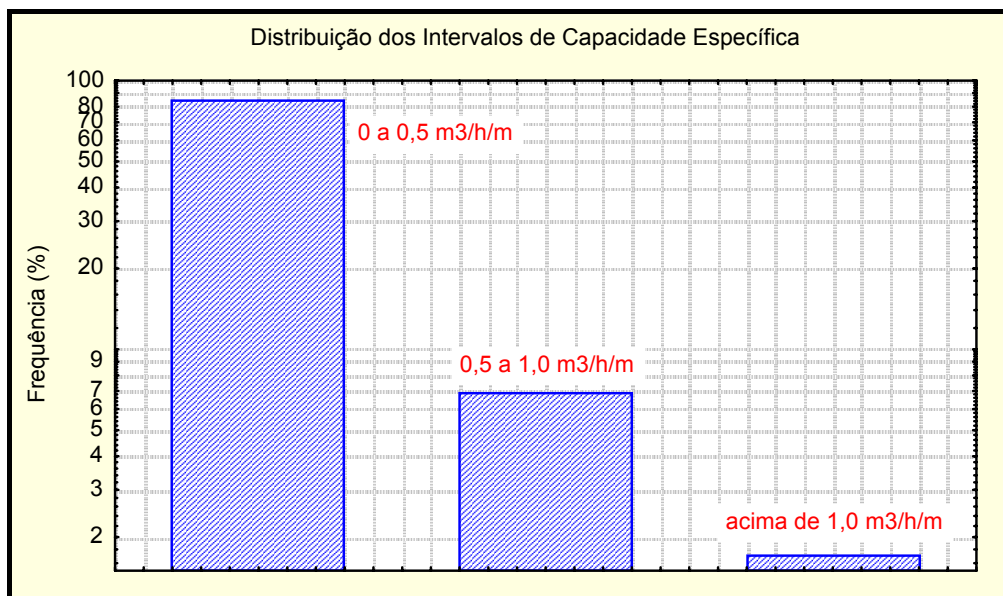


Figura 4.25 Frequência dos intervalos de capacidade específica para os poços construídos no aquífero fraturado. Cerca de 80% dos poços possuem valores menores que 0, 5 m<sup>3</sup>/h/m.

#### **4.9 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO ATRAVÉS DE LÓGICA BINÁRIA (BOOLEANA)**

Como referido no capítulo 3 o potencial hidrogeológico do cristalino na área de Porto Alegre é avaliado de três maneiras em relação à lógica binária: multiplicação, soma e soma ponderada. Os planos de informação utilizados nestas operações dividem-se em: unidades litológicas (LITO), declividade do terreno (DECL), uso do solo (USO), índice de fraturamento (IFRAT) e espessura do manto de alteração (ALTER).

No parâmetro litologia foram retirados do mapa geológico as unidades lito-estratigráficas sem relacionamento com o aquífero fraturado. No entanto, manteve-se a unidade referente aos depósitos de encosta e alteritos, por se tratarem de litologias que interferem diretamente no comportamento da água subterrânea do meio fraturado, seja na recarga, seja no seu potencial. A vocação para ocorrência e armazenamento de água subterrânea nas unidades lito-estratigráficas analisadas é expressa através de uma nota entre 0 e 100 (tabela 4.4.). Tal nota é baseada nas características mineralógicas e estruturais das unidades, que de algum modo influem no comportamento hidrogeológico.

Da mesma forma, são atribuídas notas às classes de declividade conforme a sua influência no comportamento do aquífero (tabela 4.5). O critério baseia-se no pressuposto que quanto maior a declividade do terreno, menor o tempo de residência da água da chuva, favorecendo o escoamento superficial.

As cinco classes de uso do solo, que podem exercer influência no comportamento hidrogeológico principalmente no tocante às condições de recarga (permeabilidade da superfície), também são reclassificadas em notas de 0 a 100 (tabela 4.6).

Para o índice de fraturamento, que representa a possibilidade de existir descontinuidades no meio rochoso, são considerados favoráveis à ocorrência de água subterrânea valores entre 20 e 100 e desfavorável valores menores que 20.

No parâmetro espessura do manto de alteração são considerados valores de maior aptidão os que ultrapassam 30, o que equivale a 15 metros de profundidade.

*Tabela 4.4 Notas baseadas na idade, mineralogia, granulometria, estado de deformação e grau de alteração, das unidades litoestratigráficas.*

<b>UNIDADE</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>NOTA</b>
1-feldspato-alcálico-granito	Rocha mais jovem, muito silicificada, composta basicamente por quartzo e feldspato, sem minerais placosos (micas), presença intensa de deformação compressiva (zona de cisalhamento), pequena espessura de solo	20
2-biotita-sieno-granito	Rocha isótropa, com composição mineralógica à base de quartzo e feldspato com pequena quantidade de filossilicatos (biotita), pequena a média espessura de solo	30
3-biotita monzo-granito	Rocha de idade intermediária, com maior presença de plagioclásio e filossilicatos, maior espessura de solo que as anteriores	50
4-biotita monzogranito porfirítico	Rocha antiga, com intensa deformação, forte presença de plagioclásio e biotita, além de outros minerais máficos	65
5-ortognaisse	Rocha de maior idade, intensamente deformada, com alto teor de minerais máficos como hornblenda e biotita, considerável manto de alteração e solo	75
6-depósitos de encosta derivados de alteração de rochas granitoides	Sedimento inconsolidado areno-argiloso, com granulação média a grossa, bastante permeável	90

*Tabela 4.5 Classes de declividades obtidas a partir do modelo numérico do terreno, com seu respectivo potencial.*

<b>CLASSE</b>	<b>DECLIVIDADE</b>	<b>POTENCIAL</b>	<b>NOTA</b>
1	0 a 2 %	muito favorável	100
2	2 a 6 %	favorável	80
3	6 a 12 %	medianamente favorável	60
4	12 a 18 %	pouco favorável	20
5	acima de 18%	não favorável	10

Tabela 4.6 Classes de uso do solo e sua influência no comportamento do aquífero.

CLASSE	Relação c/o aquífero	Motivo	Nota
área urbana	desfavorável	áreas impermeabilizadas não favorecem a recarga	20
solo exposto	pouco favorável	áreas com solo descoberto, podem apresentar uma diminuição na permeabilidade	60
campo	favorável	protegem o solo e retêm umidade	80
mata nativa	muito favorável	além de protegerem o solo e manter a umidade, seguram parte da água de chuva, contribuindo para a infiltração do solo	100

Finalmente os parâmetros são reclassificados conforme suas notas, em função de favorecer ou não a ocorrência de água subterrânea, isto é, leva valor “1” se for favorável e “0” se for desfavorável (tabela 4.7).

Tabela 4.7 Reclassificação dos parâmetros em função de suas notas relacionadas ao favorecimento da ocorrência de água subterrânea.

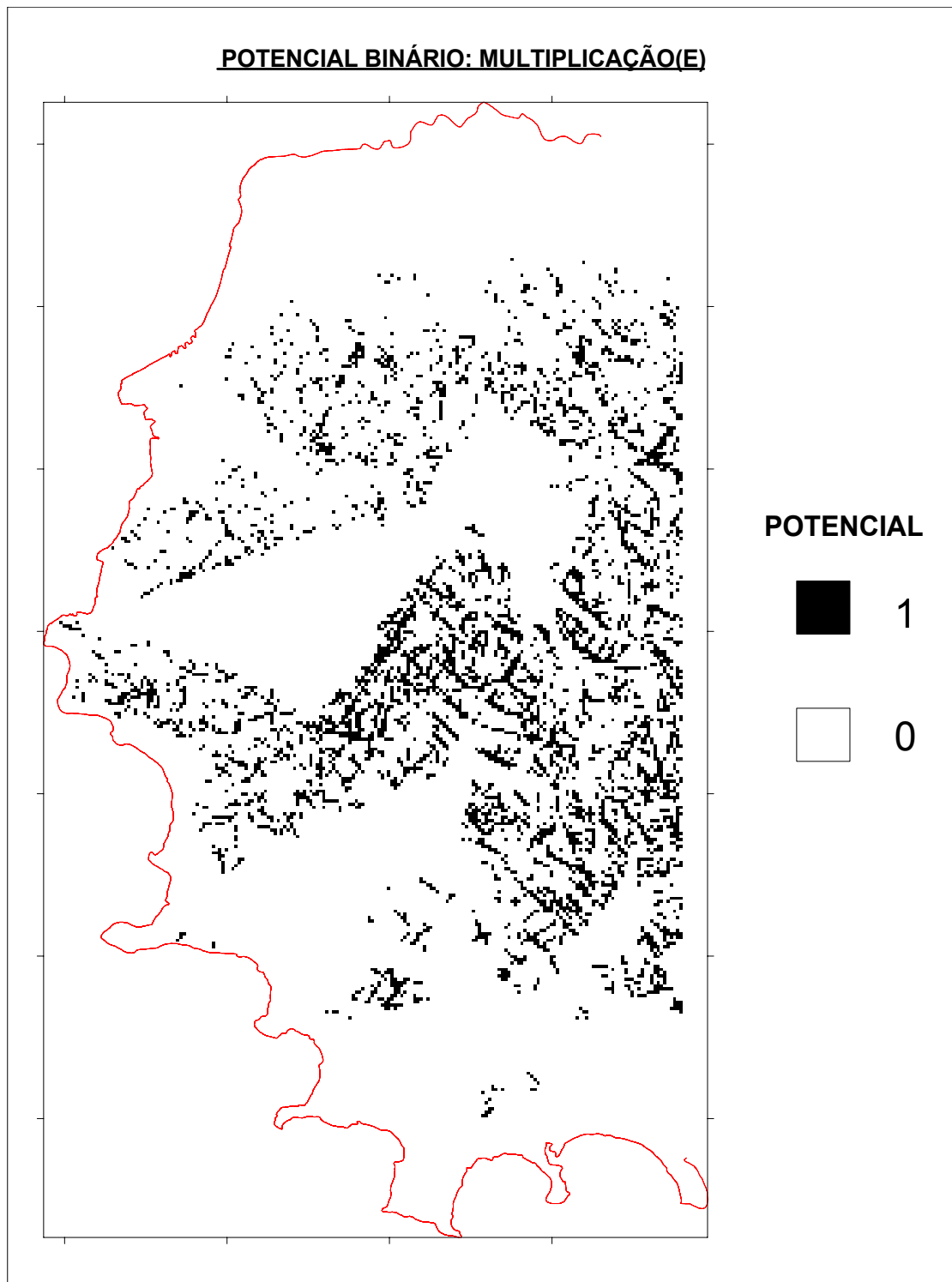
	Litologia	Declividade	Uso solo	Manto de alteração	Índ. de fratur.
<b>0(não)</b>	< 50	< 20	< 40	< 30	< 20
<b>1(sim)</b>	> 50	> 20	> 40	> 30	> 20

