

**HIDRODINÂMICA E ANÁLISE
QUANTITATIVA
DAS FRATURAS NAS ROCHAS
CRISTALINAS DA
REGIÃO DE CAMPINA
GRANDE -PB**

Clóves Rogério da Silva Costa

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MINAS**

**HIDRODINÂMICA E ANÁLISE QUANTITATIVA
DAS FRATURAS NAS ROCHAS CRISTALINAS DA
REGIÃO DE CAMPINA GRANDE –PB**

Cloves Rogério da Silva Costa

Campina Grande, Dezembro de 1999

Cloves Rogério da Silva Costa

HIDRODINÂMICA E ANÁLISE QUANTITATIVA
DAS FRATURAS NAS ROCHAS CRISTALINAS DA
REGIÃO DE CAMPINA GRANDE –PB

Dissertação apresentada ao
curso de Mestrado em Engenharia de Minas
da Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Grau de Mestre.

Área de concentração : Lavra de Minas

Tumkur Rajarao Gopinath, Ph.D

Orientador

Campina Grande, dezembro de 1999



C837h Costa, Cloves Rogério da Silva.
Hidrodinâmica e análise quantitativa das fraturas nas rochas cristalinas da região de Campina Grande - PB / Cloves Rogério da Silva Costa. - Campina Grande, 1999. 116 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. Tumkur Rajarao Gopinath".
Referências.

1. Rochas Cristalinas - Fraturas. 2. Rochas Cristalinas - Aquíferos. 3. Água Subterrânea - Campina Grande - PB. 4. Dissertação - Engenharia de Minas. I. Gopinath, Tumkur Rajarao. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 622.831:556.33(813.3)(043)

HIDRODINÂMICA E ANÁLISE QUANTITATIVA DAS FRATURAS NAS ROCHAS CRISTALINAS DA REGIÃO DE CAMPINA GRANDE – PB

Cloves Rogério da Silva Costa

Dissertação aprovada em 17 de dezembro de 1999



Dr. Tumkur Rajarão Gopinath
Orientador



Dr.ª Eda Freitas Quadros
Examinadora



Dr. Hans Dieter Schuster
Examinador

Campina Grande, dezembro de 1999

AGRADECIMENTO

Acima de tudo e de todos agradeço a Deus, este "Força Superior" que ilumina meu caminho e me fortalece para poder vencer os obstáculos oferecidos pela vida.

Ao meu orientador Dr. Tumkur Rajarao Gopinath, pessoa pela qual tenho profunda admiração por sua qualidade, humildade, fraternidade e o trabalho que desempenha. Agradeço pelo apoio, incentivo, paciência e confiança no decorrer da pesquisa e que Deus o proteja e ilumine sempre.

"Cada vez que você ensina alguém, isso é ingerido, alguma coisa lhe acontece e surge um novo ser humano".

"Leo Buscaglio"

Aos meus pais Claudio da S. Costa e Angelina G. Silva que durante minha vida e formação, intervirão sempre a acreditar que o conhecimento e a base na formação do homem e buscando neste ensinamento que alcancei meus objetivos.

Aos meus irmãos Clávio, Claudio, Adriane, Clodoaldo, Clayton, Anália e Cleberto pelo apoio incansável e compreensão.

"A grandeza de uma profissão é talvez antes de tudo, unir os homens. Só há um luxo verdadeiro. O das relações humanas. A experiência mostra que amar não é olhar um para o outro, mas olhar juntos na mesma direção"

"Exupéry"

A M^a Rosângela N. Diniz, pela compreensão, incentivo e participação na elaboração da dissertação de forma direta e indireta.

“Meus sentimentos são como minha impressão digital, como a cor de meus olhos e o tom de minha voz: Únicos e irrepetíveis”.

Para você me conhecer, é preciso que conheça meus sentimentos. Minhas emoções são a chave de minha pessoa”.

“John Powell”

A Universidade Federal da Paraíba – Campos II, e laboratório de fotointerpretação e seu coordenador professor Antônio Costa, que gerou as facilidades técnicas e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba pela atenção e fornecimento de dados da pesquisa, principalmente o profissional Janato, e CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos amigos, professor Bazante, Edson e Adriana, Carlos Alberto e Regina, Carlos Wagner, Carmelo (Secretária), pelo constante apoio, estímulo e amizade.

SUMÁRIO

CAPITULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação.....	5
1.2 Objetivo principal.....	7
1.3 Objetivos gerais.....	7
1.4 Justificativa	8
1.5 Metodologia Aplicada	9
1.5.1 Localização.....	9
1.5.2 Interpretação e elaboração de mapas a partir de aerofotografia de satélite	10
1.5.3 Verificação e medições das fraturas no campo	11
1.5.4 Confecção de mapas de fraturas.....	12
1.5.5 Localização de fraturas e poços no mapa.....	12
1.5.6 Analise estatística	13
1.6 Conhecimento Do Problema	13
1.6.1 Água no planeta terra.....	13
1.6.2 A crise da água no terceiro milênio	16
1.6.3 Os desafios do terceiro milênio	18
1.6.4 Água no Brasil.....	19
CAPITULO II.....	22
2 HIDRODINÂMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DOS	22
AQUÍFEROS FISSURAIS.....	22
2.1 Geologia da água subterrânea	22
2.2 Água subterrânea em rochas ígneas e metamórficas.....	23
2.3 Hidrogeologia dos aquíferos fissurais	28
2.4 Analise da fissura elementar.....	29
2.5 Característica do meio	32
2.6 Fatores que atuam na capacidade do aquífero fissural e na qualidade da	
água	34
2.6.1 Efeitos dos fatores exogenos	35
2.6.2 Efeitos dos fatores endógeno.....	39
2.7 Locação e dimensionamento do poço	43
2.7.1 Elementos a Considerar na Locação de poços	43
CAPITULO III.....	55
3 GEOLOGIA E ESTATÍSTICAS DAS FRATURAS DAS SUB ÁREAS	55
DE ESTUDO.....	55
3.1 Geologia da Paraíba.....	55