#### 4.9.1 Lógica binária-multiplicação (E)

A operação booleana de multiplicação indicada por; Potencial = LITO x DECL x USO x ATER x IFRAT; resulta em um mapa binário (figura 4.26), no qual “1” representa as áreas de potencial hidrogeológico e “0” as áreas não potenciais. As áreas potenciais são representadas por pixels nos quais ocorre um tipo granítico favorável, uma declividade menor que 12 %, vegetação de mata nativa ou campo, espessura de manto de alteração maior que 15 metros e índice de fraturamento acima de 20.

As áreas potenciais obtidas abrangem 47,11 km<sup>2</sup>, equivalendo a 15,35 % da área do aquífero cristalino. As áreas de potencial nulo, onde pelo menos um dos parâmetros não satisfaz a premissa, ocupam 306,8 km<sup>2</sup> correspondendo a 84,56 % da área

dos granitóides. Observando o mapa verifica-se que o modelo mostra-se muito restrito, refletindo a natureza da operação.



*Figura 4.26 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de multiplicação (Escala 1:200.000).*

Analisando a relação entre as áreas potenciais e os poços tubulares nelas existentes, verifica-se que somente 25 poços estão sobre tais áreas. O gráfico de potencial hidrogeológico mapeado pela vazão dos poços (figura 4.27) mostrou que não há uma tendência dos poços de alta vazão (acima de 2,5 m<sup>3</sup>/h) caírem em áreas de potencial hidrogeológico (1). A regressão simples apresenta uma baixa correlação positiva com coeficiente ( r ) igual a 0,375 e coeficiente de determinação ( r<sup>2</sup> ) de 0,1409.

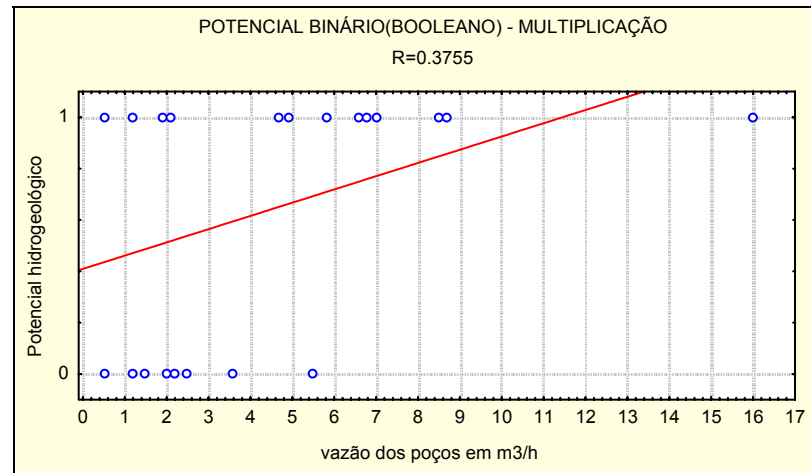
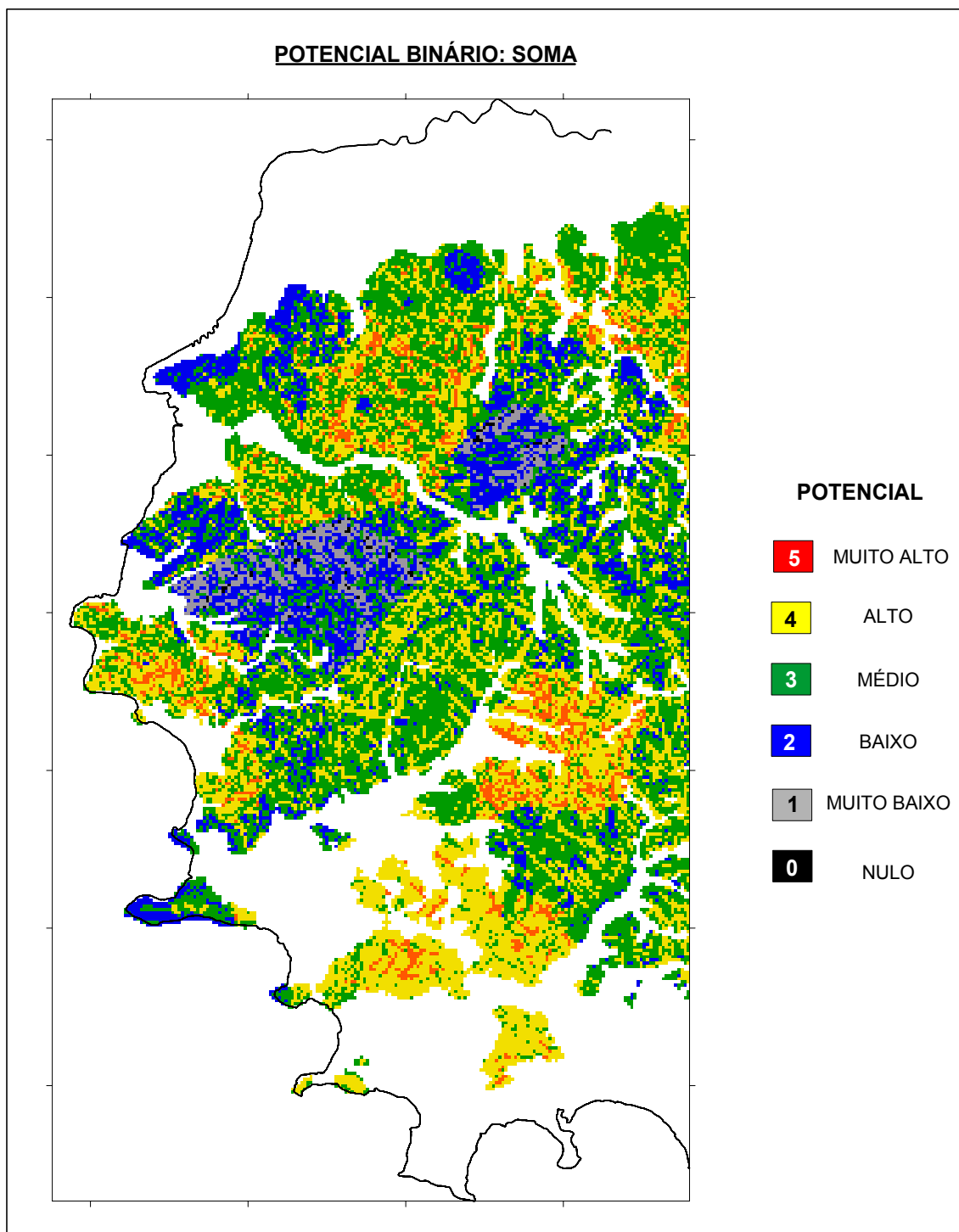


Figura 4.27 Relação entre as vazões dos poços observados na área de estudo e o potencial hidrogeológico obtido através de lógica binária com a multiplicação dos planos de informação.

#### 4.9.2 Lógica binária-soma (OU)

A lógica binária operada através da soma dos parâmetros, definidos no item 4.9, (Potencial = LITO+DECL+USO+ATER+IFRAT) exibe um mapa com 5 classes de potencial hidrogeológico relativo (figura 4.28). Este modelo mostra um resultado melhor que o anterior com as classes variando de 0 a 5, não se restringindo somente às áreas fraturadas, isto é pode representar também o potencial aquífero de depósitos de alteração de rocha granítica, bem como a influência destes sobre o meio fraturado. A tabela 4.8., que representa a distribuição das classes de potencial em relação a área ocupada no aquífero cristalino, mostra a predominância de potencial médio (3) seguido das áreas com potencial alto (4). As primeiras áreas estão relacionadas aos biotita-monzogranito-porfíricos e encontram-se bem distribuídas na região. As melhores áreas distribuem-se na porção norte e sul-sudeste da região, em zonas fraturadas sobre os ortognaisses e biotita-sieno-granitos.





*Figura 4.28 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de soma dos planos de informação (Escala 1:200.000).*

As piores áreas estão ligadas ao k-feldspato-alcalino-granito, em terrenos muito declivosos orientados segundo a direção nordeste e com pequena espessura de solo e manto de alteração.

Tabela 4.8 Distribuição dos potenciais obtidos pela lógica booleana operada através da soma dos parâmetros

POTENCIAL	ÁREA ( km <sup>2</sup> )	%
5 (muito alto)	15,94	5,18
4 (alto)	98,02	31,90
3 (médio)	135,87	44,18
2 (baixo)	47,18	15,35
1 (muito baixo)	9,17	2,98
0 (nulo)	0,66	0,21

A análise dos dados de poços (figura 4.29) mostra uma pequena tendência de crescimento da vazão com o aumento das classes de potencial, com correlação positiva de  $r$  igual a 0,4604 e  $r^2$  de 0,212 sugerindo que este modelo demonstra uma evolução em relação ao modelo anterior. No entanto as classes de potencial 3 e 4 são muito semelhantes na relação com a vazão dos poços, isto é, tanto apresentam poços de baixa vazão ( $< 2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) como poços com mais de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ .

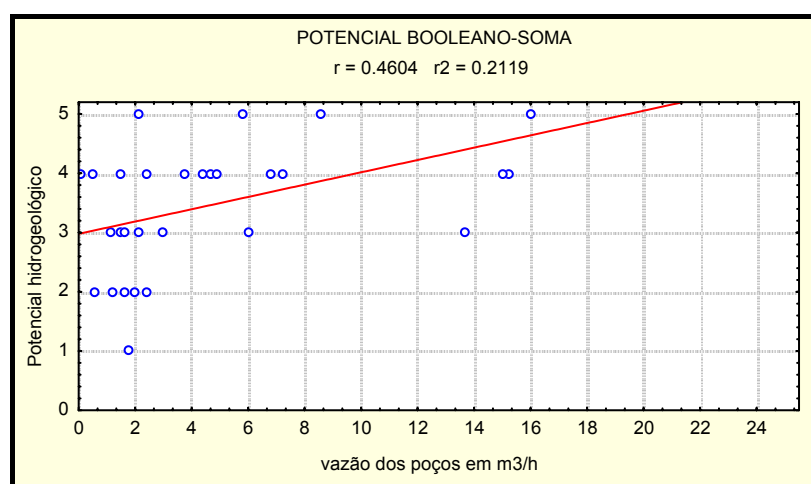


Figura 4.29 Relação entre o potencial relativo obtido por lógica booleana-soma e a vazão dos poços.

### 4.9.3 Lógica binária-soma-ponderada

A terceira operação envolvendo a lógica binária realiza a soma ponderada dos parâmetros envolvidos, isto é, leva em consideração a importância relativa de cada um dos planos de informação em relação ao potencial hidrogeológico. Os pesos utilizados são baseados na experiência e conhecimento da área, sendo restritos a esta região. A tabela 4.9 relaciona os diferentes pesos de cada parâmetro envolvido na análise. Os parâmetros litologia e declividade do terreno possuem grande importância na avaliação do potencial, sendo superado somente pelo índice de fraturamento, que é fator essencial para o desenvolvimento de um aquífero de meio fraturado. A espessura de do manto de alteração contribui de forma mediana, juntamente com a cobertura de solo.

Tabela 4.9 Peso de cada parâmetro para lógica binária-soma-ponderada.

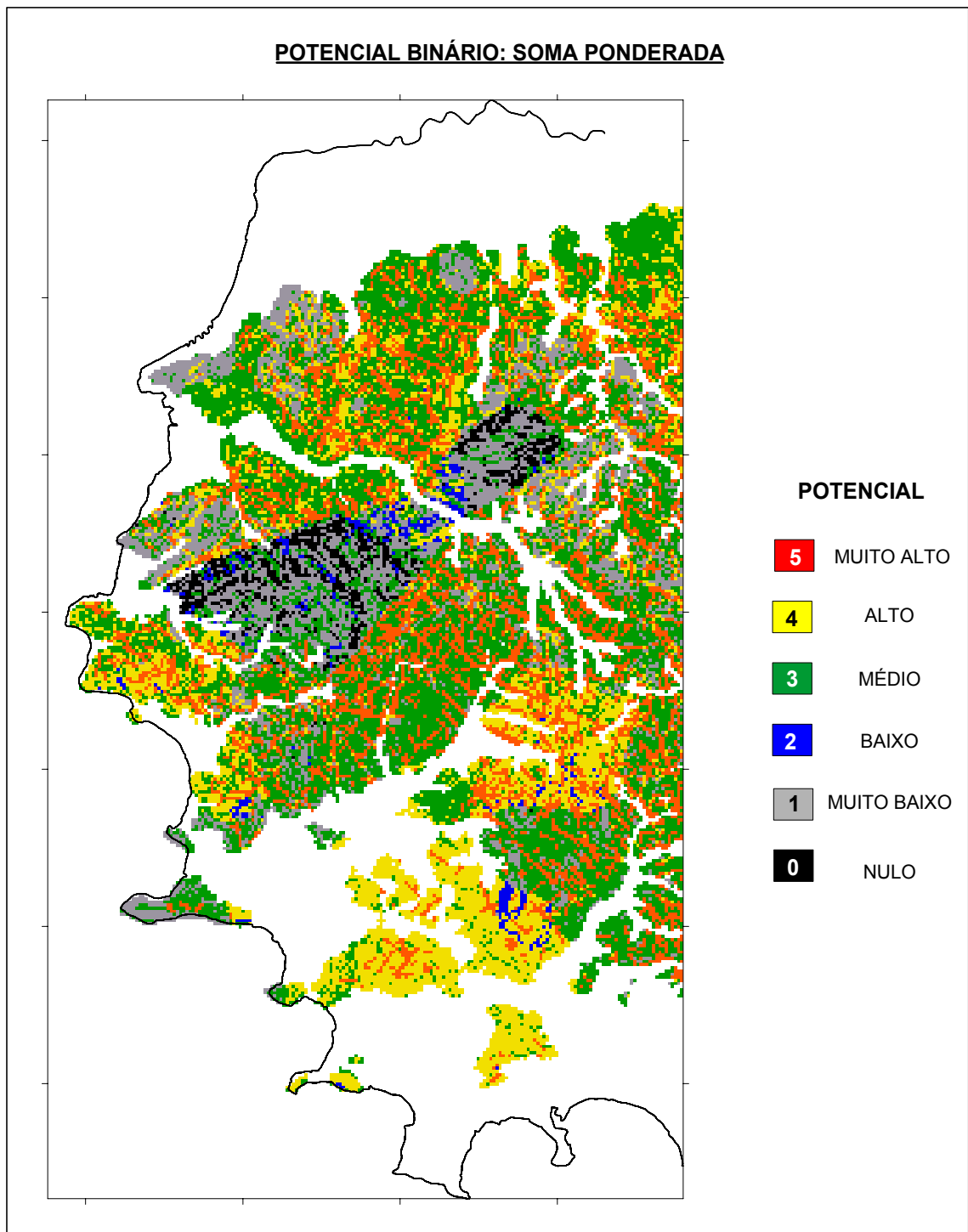
PARÂMETRO	PESO
Índice de fraturamento (IFRAT)	10
Litologia (LITO)	8
Declividade (DECL)	7
Uso do solo (USO)	5
Manto de alteração (ALTER)	5

A expressão abaixo representa o cálculo das áreas de potencial hidrogeológico utilizando os pesos (a, b, c, d, e) para cada parâmetro, fornecidos anteriormente:

$$\text{Pot.} = \frac{(a \times \text{LITOL} + b \times \text{DECL} + c \times \text{USOL} + d \times \text{IFRAT} + e \times \text{ALTER})}{a + b + c + d + e} \quad (4.1)$$

O modelo resulta em um mapa (figura 4.30) muito semelhante com o do modelo anterior, com classes de potencial relativo variando de 0 a 5, porém com uma hierarquia diferente (tabela 4.10). As melhores áreas (potencial muito alto) estão em zonas fraturadas desenvolvidas sobre a maioria dos granitóides, com exceção do k-feldspato-alcalino-granito, abrangendo 62,89 km<sup>2</sup> equivalendo a 20.49 % da área do

sistema aquífero fraturado. As áreas indicativas de alto potencial estão ligadas a



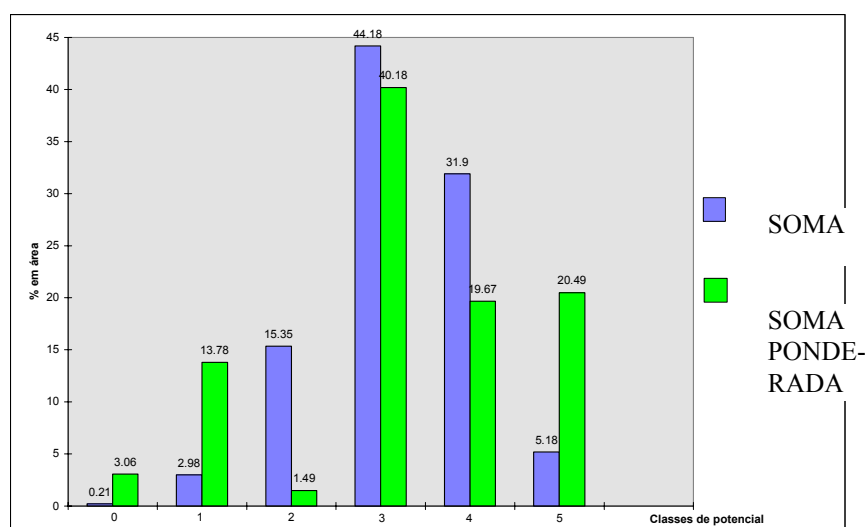
*Figura 4.30 Mapa binário (booleano) do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de soma ponderada dos planos de informação (Escala 1:200.000).*

zonas fraturadas em sienogranitos com cobertura de mantos de alteração moderados e em declividades modestas; ocupam uma superfície de 60,38 km<sup>2</sup> (19,67%). O potencial médio é predominante, abrange 123,3 km<sup>2</sup> (40,18 %) e está relacionado principalmente aos biotita-monzogranito-porfíricos. O feldspato-alcálico-granito apresenta um potencial muito baixo a nulo, principalmente ao longo dos morros Teresópolis e Santana, localizados nas porções sudoeste e centro nordeste da área, respectivamente (figura 4.18).