3.2	Projeção estereográfica aplicada a geologia.....	59
3.3	Projeção estereográfica das fraturas das sub áreas de estudo	59
3.4	Avaliação estatísticas das sub áreas.....	62
3.4.1	Sub área de Queimada (Sul).....	63
3.4.2	Sub área de Alagoa Nova/Lagoa Seca(Norte).....	65
3.4.3	Região de Riachão (Leste)	68
3.4.4	Sub área de Bodocongó (Oeste).....	71
<i>CAPITULO IV.....</i>		74
<i>4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS DE FRATURAS....</i>		74
4.1	Metodologia e elaboração dos mapas de fraturas.....	74
4.2	Sub área de Queimada (sul).....	77
4.2.1	Fraturas	77
4.2.2	Direção do ângulo de mergulho	80
4.2.3	Falhas	82
4.2.4	Poços.....	82
4.3	Sub área de Bodocongo (Oeste)).....	83
4.3.1	Fraturas	83
4.3.2	Direção e ângulo de mergulho.....	86
4.3.3	Falhas	88
4.3.4	Poços.....	88
4.4	Sub área de Riachão	89
4.4.1	Fraturas	89
4.4.2	Falhas	92
4.4.3	Direção e Ângulo de mergulho	93
4.4.4	Poços.....	95
4.5	Sub área de Lagoa de Roça/Alagoa Nova (Norte)	96
4.5.1	Fratura.....	96
4.5.2	Direção do ângulo de mergulho	100
4.5.3	falhas.....	103
4.5.4	Poços.....	103
<i>CAPITULO 5.....</i>		104
<i>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PESPECTIVAS.....</i>		104
5.1	Discussões e Conclusões.....	104
5.2	Considerações.....	108
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	109
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>		110
<i>ANEXOS.....</i>		117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização da Paraíba com Campina Grande - PB	5
Figura 1.2 - Mapa de localização de Campina Grande com área pesquisada.....	9
Figura 1.3 - Imagem de radar da região de Campina Grande.....	10
Figura 1.4 - Mapa de foto interpretação das fraturas da região de Campina Grande	11
Figura 1.5 – Distribuição de água no planeta terra (R. F. M. Neto, 1997...).....	14
Figura 2.1 Decréscimo na produção média de poços (m ² /h por metro de poço abaixo do nível estático) com profundidade média em rocha cristalina na área Statesville. Carolina do Norte. Os números próximos aos pontos indicam o números de poços usados para obter os valores médios que definem a curva (dados de Legrand, 1954; Davis & De Wiest, 1966).....	25
Figura 2.2 – Decrescimento da produção média do poço (m ² /h por metro de espessura abaixo do nível estático) em profundidade média dos poços no cristalino dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (dados de Costa, 1966; Manoel Filho, 1996).	26
Figura 2.3 – Bloco rochoso contendo uma fissura elementar. O afastamento entre os blocos constitui a abertura (a) da fissura. Ao lado, uma ampliação das fissuras, mostrando a rugosidade (R) das duas paredes (Costa, W. D. ,1986).....	30
Figura 2.4 – Exemplo de microrrugosidade numa fratura polida em granito compacto, com 500 vezes de aumento, medido por meio de rugosímetro. R é da ordem de 30 microns (Quadros, E. F. 1982, 1997).....	31
Figura 2.5 – Preenchimento de fraturas: (a) o material preenchido provém da própria rocha;(b) o material infiltrou-se em meio aquoso superficial decantando dentro da fratura; (c) o material entrou em solução a partir da superfície; (d) em solução hidrotermal (Costa, W. D. 1972).	32
Figura 2.6 – Elementos do aquífero fissural (Costa, W. D. 1985, 1986)..	33
Figura 2.7 - Diferentes situações de relevo na locação de poços (Sever, C. W. 1964)...	36
Figura 2.8 - Riacho-Venda: associação da hidrografia com geologia Siqueira, L. 1963)	37
Figura.2.9 – Diferentes situações de mergulho de planos de xistosidade (Costa, W. D. 1982).	45

Figura 2.10 - Relação do ângulo de mergulho de fraturas com intensidade de fraturas pelo poço (Costa, W. D. 1982).....	46
Figura 2.11 – Relação ângulo de mergulho de fratura x distância x profundidade (Feitosa, F. A C. e Manoel Filho, J 1997)	48
Figura 2.12 – Ábaco para determinação da interseção de fraturas, em relação ao mergulho das fraturas e distância do poço à área de recarga (Feitosa, F. A C. e Manoel Filho, J 1997).....	49
Figura 2.13 – Diferentes situações encontradas na perfuração de poços em rocha cristalina fraturada. A profundidade total é de 80m (aproximadamente), com 15m de revestimento (no manto de decomposição pontilhados na figura). Os caso “Ä” e “J” representa as condições extremas de exploração; no primeiro o poço será seco e no segundo, as condições de exploração são as melhores (adaptação de Legrand e campbell).....	51
Figura 3.1 -- Área de estudo com respectivas sub-área no estado da Paraíba.....	61
Figura 3.2 – Frequência de ocorrência de fraturas na sub-área de Queimada (Sul) -A = Estereograma de polo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C= Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.	64
Figura 3.3 – Frequência de ocorrência de fraturas na Sub-área Alagoa Nova/Lagoa Seca - (Norte) A = Estereograma de polo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C= Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.	67
Figura 3.4 – Frequência de ocorrência de fraturas na Sub-área de Riachão - (Leste) A = Estereograma de polo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C= Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.	70
Figura 3.5 – Frequência de ocorrência de fraturas na Sub-área de bodocongó - (Oeste) A = Estereograma de polo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C= Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura...73	
Figura 5.1 - Vale-fratura -(Direção, sentido e ângulo de mergulho correlacionam-se diretamente com formações de vales) A - representação das direções dos vales com poço artesiano, B - fraturas no mesmo local com direção, sentido e ângulo de mergulho identico ao vale e C - uma apróximação das fraturas do local, afloramento de Lagoa Nova/Lagoa Seca VI'.....	106

LISTA DE TABELA

TABELA. 2.1 - Fatores que influenciam na água subterrânea em rocha cristalina (Costa, W. D. 1979).....	35
TABELA. 2.2 - Vazões por tipos de rocha nos poços do alto da Paraíba (Costa, 1979).....	39
TABELA 2.3 - Qualidade da água por tipos de rocha (Costa, 1979)	40
TABELA 2.4 - Vazão por tipos de rocha de acordo com os diâmetros dos poços (Legrand, 1959).....	41
TABELA. 2.5 - Vazões por tipos de rochas (Legrand, 1959).....	42
TABELA. 4.1 - Classificação das fraturas segundo sua frequência de ocorrência.	76
TABELA. 4.2 - Classificação da frequência de ocorrência conforme o angulo de mergulho.....	77
TABELA. 4.3 - Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Queimada (Sul).....	78
TABELA. 4.4 - Ocorrências de fraturas quanto angulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Queimada (Sul).....	81
TABELA. 4.5 - Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Bodocongó.(Oeste)	84
TABELA. 4.6 - Ocorrências de fraturas quanto angulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Bodocongó (Oeste)	87
TABELA. 4.7 - Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Riachão (Leste).....	90
TABELA. 4.8 - Ocorrências de fraturas quanto angulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Riachão (Leste)	94
TABELA. 4.9 - Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Lagoa Seca/Alagoa Nova (Norte)	97
TABELA. 4.10 - Ocorrências de fraturas quanto angulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Lagoa Seca/Alagoa Nova (Norte)	101