*Tabela 4.10 Distribuição dos potenciais obtidos pela lógica booleana - soma ponderada.*

POTENCIAL	ÁREA ( km <sup>2</sup> )	%
5 (muito alto)	62,89	20,49
4 (alto)	60,38	19,67
3 (médio)	123,30	40,18
2 (baixo)	4,58	1,49
1 (muito baixo)	46,29	13,78
0 (nulo)	9,40	3,06

Comparando a distribuição em área dos potenciais obtidos por esta operação (tabela 4.10) com a do modelo booleano-soma (tabela 4.9), verifica-se que com a ponderação há uma predominância das áreas de melhor potencial (figura 4.31).



*Figura 4.31 Distribuição da área de cada classe de potencial obtidos pela lógica booleana-soma e soma-ponderada.*

A análise dos dados de poços tubulares mostra uma relação de crescimento da vazão com aumento das classes de potencial hidrogeológico. A correlação é positiva, com  $r$  de 0,627 e  $r^2$  de 0,38. Há uma evolução em relação ao modelo anterior (soma), no entanto, verifica-se que 10 poços com vazões inferiores a 4 m<sup>3</sup>/h (figura 4.32). estão relacionados a áreas de potencial maior ou igual a 3. Tal fato pode estar ligado a problemas construtivos dos poços ou a incapacidade do modelo representar perfeitamente a heterogeneidade peculiar dos aquíferos de meio fraturado. Apesar disto considera-se satisfatória a relação, principalmente se for levado em conta que poços com vazão superior a 2 m<sup>3</sup>/h são considerados produtivos em terrenos cristalinos.

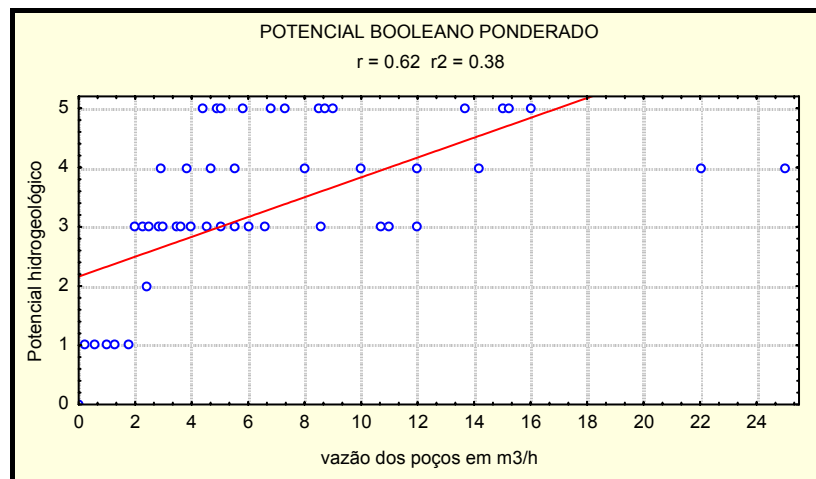


Figura 4.32 Relação entre o potencial relativo obtido por lógica booleana-soma-ponderada e a vazão dos poços.

#### 4.10 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO ATRAVÉS DE LÓGICA FUZZY

Conforme referido no capítulo 3, o potencial hidrogeológico do cristalino na área de estudo é avaliado com lógica nebulosa fuzzy, utilizando três operações: multiplicação, soma e soma ponderada. Os parâmetros são os mesmos utilizados na lógica binária, porém para cada plano é definido seu grau de pertinência, transformando-os em

planos de informação fuzzy. A função de pertinência adotada equivale a do tipo sigmoidal (figura 4.33).

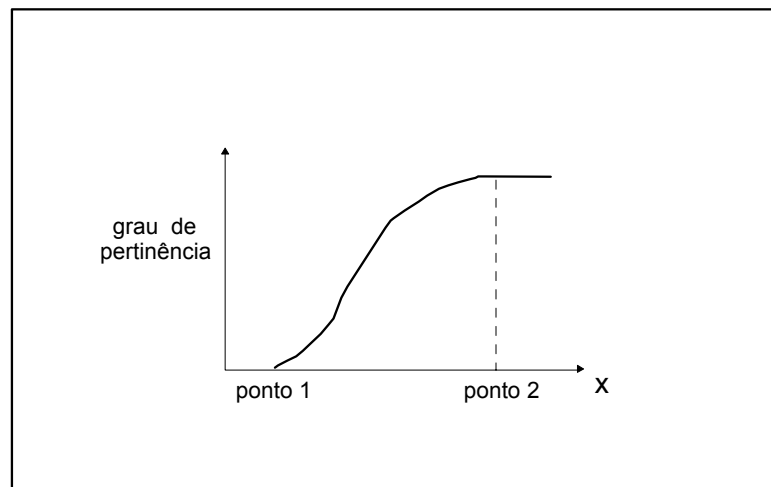


Figura 4.33 Esquema da representação da função de pertinência do tipo “sigmoidal” e os limites (ponto 1 e ponto 2) da definição do potencial hidrogeológico.

O grau de pertinência varia de 0 a 1 e é definido pelas seguintes condições:

$$= 0; x \in ] - \infty; \text{pto } 1] \quad (4.1)$$

$$= \frac{1}{1 + \left\{ \frac{x - \text{pto } 2}{\text{pto } 2 - \text{pto } 1} \right\}^2}; x \in [\text{pto } 1; \text{pto } 2] \quad (4.2)$$

$$= 1; x \in ] \text{pto } 2; +\infty [ \quad (4.3)$$

Os limites fuzzy para cada parâmetro, definidos pela experiência e conhecimento da área, encontram-se na tabela 4.11. As litologias favoráveis à ocorrência de água subterrânea devem pertencer a classes com nota mínima de 30, o que equivale ao bitotita-sieno-granito. Na declividade do terreno, única definida por função de pertinência decrescente, a condição favorável deve pertencer a valores abaixo de 12%. O grau de pertinência das classes de uso do solo é limitado por 60 (soloexposto) e 100

(mata nativa). O parâmetro índice de fraturamento tem condição favorável delimitada pelo intervalo 10 e 100. A espessura do manto de alteração tem limites entre 30 e 100, equivalendo, respectivamente, a 15,0 e 55,0 metros de espessura.

*Tabela 4.11 Limites das funções de pertinência fuzzy para os parâmetros envolvidos na avaliação do potencial hidrogeológico*

PARÂMETRO FUZZY	LIMITE PONTO 1	LIMITE PONTO 2
LITOLOGIA	30	90
DECLIVIDADE	0	12
USO DO SOLO	60	100
ÍNDICE DE FRATURAMENTO	10	100
ESPES. MANTO DE ALTERAÇÃO	30	100

Definidas as funções de pertinência para cada parâmetro são criados os planos de informações fuzzy, os quais são utilizados na análise do potencial hidrogeológico.

#### **4.10.1 Cruzamento fuzzy (E)**

Este primeiro operador fuzzy realiza o cruzamento dos planos fuzzy resgatando sempre o valor mínimo entre os conjuntos.

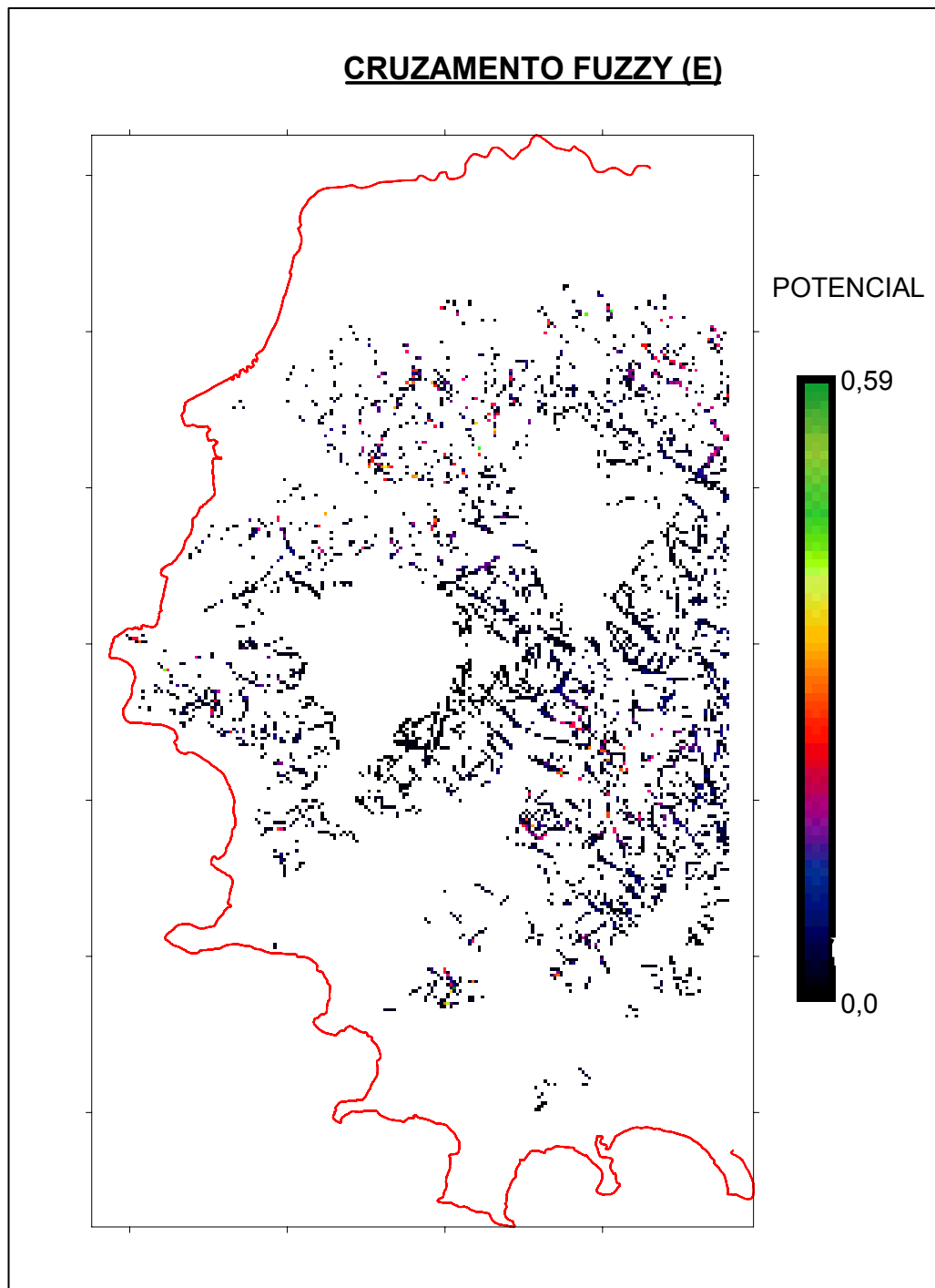
O mapa gerado (figura 4.34) aparentemente se parece com o mapa obtido pela lógica booleana-multiplicação, porém tem seus valores variando entre 0 e 0,59. Verifica-se que as áreas de potencial hidrogeológico são balisadas pelas zonas fraturadas, no entanto a análise com os dados de vazão dos poços, apresentada na figura 4.35, não revelou relação alguma.

#### **4.10.2 Soma fuzzy**

A operação de soma dos planos fuzzy par dois conjuntos A e B é representada pela seguinte relação:

se  $A + B \geq 1$  o resultado é igual a 1; se  $A + B < 1$  o resultado será a soma de A e B.





*Figura 4.34 Mapa do potencial hidrogeológico do cristalino obtido através de operação de multiplicação dos planos fuzzy (Escala aproximada 1:200.000).*

A operação de soma dos planos fuzzy apresenta um mapa, representado pela figura 4.36 onde predominam áreas de potencial acima de 0,90. A tabela 4.12. apresenta a frequência de cada classe de potencial. A análise do mapa e da regressão simples dos dados de vazão (figura 4.37) revelam a incoerência do modelo, à exemplo da operação

de multiplicação dos planos fuzzy, esta operação resulta em áreas de potencial hidrogeológico sem significado físico.

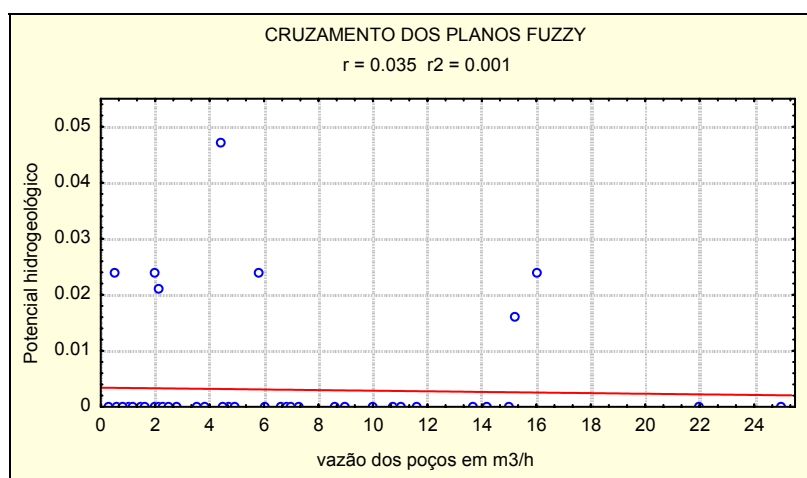
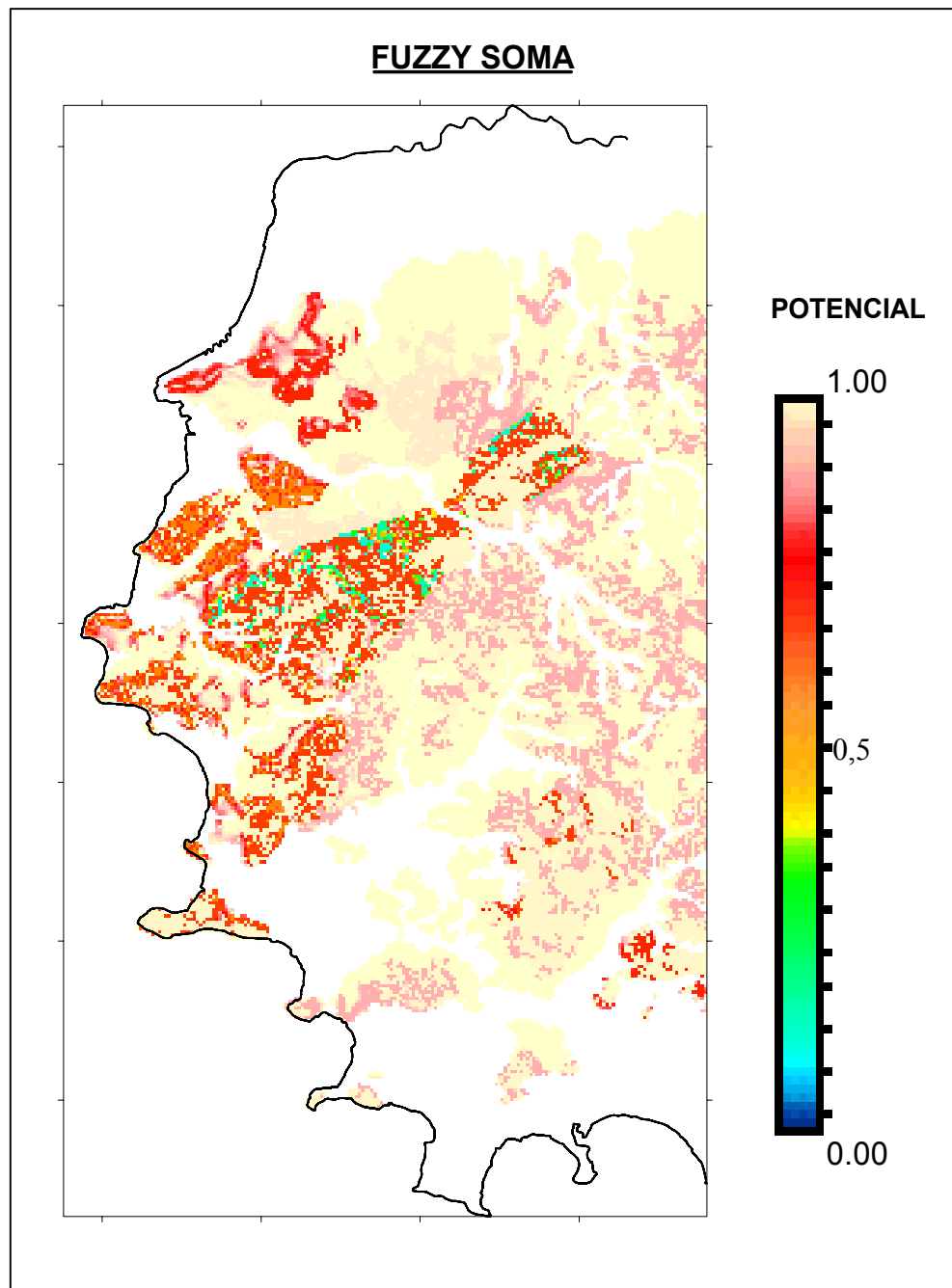


Figura 4.35 Análise do potencial relativo obtido por multiplicação dos planos fuzzy pela vazão dos poços.