ABREVIATURAS

CDRM – Companhia de Desenvolvimento de Recurso Mineral

DNOCS – Departamento Nacional Obras Contra a Seca

DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral

GPS – Geographic Positioning System

LABHID – Laboratório de Hidrologia da Universidade Federal de Pernambuco

ONU – Organização das Nações Unidas

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

GPR – Graump Penetration Radar

RESUMO

O armazenamento e a exploração da água subterrânea nas rochas cristalinas enfrentam dificuldades devido às complexidades nas propriedades hidrológicas das rochas cristalinas tais como rochas metamórficas e magmáticas. Geralmente as fraturas nessas rochas proporcionam permeabilidade e porosidade necessárias para que estas se tornem aquíferos. Mas ainda é bastante oneroso e difícil detectar essas propriedades no subsolo e a presença da água nessas rochas. O objetivo desse trabalho é para elucidar a natureza das fraturas e as condições que governam a hidrodinâmica nas rochas cristalinas e tentar descobrir sistemática nas ocorrências das fraturas e as zonas propícias para o armazenamento da água subterrânea. O trabalho de pesquisa envolveu uma área de 25 km de raio tendo como ponto central à cidade de Campina Grande. No trabalho de campo, foram feitos os levantamentos sobre localização dos afloramentos das rochas, medições de azimutes das fraturas e descrição litológica em cada local. Os dados de campo foram utilizados para preparar os mapas de fraturas de cada sub-área, análise estatística das fraturas, e classificação das fraturas em relação ao espaçamento entre elas. Os poços tubulares e outras características existentes na região, foram colocados nos mapas de fraturas com objetivo de observar a correlação entre os poços e as fraturas.

A maior frequência e ocorrência das fraturas da região apresenta-se nos azimutes variando de N30W a N45E. Os mergulhos variam de 30° a 90° . As fraturas foram classificadas em relação às suas frequências e ocorrência e espaçamento, em classes de fraturas frequentes

locais, freqüentes regionais e regionais. Foram feitas as correlações entre as fraturas e as falhas transcorrentes existentes na região. Nas zonas de cisalhamentos existe a tendência de ocorrências de fraturas muito freqüentes locais, feixes de micro-fraturas e rocha fragmentada. A formação de drenagens e vales na região de estudo são diretamente relacionados às fraturas; vales largos, com indícios de presença de água, mostrando-se paralelas às fraturas tencionais ou nos seus cruzamentos.

Este trabalho de pesquisa mostrou que há fraturas tencionais que servem como condutor da água nas rochas. O armazenamento da água ocorre nas locais onde há uma grande interseção das fraturas com pequenos espaçamentos, bem como nas zonas de cisalhamentos onde as rochas apresentam uma grande concentração de micro-fraturas e fragmentação das rochas. Com conseqüência o meio adquire as características de um aquífero.

ABSTRACT

The understanding of the occurrence and exploration of underground water in crystalline rocks are difficult due to the complex hydrological properties of these igneous and metamorphic rocks. The fractures in these rocks will provide necessary porosity and permeability to become aquifer. But it is very difficult to detect these hydrodynamic properties in the subsurface and the presence of the underground water. The objective of the research is to elucidate the nature of the fractures and the conditions that govern the hydrodynamics of the crystalline rocks and try to discover the systematic in the occurrence of fractures and areas favorable for underground water storage. This research was undertaken with in 25 km of radius from the city of Campina Grande. During field work, out crop locations were noted using GPS and the following data were collected: lithological descriptions, strike and dip of the fractures, distance between fractures and fracture types. The field data was used to prepare fracture maps of each sub area, statistical analysis of the fractures, classification of the fractures based on the distance between the planes. The water wells existing in the region were plotted on the map to observe the correlation between fractures and water occurrence.

In the study area the frequently occurring fractures varies from N30W to N45E with dip varying from 30⁰ to 90⁰. The fractures were classified based on the frequency of their occurrences and spacing, in to locally frequent fractures, regionally frequent and regional fractures. The correlation between the fractures and the transcurrent faults of the region

was made. In the shear zone, fractures tend to be locally very frequent, zone of micro-fractures and fragmented rocks. Drainage and valley formation in the study area are directly related to the fractures where wide valleys with indications of water are always parallel to tensional fractures or in the intersections between fracture planes.

This work showed that the tensional (open) fractures serve as channels for the water flow and the flow depends on the available contact area. Water storage occurs in areas where there are big intersection of the closely spaced fractures generally near shear zones with high concentration of micro-fractures and rock fragmentation. Because such zones will have all the properties of an aquifer caused by deformational processes acting on the crystalline rocks.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O direito à água é um dos direitos fundamentais do homem – o “direito à vida”. Portanto, o planejamento e gestão da água devem levar em conta a solidariedade e o consenso em razão de sua distribuição desigual sobre a terra. Todo cidadão deve conhecer e respeitar a *Declaração Universal dos Direitos da Água* em benefício próprio e do seu vizinho. A água é a fonte da vida e do desenvolvimento em benefício próprio e do seu vizinho.

A água é a fonte da vida e do desenvolvimento. Trata-se de um recurso estratégico por questão de segurança nacional e por seus valores sociais, econômico e ecológico. Esse bem natural é um patrimônio da humanidade que serve para tudo e para todos, sendo, portanto, um mineral que deve ser compartilhado com gerações atuais e futuras que habitam nas bacias hidrográficas e suas fronteiras.

As questões ambientais e o desenvolvimento sustentável serão objeto de prioridade mundial no século XXI por imposição da sociedade, que dia-a-dia pressiona o governo em busca de melhor qualidade de vida. No terceiro milênio as maiores pressões serão por água, alimento e emprego.

Se não forem adotadas em tempo, providências hábeis como visão estratégica de futuro, no decorrer do terceiro milênio alguns países ricos poderão garimpar água e, muitos países pobres, como sempre, garimparão dinheiro para sobrevivência. Reduzindo o desperdício, recuperando a qualidade dos mananciais hídricos, racionalizando o

recuperando a qualidade dos mananciais hídricos, racionalizando o consumo e avançando com a tecnologia racional de exploração hídrica, a população mundial pode ainda crescer muito sem problemas de água.