Tabela 4.12 Frequência das classes de potencial obtida pela soma dos planos fuzzy

CLASSE DE POTENCIAL	FREQÜÊNCIA (%)	FREQ. ACUMULADA(%)
0,0 a 0,1	0.26	0.26
0,1 a 0,2	0.11	0.37
0,2 a 0,3	0.16	0.53
0,3 a 0,4	0.09	0.62
0,4 a 0,5	0.15	0.77
0,5 a 0,6	1.1	1.87
0,6 a 0,7	4.28	6.15
0,7 a 0,8	1.52	7.67
0,8 a 0,9	1.78	9.45
0,9 a 1,0	90.55	100.00



*Figura 4.36 Potencial hidrogeológico obtido por lógica fuzzy com soma dos planos (Escala aproximada 1:227.000).*

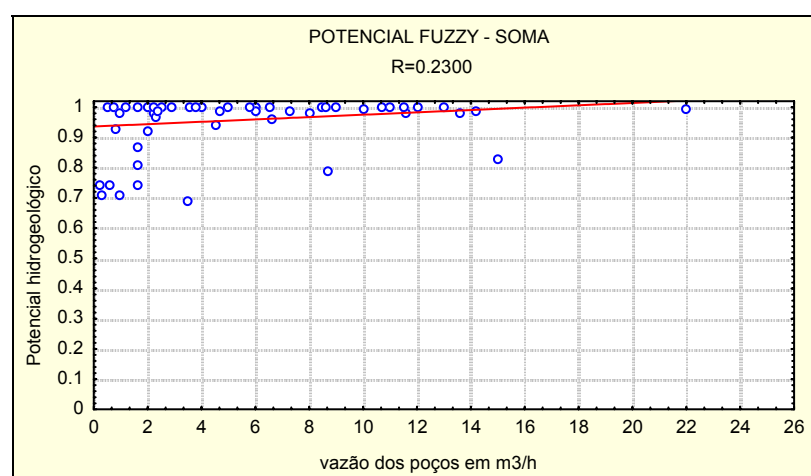
### **4.10.3 Soma ponderada dos planos fuzzy**

A operação de soma ponderada dos planos fuzzy, à exemplo da lógica booleana -soma ponderada, leva em consideração a influência relativa de cada parâmetro

no comportamento hidrogeológico do cristalino, porém os ponderadores variam de 0 a 1. A tabela 4.13 representa os diferentes pesos para cada plano fuzzy, os quais foram determinados conforme a experiência e conhecimento da região.

*Tabela 4.13 Pesos utilizados na soma ponderada dos planos fuzzy*

PARÂMETRO FUZZY	PESO
LITOLOGIA	0,8
DECLIVIDADE	0,7
USO DO SOLO	0,5
ÍNDICE DE FRATURAMENTO	1,0
ESPESS. MANTO DE ALTERAÇÃO	0,5



*Figura 4.37 Análise de regressão simples entre o potencial obtido pela soma dos planos fuzzy e os dados de vazão dos poços.*

Verifica-se que o mapa resultante de tal operação (figura 4.38) apresenta resultados de potencial que variam de 0 a 1, distribuídos conforme a tabela 4.14, e mostra resultados contínuos quando comparado com os mapas obtidos pela lógica booleana.

As áreas de potencial entre 0,4 e 0,5 são predominantes (36% da área) e correspondem aos biotita monzogranito-porfíricos. Outra classe bem destacada é a que varia entre 0,3 e 0,4, que se relaciona principalmente com os monzo-granitos e sienogranitos, também ocorrendo nos ortognaisses e biotita-monzo-granitos porfíricos. A

região correspondente ao feldspato-alcalino-granito destaca-se com um potencial inferior a 0,30 principalmente ao longo dos morros mais altos da área, Morro Santana e Teresópolis. As melhores áreas ( $> 0,8$ ) ocupam menos de 5,6 % da área e são restritas a áreas intensamente fraturadas.

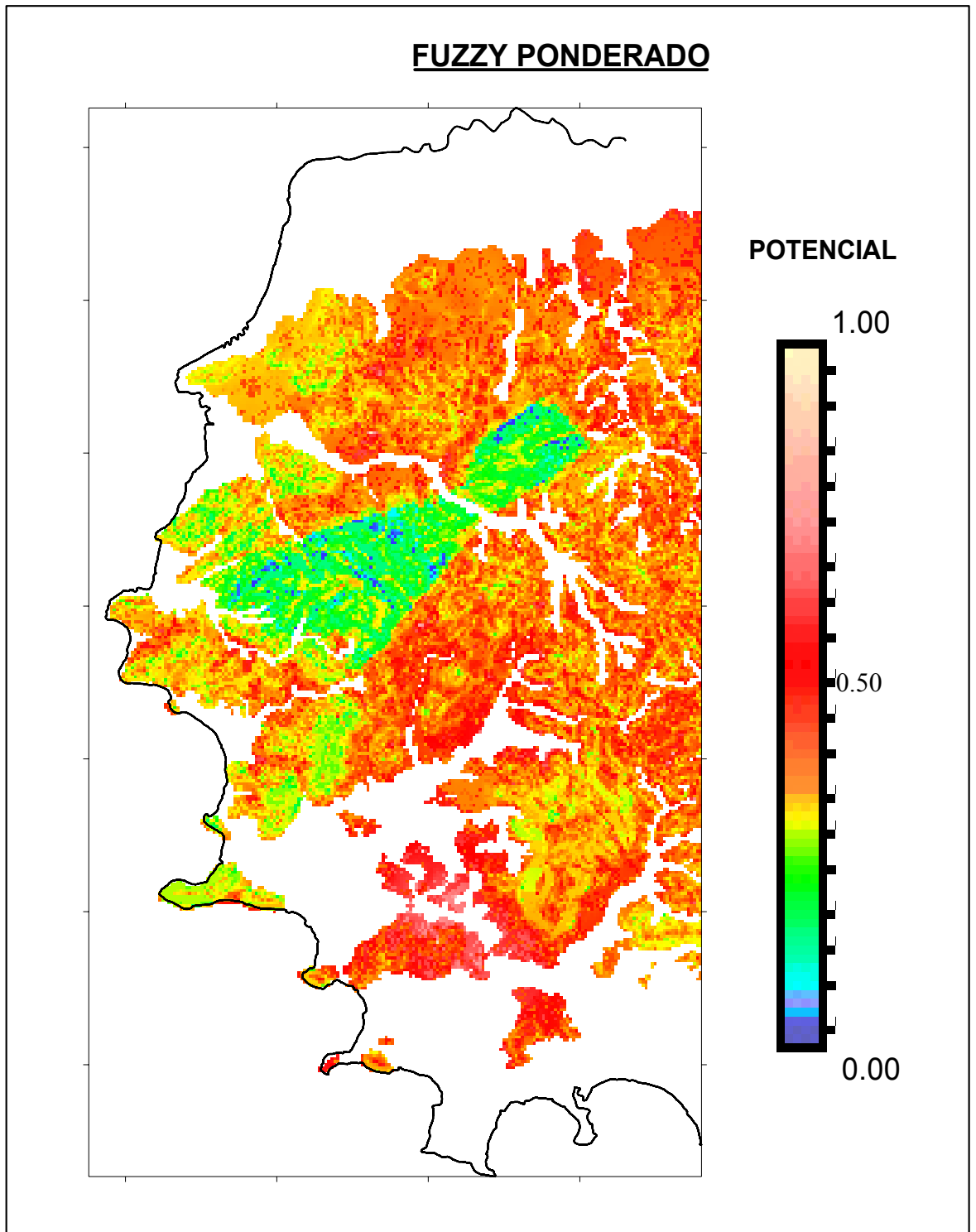
*Tabela 4.14* Freqüência das classes de potencial obtida pela soma ponderada dos planos fuzzy.

CLASSE DE POTENCIAL	FREQÜÊNCIA (%)	FREQ. ACUMULADA(%)
0,0 a 0,1	0.47	0.47
0,1 a 0,2	1.93	2.39
0,2 a 0,3	12.8	15.19
0,3 a 0,4	16.2	31.39
0,4 a 0,5	36.61	68.00
0,5 a 0,6	14.84	82.84
0,6 a 0,7	11.64	94.48
0,7 a 0,8	4.94	99.42
0,8 a 0,9	0.57	99.99
0,9 a 1,0	0.01	100.00

A análise de regressão simples mostra uma relação positiva com coeficiente de correlação ( $r$ ) de 0,63 e um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,40 (figura 4.39).

Com a ponderação dos parâmetros fuzzy ocorre uma evolução do modelo em relação ao cruzamento fuzzy e soma dos planos fuzzy, à exemplo do que ocorreu na lógica booleana.

Das seis análises efetuadas o mapa obtido pela lógica nebulosa fuzzy de soma ponderada e o mapa da lógica booleana soma-ponderada foram os que apresentaram melhor relação com os dados de vazão. A lógica fuzzy soma ponderada apresentou uma ligeira vantagem, pois o mapa mostra classes com uma transição gradual, mais refinado que o mapa booleano.



*Figura 4.38 Potencial hidrogeológico obtido por lógica fuzzy com soma ponderada dos planos (Escala 1:200.000).*

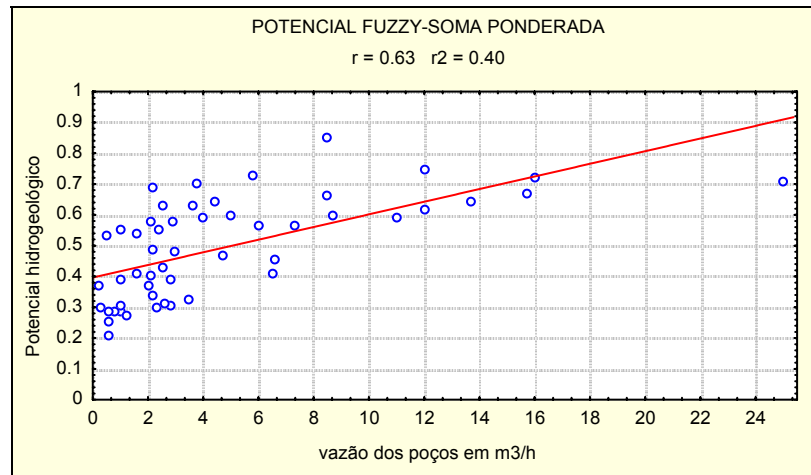


Figura 4.39 Análise de regressão simples entre o potencial obtido pela soma ponderada dos planos fuzzy e os dados de vazão dos poços.