O povo só dá valor à água quando ela falta nas torneiras e quando secas ou enchentes provocam sérios prejuízos socioeconômicos ao patrimônio público ou privado. A idéia de uma grande parcela da população é que a água é infinitamente abundante e, por isto, esta grande parcela não economiza o precioso líquido e muito menos se preocupa com os cuidados necessários à conservação da qualidade das águas, supondo que a renovação natural e o volume dos recursos hídricos por si só têm capacidade de autodepuração. Essa regra não é geral.

A sociedade precisa saber que água de má qualidade (poluída ou contaminada) só serve para navegação e que causa doenças como hepatite, febre, diarreia, alergia, cólera, poliomielite e leptospirose.

Daí a importância do saneamento básico (abastecimento d'água potável, rede de esgoto e coleta de lixo), caracterizando o valor social da água pela proteção à saúde pública. O tratamento das águas residuais é uma necessidade para evitar a morte dos seres vivos ou a onerosa recuperação de qualidade dos cursos d'água.

Quanto ao aspecto econômico, a água é fundamental na geração de emprego (agricultura e indústria) e insumo à produção de alimento e bens de consumo. Por exemplo, no uso industrial, para se reproduzir uma tonelada de tecido são necessário mil metros cúbicos de água; cada barril de petróleo refinado consome 290m^3 d'água; cada 20m^3 d'água é usado para fabricar um metro cúbico de cerveja; para fabricar 1 quilo de pão, gasta-se da plantação de trigo até padaria mil litro de água.

Conclui-se que água é fator de produção e proteção à saúde pública, sendo um patrimônio do planeta essencial à vida humana, animal e vegetal pela relevância ao desenvolvimento sustentável em benefício da sociedade. Sem água não poderíamos conceber como seria a atmosfera, o clima, a vegetação, a cultura ou a agricultura. Água com boa qualidade e suficiência, gera riquezas e propicia vida saudável.

A água é considerada um líquido precioso à vida. O seu ciclo na terra é modificado por algumas atividades humana e também grande parte disponível é contaminada. Nos próximos 50 anos, os problemas relacionados com a água deverão afetar praticamente todos os habitantes da terra. Estudos comprovam que, no próximo século, a crise da água pode ser a principal causa de guerras, como já vem acontecendo em Ruanda e no Oriente Médio, que vivem em conflito devido à falta de água.

Como em toda a terra, a distribuição da água no Brasil ocorre de uma maneira desordenada. Enquanto as regiões norte, sul e sudeste enfrentam inundações, deslizamento e erosão do solo nas estações chuvosas, no nordeste a seca castiga severamente nos períodos de estiagem, fazendo com que boa parte da população, que vive da agricultura, migre para outros estados. Outra parte faz da água um tesouro perdido e vivem em busca de métodos que possam solucionar a sua escassez.

Alguns Estados e propriedades de alta renda conseguiram amenizar a situação com a abertura de poços, trasladação de água, etc. Mas o problema é resolvido apenas periodicamente. É preciso que encontre uma solução definitiva que abranja todas as áreas castigadas pela seca, vivendo em condições precárias, principalmente devido à escassez do precioso líquido. É necessário que os órgãos de pesquisa se empenhem nos seus estudos, no sentido de solucionar um problema não só

do nordeste, mas, que poderá afetar outras regiões. Tendo em vista uma visão futurística a respeito da solução do problema, resolvemos estudar e dar a nossa contribuição, pesquisando as falhas e frestas com o intuito de investigar a retenção de água nestas estruturas.

1.1 APRESENTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado na área de Lavra de Minas direciona seu estudo para pesquisar as estruturas geológicas tais como falhas e fraturas de rocha, numa parte do Estado da Paraíba, objetivando a pesquisar o acúmulo de água nessas estruturas.

É um estudo pioneiro nessa área de estudo que apresenta, novos horizontes de estudos geológicos, despertando novas visões de interesse científico e sócio-econômico.

A área de pesquisa é situada a 140 Km da Capital da Paraíba abrangendo um raio de 25 km em torno da cidade de Campina Grande, onde se encontram rochas cristalinas fraturadas propícias ao escoamento de água (Fig. 1.1).

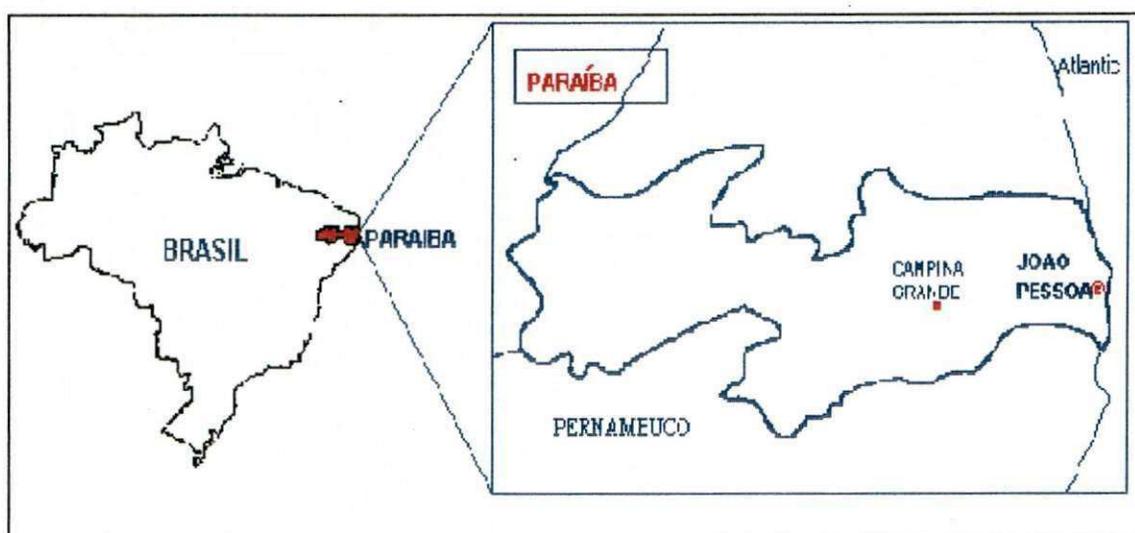


Figura 1.1 - Mapa de localização da Paraíba com Campina Grande - PB

No intuito de avaliar a situação da escassez de água no nordeste, no Estado da Paraíba o trabalho discorre sobre o histórico da disponibilidade hídrica subterrânea na região nordeste do Brasil, histórico e importância da água subterrânea, reconhecimento da geologia nordestina, hidrogeologia dos meios anisotrópicos.

Para a análise das estruturas geológicas (fraturas, juntas e falhas) das rochas cristalinas da região, necessitou-se de reconhecimento geológico da região tanto bibliográfica como in loco, fotointerpretação e instrumentos de medição geológicos e geográficos, equipamentos computacionais para interpretação de dados e confecção de mapas.

O trabalho conclui mostrando as características gerais do faturamento da região, orientação e direção das principais ocorrências das estruturas geológicas bem como prováveis estruturas de retenção de carga d'água nas rochas cristalina paraibano.

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Identificações de áreas propícias à pesquisa de água subterrânea no cristalino, nas micros regiões circunvizinhas da cidade de Campina Grande - PB e a relação hidrodinâmica das fraturas

1.3 OBJETIVOS GERAIS

A presente dissertação tem como objetivo:

- ✓ Realizar um levantamento sobre as fraturas das rochas cristalinas e classificá-las segundo a sua natureza dinâmica.
- ✓ Mapear e cadastrar todos os poços existentes de água nas rochas cristalinas dos municípios de Campina Grande e vizinhas.
- ✓ Fazer levantamento geológico em relação a litologia, tipos e natureza das fraturas nos locais dos poços de água.
- ✓ Caracterizar as fraturas propícias ao armazenamento de água subterrânea.
- ✓ Analisar a possibilidade de retenção de água subterrânea nestas estruturas geológicas.

1.4 JUSTIFICATIVA

O armazenamento e a exploração de água subterrânea nas rochas cristalinas enfrentam dificuldades devido à complexidade nas propriedades hidrológicas das rochas ígneas e metamórficas. Geralmente as fraturas nestas rochas proporcionam permeabilidade e porosidade necessárias para que estas se tornem aquíferos. É complicado prever essas propriedades e a presença de água subterrânea nas rochas cristalinas. Por esta razão a pesquisa busca uma proposta de elucidar a natureza das fraturas e as condições que governam a hidrodinâmica nas rochas cristalinas, para que os dados possam ser utilizados e possam contribuir para uma maior eficiência na localização de poços tubulares nestas rochas.

1.5 METODOLOGIA APLICADA

Toda metodologia foi criada e desenvolvida pelos integrantes deste trabalho, com inferência ao Dr. Tumkur Rajarão Gopinath (orientador) e Cloves Rogério da Silva Costa (mestrando).

1.5.1 LOCALIZAÇÃO

A pesquisa envolveu uma área de aproximadamente 25 Km de raio tendo como ponto central à cidade de Campina Grande – Estado Paraíba, Brasil e polo a UFPB (Universidade Federal da Paraíba – Campus II) localizada a 140 km da capital João Pessoa (Fig. 1.2).

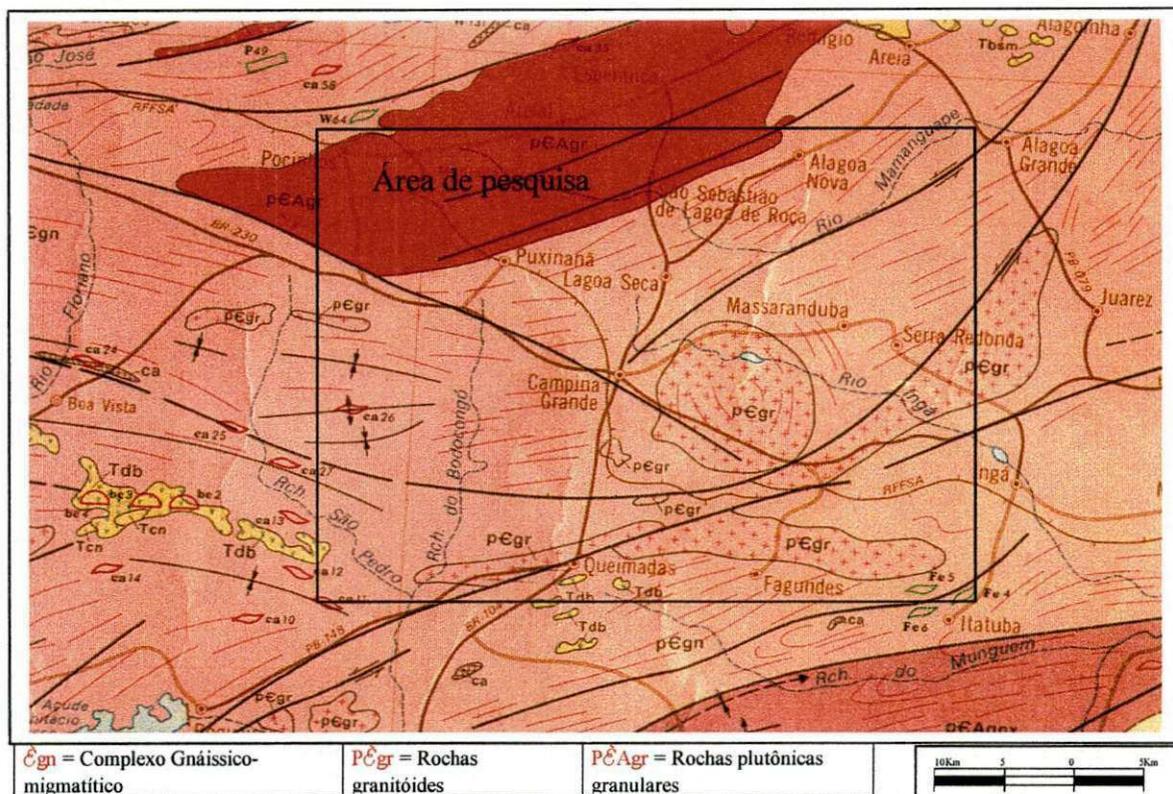


Figura 1.2 - Mapa de localização de Campina Grande com área pesquisada

1.5.2 INTERPRETAÇÃO E ELABORAÇÃO DE MAPAS A PARTIR DE AEROFOTOGRAFIA DE SATÉLITE

A área de estudo foi estudada e interpretada por imagens de satélite LANDSAT da região em Escala de 1:2.500.000 (cópias originais) oferecidas pelo laboratório de fotointerpretação da Universidade Federal da Paraíba Campus II, do Departamento de Mineração e Geologia com fim de identificar objetos e determinar seus significados e usá-los em combinação com o levantamento de campo (Fig. 1.3).