## 5 CONCLUSÕES

A proposição metodológica de integração de dados de sensoriamento remoto, dados geológicos, geo-estruturais, ambientais e hidrogeológicos, através de geoprocessamento, se demonstrou bastante útil na separação de áreas potencialmente favoráveis à ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos. Trata-se de uma abordagem que serve de suporte para estudos localizados de maior detalhe para locação de poços, tornando a pesquisa direcionada o que proporciona uma economia de tempo e de recursos.

As relações entre os diversos tipos litológicos, estruturais e geomorfológicos ficaram evidentes no zoneamento hidrogeológico da região, por exemplo os morros mais altos relacionados ao feldspato alcalino granito sempre se mostraram com baixo potencial em todos mapas obtidos, com exceção da lógica “fuzzy” soma.

A criação de um índice de fraturamento baseado na integração da frequência, comprimento e intersecção de lineamentos morfo-estruturais extraídos de diversas fontes e escalas, vem a contribuir na análise de lineamentos para estudos hidrogeológicos.

Em relação aos resultados obtidos nas diferentes lógicas estudadas observou-se que:

- a lógica booleana simples mostrou-se imprópria para a definição do potencial hidrogeológico, porém, quando foi utilizada uma integração ponderada dos parâmetros o resultado foi bastante satisfatório.



- a lógica nebulosa (fuzzy) teve comportamento inadequado quando se utilizou operações de cruzamento e soma, no entanto, com a soma ponderada dos planos fuzzy obteve-se o melhor resultado da pesquisa. O mapa obtido apresentou uma transição gradual entre a situação não favorável e a mais favorável a ocorrência de água subterrânea.
- ambas as lógicas, booleana e fuzzy, tiveram bons resultados quando se utilizou ponderadores baseados no conhecimento da região, mostrando que na análise é necessário a discussão de especialistas na hora de fornecer pesos e notas aos diversos parâmetros envolvidos.

Os mapas obtidos pela lógica booleana soma ponderada e soma ponderada dos planos fuzzy apresentaram uma melhor performance do que os mapas gerados de modo tradicional. Estes integram informações diversas que de uma maneira ou outra influem no comportamento da água subterrânea, obedecendo uma lógica. Os dados de produtividade de poços, quando plotados sobre os mapas de potencial hidrogeológico, mostraram uma razoável relação com classes mapeadas. No caso da lógica fuzzy ponderada o coeficiente de correlação mostrou-se superior aos encontrados na literatura internacional.

## **5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Embora os resultados obtidos por esta pesquisa tenham se mostrado satisfatórios, cabe citar algumas recomendações para o aprimoramento e melhor desempenho da metodologia adotada. Dentre elas estão:

- executar um estudo detalhado de geologia estrutural, com o tratamento de dados de campo, buscando definir se determinadas direções possuem maior abertura que outras; e se houver ponderá-las na hora do cálculo do índice de fraturamento.

- desenvolver a partir do modelo numérico do terreno um estudo das formas de relevo em relação ao escoamento da água superficial, isto é, determinar zonas de convergência e divergência das linhas de fluxo.
- utilizar como um novo parâmetro a densidade de drenagem, obtida a partir de cartas topográficas, e expandida com foto-interpretação em escala maior que 1:60.000.
- efetuar campanhas regulares de campo para a medição de níveis de poços escavados e piezômetros, a fim de se determinar a piezometria dos depósitos de alteração de rocha e verificar sua influência no comportamento do fraturado.
- realizar estudos dos perfis geológicos dos poços tubulares, através de endoscopia, com ênfase na análise das entradas d'água.
- executar um mapeamento de solos sob o ponto de vista de permeabilidade, incorporando-o como mais um parâmetro na análise do potencial aquífero, principalmente na verificação das áreas de recarga.
- desenvolver um método de ponderação de parâmetros baseados em regras de decisão, diminuindo a subjetividade da escolha de pesos e notas.
- executar um estudo hidrogeoquímico da região, buscando parâmetros que possam auxiliar na definição das áreas de recarga.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, Gilberto. Métodos para obtenção de informações estrutural em produtos de sensoriamento remoto. *Caderno do IG. Unicamp*, Campinas-SP, 4 (1): 98-111.1994.
- AMARO, V.E. & STRIEDER, A. J. Análise de fotolineamentos e padrões estruturais em imagens de satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Balneário de Camboriú, 1994. *Boletim de resumos expandidos...* Balneário Camboriú-SC; SBG,1994. v.1, p.443-444. \_\_
- BARBOSA, M.P.; NETO, A.F.S.; SANTOS, M.J. Aplicação de dados de baixa resolução espacial TM/LANDSAT-5, na pesquisa de águas subterrâneas na Bacia do Alto Sucuru. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,8. Recife, 1994. *Anais...* Recife-PE: ABAS, 1994. p.395-404.
- BARRETT, E.C. & CURTIS, L.F. *Introduction to environmental remote sensing*, 3ed London: Chapman & Hall. 3 ed. 1995. 427p.
- BONHAM-CARTER,G.F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Ontario: PERGAMON, 1994 . 398p.
- BRUM, Arnaldo R. & FREITAS, Marcos A. Estudo hidrogeológico visando a perfuração de poços tubulares para o abastecimento d'água do Hospital São Lucas -PUC, Porto Alegre-RS. *Hidrocon*. 1992. (Relatório Interno). 30p.
- BURROUGH, P. A. Fuzzy Mathematical Methods for Soil Survey and Land Evaluation. *Journal of Soil Science* 40:477-492,1989.
- BURROUGH, P. A. *Principles of Geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press, 1986. 194 p.
- COSTA, W. Duarte. A hidrogeologia à luz da mecânica das rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. *Anais...* Recife: ABAS, 1980. p.375-383.

- COSTA, Waldir Duarte. *Prospecção e exploração de águas subterrâneas em rochas fraturadas*. Fortaleza-CE: ABAS, 1985. 120p.
- CUSTÓDIO, Emílio & LLAMAS, Manoel Ramón. *Hidrologia subterrânea*. 1ª edição Barcelona: Editora Omega, 1975. 2 v.
- EASTMAN, J. R. *Idrisi for windows user's guide*. Worcester-MA: Graduate School of Geography, Clark University, 1995. 108 p.
- EVANS, B. M. & MYERS, W.L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potencial with DRASTIC. *Journal of Soil and Water Conservation*, (Mar./Apr.): 242-245, 1990.
- FEITOSA, Fernando A. C. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM LABHID-UFPE. 1997. 412p.
- FRAGA, G. & REBOUÇAS, A. C. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. *Revista Água Subterrânea*. ( 12 ) : 29-55, ago. 1988.
- FREITAS, M. A. & MENDES, C. A. Comparação entre modelo booleano e lógica fuzzy na determinação de áreas de proteção de aquíferos fraturados , através de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, Vitória, 1997. *Anais*. Vitória: ABRH,1997. v.1 p.719-729.
- FOSTER, Stephen ; VENTURA, M. ; HIRATA, R.. *Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável*. São Paulo: Instituto Geológico, 1993, Manuais, 55p.
- GUPTA, Ravi P. *Remote sensing geology*. Springer Verlag: Berlim: 1991. 356p.
- HARDCASTLE, K. C. Photolineament factor: a new computer-aided method for remotely sensing the degree to wich bedrock is fractured. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 61 (6 ): 739-747, 1995.
- HAUSMAN, A. Behaviour of the cristaline as an aquifer in greate Porto Alegre. International Association of Hydrogeologist, *Memoires*. Porto Alegre-RS, 11: 45-52, 1975.
- HOBBS, B. E. ; MEANS, W. D. ; WILLIAMS, P. F. *An outline of structural geology*. New York: John Willey & Sons, 1976, 576p.
- KRISHNAMURTHY, J.K et al. An approach to demarcate ground water potencial zones through remote sensing and a geographical information system. *International Remote Sensing*. 1990. Vol. 17 n° 10 p.1866-1884.
- LARSSON, Ingemer. *Ground-water in hard rocks*. Studies and Reports in Hidrology. Paris: UNESCO, 1984, 228p.
- LEOPOLDO, P.R. & HERRERA, Ozana M. . Estimativas do consumo e da demanda

- em água potável na cidade de Botucatu-SP. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, Vitória-ES, 1997, *Anais...* Vitória. ABRH, 1997 v. 3, p291-296.
- LIU, C.C. & RODRIGUES, J.E. A geometria da iluminação solar e sua influência na observação de estruturas geológicas em imagens orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5, Natal-RN, 1988. *Anais...*v. 2. p294-302.
- MENEZES, P.R. ; ASSAD, E.D. ; SANO, E.E. *Introdução ao processamento de imagens digitais de satélites e sensoriamento remoto.*(Coleção textos universitários.) Brasília: UnB, 1995. 67p.
- MENEZES, P.R. & FERREIRA JÚNIOR, L.G. *Comportamento espectral de alvos naturais como base para interpretação de imagens multiespectrais.* ( Textos universitários.)Brasília: UnB, 1995. 25 p.
- MÖBUS, Gilberto. *Análise estrutural e hidrogeológica do aquífero fraturado da formação Serra Geral-região noroeste do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre, 1987. 124p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, IPH-UFRGS.
- MOORE, G. K. & WALTZ, F. A. Objective procedures for lineaments enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 49 ( 5 ): 641-647, 1983.
- NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.* 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 308p.
- O'LEARY, D.W. ; FRIEDMAN, J.D. ; POHN, H.A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standarts for old terms. *Geol. Soc. Am. Bulletin.* 87 (10) 1463-1469. 1976.
- OLIVEIRA, W. Projeto “plano diretor de águas subterrâneas da região metropolitana de Belém e adjacências, uma proposta de diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos e normatização da exploração”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9, Salvador, 1996. *Anais...* Salvador, ABAS, 1996. p. 237-239.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE & UFPR. *Água subterrânea e poços tubulares.* Curitiba, 1969. 392p. (Tradução de Johnson Division ).
- PHILIPP, R. P. et al. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Baln. Camboriú-SC, 1994. *Boletim Resumos Expandidos.* Balneário de Camboriú: SBG, 1994. p.98-99.
- PHILIPP, R. P. Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na região de Porto Alegre-RS. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 4, Gramado, 1995. *Anais...* Gramado-RS, SBG, 1995 p-207-208.