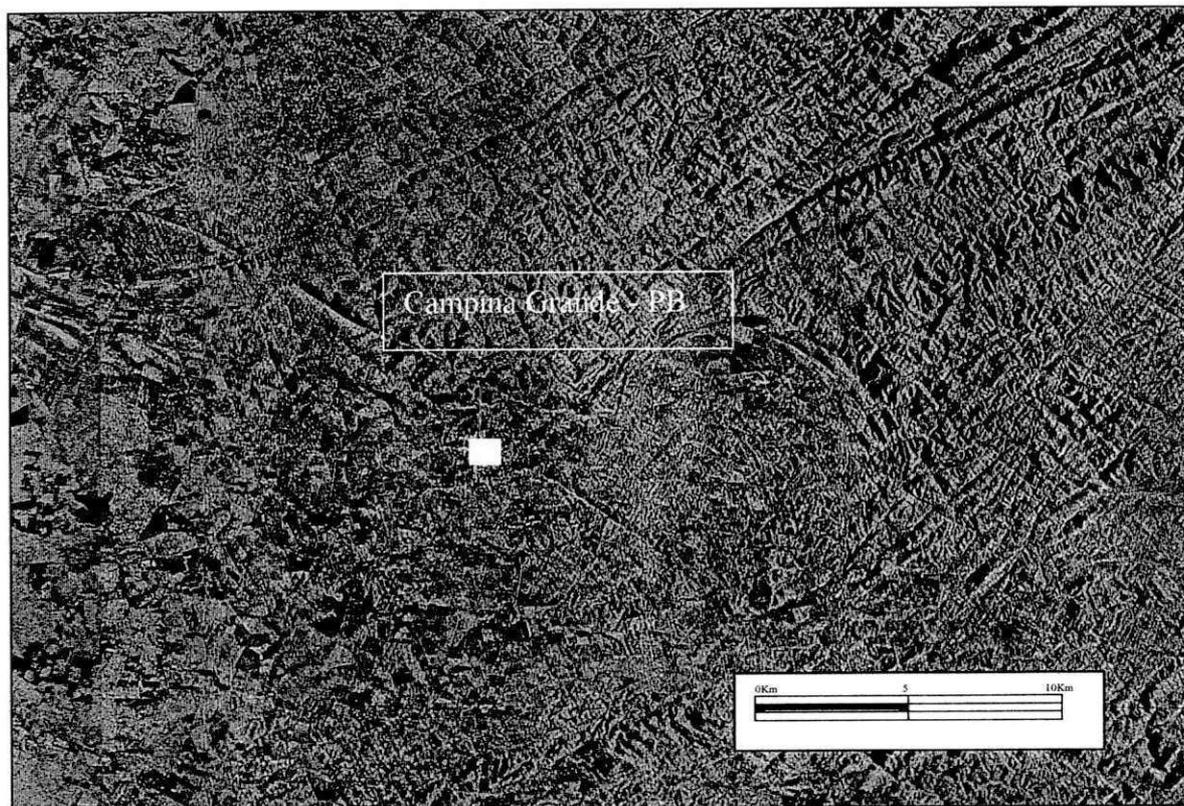


Figura 1.3 - Imagem de radar da região de Campina Grande - PB

Foram utilizadas várias técnicas de identificação das estruturas tectônicas (fraturas, falhas etc.) da região como tonalidade, forma, densidade, declividade, textura, tamanho, sombra etc.

Este trabalho teve por fim a confecção de um mapa de toda estrutura tectônica da região de Campina Grande (Fig. 1.4).

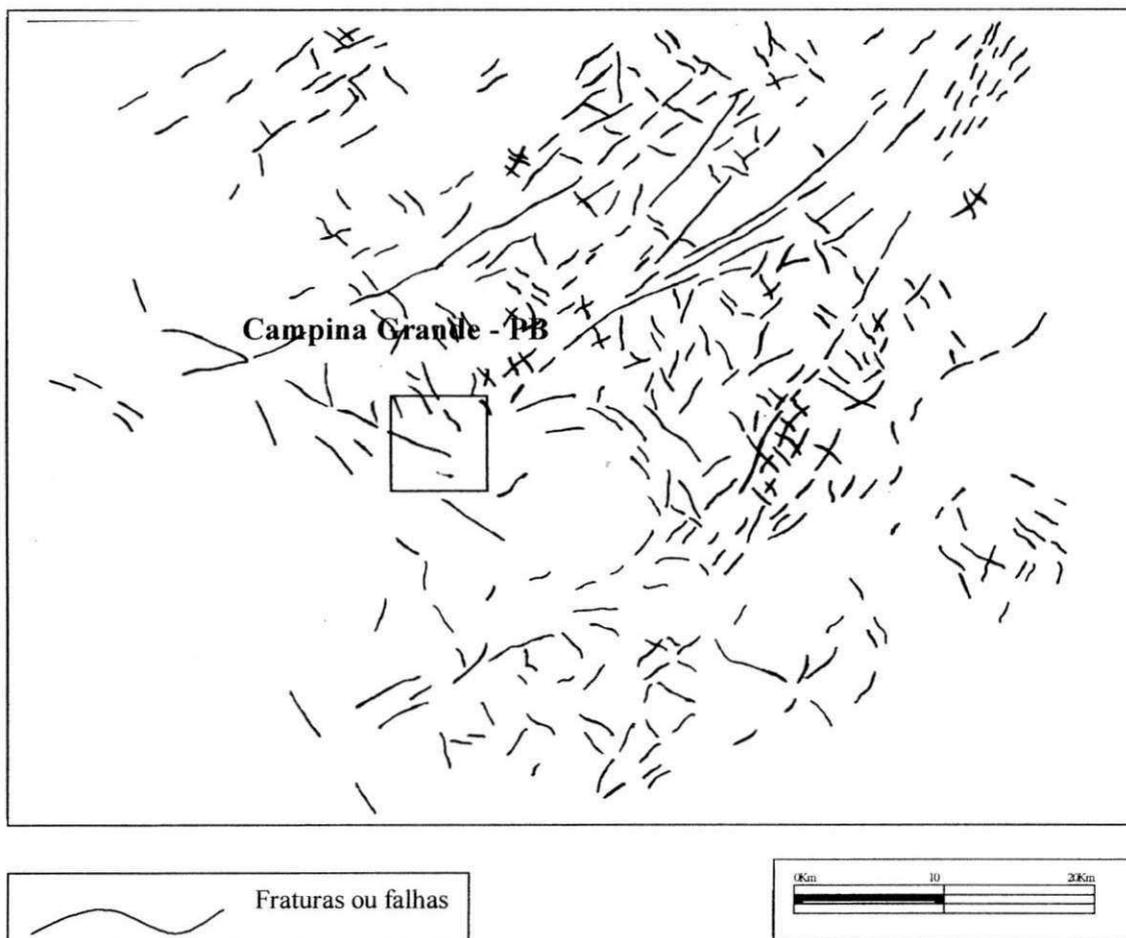


Figura 1.4 - Mapa de foto interpretação das fraturas da região de Campina Grande -PB

1.5.3 VERIFICAÇÃO E MEDIÇÕES DAS FRATURAS NO CAMPO

A verificação e medidas das fraturas no campo foram feitas através de afloramentos encontrados nas estradas e rodagens ao longo de todas as direções da região.

Para as medições foram utilizados mapas geológicos e rodoviários, bússola geológica, e instrumento GPS (Geographic Positioning System). Com as bússolas geológicas determinou-se a direção (azimute) das fraturas, direção e ângulo de mergulho.

Com o GPS determinou-se às coordenadas geográficas de cada afloramento estudado em total de 35 afloramentos, com mais de 210 fraturas coletadas.

Locação de poços artesianos no campo encontrados durante o trabalho de campo através do GPS e confecção de mapas e tabelas auxiliares durante a coleta de dados.

1.5.4 CONFECÇÃO DE MAPAS DE FRATURAS

A confecção dos mapas de fraturas foi desenvolvida pelas coordenadas obtidas pelo equipamento GPS, e com posse das coordenadas do afloramento, foram traçadas todas as fraturas encontradas no campo em cada coordenada de afloramento pesquisado.

1.5.5 LOCALIZAÇÃO DE FRATURAS E POÇOS NO MAPA

A localização de poços no mapa se deu através de dados fornecidos pela CDRM - PB (Companhia de Desenvolvimento dos Recursos Minerais da Paraíba).

Foram plotados em mapas todas as fraturas coletadas no campo, juntamente com os respectivos poços com o intuito de realizar uma relação entre as fraturas e poços.

1.5.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O estudo da geoestatística aplicada foi executado por meio de programa computacional denominado "Stereo Net" tendo como objetivo determinar as principais direções de fraturamento da região de Campina Grande, fraturas mais freqüentes e planos de fraturamento.

1.6 CONHECIMENTO DO PROBLEMA

1.6.1 ÁGUA NO PLANETA TERRA

Embora as águas ocupem cerca de 71% da superfície do planeta, muitas pessoas desconhecem a realidade preocupante de uma possível crise de água potável. Esse recurso natural, indispensável à vida pode tornar-se uma mercadoria tão cara quanto o petróleo e será objeto de disputa no terceiro milênio. Se a tecnologia de perfuração de poços alcançar lençóis subterrâneos profundos (acima de 1000m) sem maior risco de insucesso e a preço mais baixo, haverá uma revolução tecnológica na área de sondagem, derrubando, conseqüentemente, qualquer previsão da crise da água potável.

Quase toda a água do planeta (97,3%) está nos oceanos (águas salgadas), 2,07% constituem geleiras e calotas polares (água doce em estado sólido), restando portando, somente a parcela de 0,63% de água doce em estado líquido que não é totalmente aproveitada por questão de inviabilidade técnica, econômica e financeira (Fig. 1.5).

doce em estado líquido que não é totalmente aproveitada por questão de inviabilidade técnica, econômica e financeira (Fig. 1.5).

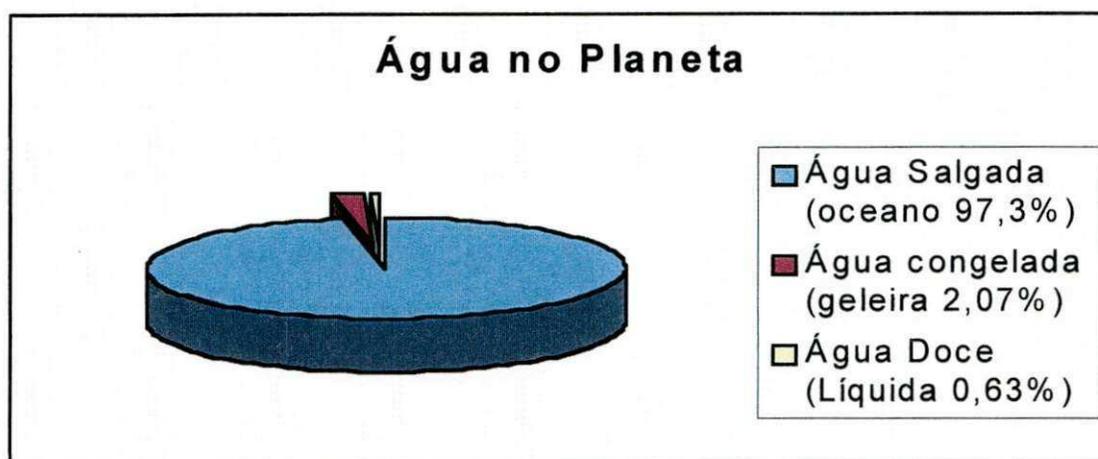


Figura 1.5 – Distribuição de água no planeta terra (Ramiro Fernandes M. Neto, 1997)

O potencial hídrico do planeta Terra é da ordem de 1,4 bilhões de km^3 , porém a parte de água doce econômica e de mais fácil aproveitamento para satisfazer às necessidades da humanidade através das diversas utilizações é de aproximadamente 14 mil Km^3/ano . A quantidade de água superficial nos continentes é da ordem de 45.664 Km^3/ano (Falkenmark, M. & Widstrand, C. 1992).

O potencial hídrico subterrâneo é 100 vezes maior que a potencialidade dos rios e lagos, geralmente de boa qualidade natural, porém constituindo uma atividade de risco que exige tecnologia avançada de investigação hidrogeológica e perfuração de poços com altíssimo custo de exploração para captação das águas subterrâneas profundas situadas em lençóis superiores a 1.000m de profundidade.