- PICADA, R. S. Ensaio sobre a tectônica do escudo sul-rio-grandense: caracterização dos sistemas de falhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, São Paulo. 1971. *Anais...* São Paulo: SBG, 1971- v.1p.167-191.
- RAMGRAB, G. E. & WILDNER, W. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Porto Alegre. Folha SH.22-Y-B. Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:250.000.* Brasília: CPRM, 1997. 1v.
- REBOUÇAS, Aldo da Cunha. *Diagnóstico do setor hidrogeologia.* São Paulo. ABAS, 1996. ( Caderno Técnico nº 3). 46 p.
- RICHARDS, J. A. *Remote sensing digital image analysis. an introduction.* 2.ed. Berlin : Springer Verlag, 1993.
- ROCCIO, M.A. & VENEZIANI, P. Critérios para prospecção de água subterrânea com emprego de dados de sensoriamento remoto na região de Paraibuna-Taubaté-Jambeiro, no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7, Belo Horizonte, 1992. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1992. p. 240-245.
- SAMPAIO, O.S. ; MATTOS, J. ; VENEZIANI, P. Estudos de fraturamentos para pesquisa de água subterrânea no Estado de Sergipe com produtos de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Gramado, 1986. *Anais...* Gramado: 1986. v.1. p.447-452.
- SANDER, Per. Water-well siting in hard-rock areas: identifying promising targets using a probabilistic approach. *Hidrogeology Journal*, 5, (3): 32-43, 1997.
- SCHNEIDER , A. W. ; LOSS. E. L. ; PINTO, J. F. Mapa geológico da folha de Porto Alegre. Porto Alegre escala 1:50.000, UFRGS. Instituto de . Geociências , 1974.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Techniques for image processing and classification in remote sensing.* New York: Academic Press, 1983. 249 p.
- SCHUCK, M. T. O et al. Estudo morfotectônico e estrutural de um segmento da bacia do rio Uruguai-RS, através de técnicas de sensoriamento remoto. *Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo, 13 ( 30 ): 229-242. 1990.
- SCHUCK, M. T. O ; LISBOA, N.A. ; EICK, N.C. Análise e interpretação lito-estrutural de imagens. Uma aplicação do conceito “multi” na faixa metamórfica ao sul de Santana da Boa Vista-RS. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Gramado, 1986. *Anais...* Gramado: 1986. v.1. p.447-452.
- TAKAHASHI, Hiroíto A. *Caracterização morfo-estrutural e hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado através de técnicas de sensoriamento remoto e análise estatística em setor do Planalto Meridional-RS .* Porto Alegre, 1987. 126p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, IPH-UFRGS.

TAKAHASHI, H. A. ; HAERTEL V. ; LISBOA, N. A. Caracterização morfo-estrutural e hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado através de técnicas de sensoriamento remoto e análise estatística em setor do Planalto Meridional-RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, Curitiba, 1993. *Anais...* Curitiba: SBG, 1993 v.3. p 332-343.

TODD, David K. *Hidrologia das águas subterrâneas*. Rio de Janeiro: USAID, 1973. 524 p. (Tradução).

TODD, David K. *Ground-water hidrology*. 2.ed. New York: John Willey & Sons, 1980. 535 p.

VAN RANST, E. et al. Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. *Geoderma*. ( 70): 1-19, 1996.

## **6.1 ANEXOS**



Nº	Proprietário	UMT - E	UTM - N	Profundidade (m)	Revestimento (m)	Vazão (m3/h)
1	Norte /Shopping	486358	6680763	120		6
2	Dalton	483849	6676745	80		1
3	PUC/ Bibl.	483629	6674859	137	22.4	8.6
4	Jardim Botânico	482827	6675740	60	18	16
5	CIBER	488120	6682100	80	22	2.18
6	Hospital PUC	483614	6675216	103	13	5.79
7	Presídio 1	482395	6673356	56	22	13.66
8	Presídio 2	482139	6673232	57.5	35.15	15.23
9	ACADEMIA Bmil	481986	6673416			4
10	CARRIS	484269	6674690	80	33.5	5.5
11	CARREFOUR 2	484313	6674378	105	19	1.49
12	CORSAN / sede	486326	6676208	52	29.42	4,585
13	CORSAN / sede	486320	6676200	162	23.5	6
14	GN /UNIÃO	482425	6677507	90	26.65	4.9
15	AVIPAL /Iracema	483406	6677700	86	36	8,516
16	BIG SHOP1	486650	6681600	87	42	25
17	BIG SHOP2	486400	6681550	90		3
18	VILA MAPA	485000	6670550	132	22.5	7.2
19	GAUCHO/sedeCAMPO	484529	6660134	109	44	2.38
20	BRASPEL	488900	6664800	67	35	2.63
21	Haras Slick	488300	6658700	95	45.6	0.8
22	VIAÇÃO BELÉM NOVO	481750	6657850	46	46	1.1
23	CLOVIS MEDEIROS	498800	6676750	105	40.5	0.928
24	CRT	485883	6674394	300	43.9	2.1
25	SOPAL	488800	6682200	180	48	2.54
26	La Salle /Viamão	497150	6664800	87	50	2.5
27	Hosp. Pres. Vargas	479350	6679880	120	45	3
28	Bourbon 1	482237	6680787	66.7	15	6
29	Bourbon 2	482390	6680817	58	20.5	1.08
30	Santa Casa	478650	6677750	65	13	1.2
31	Moby Center	478620	6676200	90	41	6,376
32	Hospital Militar	481400	6679200	81		15
33	BB Militar	478158	6676193	126		1
34	Ritter Hotel	479050	6678550	85		2
35	Clube do Comércio	478238	6675658	90	41	2.2
36	Natali	480312	6678469	120	42	1.6
37	Hosp. Maia Filho	480149	6679174	145	29.5	8.65
38	Sauna Guaíba	480877	6676339	85	42.4	2.2
39	Quartel Serraria	479488	6662872	150		2
40	Motel Cabana	479792	6665018	94	30	2.14
41	Gardens	478114	6669126	85	18	0.98
42	AABB2	476445	6667559	160	28	4,713
43	AABB1	476558	6667441	155	32	1,514
44	Teresópolis TC	480114	6672158	123.7	29.8	4,355
45	Colégio Maria Imaculada	477438	6673742	70	60	6.8

46BPE	478589	6674172	138	21	3.76
47GRÊMIO	479314	6674499	132	15	8,473
48Jockey Club	480730	6670105	108	29	9.5
49Motel Botafogo	479063	6675136	65		4
50Kastelão	478562	6674535			9
51Cond. Jdim Sol	478177	6667518			1.5
52Metal. Emilio Cioba	478694	6671087	109		1.8
53Lavanderia Pampa	479755	6671341	80		2.4
54CAERGS	477950	6676600	17	17	6,545
55Pepsi Cola	478118	6675738	50	35.4	2
56TTCsede Campestre	481150	6659700	20	20	2.2
57MASSAS ADRIA	481069	6680119	113.5	15.5	0.6
58SOGIPA	481851	6680277	102	3.5	1.6
59POSTO PERNAMBUCO	480647	6680232	97	19	2.64
60VINHOS PRANZO	480551	6680363	42	33.9	10.89
61IND.GER.ESMALTADOS	480546	6680630	75	42	10
62HERCULES	483443	6680441	98	30	2.2
63COL. SÃO VICENTE	483676	6680021	84		4
64ZIVI HERCULES	485431	6680116	135	14	2.9
65ALBARUS	486764	6680759	40	6	0.5
66MOTEL MEDIEVAL	486806	6680479	90		1.6
67RENNER HERMANN	485392	6680215	100	25.22	12
68MATARAZZO	484246	6680010	51	38.7	8,516
69PLANAR	486428	6680189	50		0
70MOTEL STAR	485342	6680865	136		0.5
71LINDÓIA TC	485136	6680111	150		0.5
72POSTO IPIRANGA	479154	6678229	93		0.6
73CASA DICO II	479348	6677874	70	8	4
74MASTER GDE HOTEL	477756	6677578	168		1.5
75HOSP. MOINHOS VENTO	479889	6678351			2.8
76JD MANDURÊ	480411	6679905	70	19.5	1.2
77BANRISUL	479900	6661200	130	30	8
78BANRISUL	479850	6661100	129	26.5	4
79ARNALDO BARTH	487551	6654726	20		8