Na escala mundial, a demanda hídrica estava avaliada em 4 mil Km³/ano e, em 1996, eram aproveitados cerca de 3,7 mil Km³/ano, o que representa um déficit de água para atender as necessidades sociais econômicas de cerca de 5,7 bilhões de habitantes do planeta Terra. Até o ano 2000, a demanda hídrica deverá crescer para um valor superior a seis mil Km³/ano. Portanto, o balanço hídrico ainda tem um saldo positivo em relação ao potencial mais econômico e de mais fácil aproveitamento. Esse potencial para os padrões médios mundiais de múltiplo consumo no ano 2000 que poderá abastecer 14 bilhões de pessoas, dando-se o esgotamento de potencialidade referenciada por volta do ano 2.0053, considerando um crescimento populacional á razão geométrica de 1,6 % ao ano manutenção das taxas unitárias de consumo. Manter essa taxa de crescimento populacional até o ano 2089 sem ampliar a disponibilidade citada significa adotar uma dieta saudável do consumo d'água (1.5351 hab./dia), o que permitiria beneficiar 25 milhões de habitantes considerando as necessidades de água para irrigação, abastecimento doméstico e uso industrial. Isto não significa dizer que a água vai acabar e sim haverá restrições de quantidade ou qualidade em áreas localizadas de certas bacias hidrográficas em razão desigual da distribuição de água no tempo e no espaço geográfico territorial e na grandeza das demandas e poluição dos mananciais (Revista Veja, 03/96 e 06/1997).

A realidade é que as disponibilidades hídricas precisam ser ampliadas e, para tanto são necessários investimentos em pesquisas e desenvolvimento tecnológico para exploração viável e racional dos recursos hídricos. Por isso é fundamental o monitoramento das águas para controlar a qualidade e a quantidade necessária aos padrões de usos tais como doméstico (abastecimento humano e animal); industrial (produção de

alimentos); hidroeletricidade (geração de energia); piscicultura (criação de peixes); saneamento básico (proteção à saúde pública) etc.

Gerenciar os recursos hídricos não é proibir o uso, e sim dispor de instrumentos para minimizar eventuais conflitos que estão previstos para se agravar no decorrer do terceiro milênio.

1.6.2 A CRISE DA ÁGUA NO TERCEIRO MILÊNIO

Os problemas decorrentes das deficiências de saneamento básico já são bem visíveis, bastando observar as seguintes estatísticas nos países pobres e em desenvolvimento.

A pobreza combinada com os baixos índices de saneamento básico é responsável pela morte de uma criança a cada 10 segundos. Hoje, morrem 10 milhões de pessoas/ano por causa de doenças que seriam evitadas se a água fosse tratada.

Vinte e cinco por cento da população dos países em desenvolvimento não tem acesso à água potável e muito menos à rede de esgoto.

Oitenta por cento das doenças e 335 das mortes são decorrentes da crise de água potável.

Sessenta e cinco por cento das internações hospitalares e 80% das consultas médicas são motivados por veiculação hídrica.

Nos países em desenvolvimento (áreas urbanas), 82,5% têm acesso à rede de água e 63,1% à rede de esgoto, porém 70% dos pobres não tem água tratada e 805 estão sem rede de esgoto.

Em 1996, a demanda mundial por água era de 5692 Km³/ano contra uma oferta de 3745 Km³/ano (aproveitamento do potencial viável estimado em 14.000 km³/ano). A oferta hídrica mundial só atende a cerca de 66% da demanda dos usos múltiplos.

A escassez hídrica (potencial hídrico renovável per capita entre 500m³/hab/ano e 1.000m³/hab/ano) já atinge o Kuwait, Egito, Arábia Saudita, Líbia, Barbados, Tailândia, Jordânia, Cingapura, Israel, Cabo Verde, Burundi, Argélia e Bêrgica. Essas preocupações poderão se estender ao México, Hungria, Índia, China, Estados Unidos, Etiópia, Síria e Turquia.

Segundo previsões de Ismail Serageldin (vice-presidente do BIRD), a guerra do século XXI será por água e, para evitá-la, seriam necessários 800 bilhões de dólares nos próximos 10 anos. Atualmente o banco dispõe apenas de 5% (40 bilhões de dólares) do valor referenciado.

A Organização das Nações Unidas - ONU alerta que nos próximos 25 anos, cerca de 2,8 bilhões de pessoas poderão viver em regiões de seca crônica (potencial hídrico renovável per capita de 1000 m³/hab./ano). Vários são os países que estão com suas reservas renováveis inferiores a 2000 m³/hab./ano, que é uma taxa ainda aceitável, porém é um sinal para adotar estratégias visando a adiar por mais tempo a data de uma dieta saudável (Revista Técnica e Informativa da CPRM. Ano V, Nº 9, 11/1997).

Por essa razão, a maior parte dos países desenvolvidos já adota os princípios do poluidor – pagador e usuário - pagador com forma de conservar a qualidade da água e usar racionalmente os recursos hídricos.

Eliminar os desperdícios e criar tecnologias para economizar água é uma necessidade inadiável.

No Brasil, a Lei nº 9.433 de 08.01.1997 estabelece diretrizes para a Política Nacional dos Recursos Hídricos, tendo como instrumento institucional um Sistema de Gerenciador na forma de colegiados, dos quais participam nos comitês de bacias hidrográficas a União, Estados, Municípios, Usuários e a Sociedade já colocaram nas ruas do país o *Movimento de Cidadania pelas Águas*.

1.6.3 OS DESAFIOS DO TERCEIRO MILÊNIO

- Convencer os países desenvolvidos a reduzirem o consumo de água e financiarem o desenvolvimento dos países pobres na América do Sul e África.
- Direcionar recursos financeiros para melhoria os baixos indicadores de saneamento básico (abastecimento d'água e esgotamento sanitário, coleta de lixo) nos países em desenvolvimento.
- Realizar o tratamento de águas residuais.
- Ampliar as reservas hídricas e, sobretudo, recuperar e conservar a qualidade da água mais vulnerável à contaminação.
- Viabilizar técnica e economicamente a dessalinização de águas interiores e oceânicas, a exploração das águas subterrâneas profundas e tecnologia para geração de chuva artificial.
- Desenvolver técnicas e programas de educação ambiental para conservação e reutilização da água.

• Segundo Falkenmark & Wisdstrand (1992), as limitações de quantidade dependem do grau de desenvolvimento sócio-econômico e do potencial hídrico per capita renovável na bacia hidrográfica, sendo referências adversos de quantidade os seguintes indicadores de renovação hídrica:

- ✓ Alerta de escassez hídrica $1.700\text{m}^3/\text{hab./ano}$.
- ✓ Seca crônica $1000\text{ m}^3/\text{hab./ano}$
- ✓ Escassez hídrica absoluta.

Portanto, quando a escassez absoluta é alcançada o potencial de água é insuficiente para atender à população mesmo em condição de dieta saudável ($560\text{m}^3/\text{hab./ano}$).

1.6.4 ÁGUA NO BRASIL

Embora o Brasil seja um, país privilegiado em recursos hídricos, com um volume armazenado de água subterrânea da ordem de 58000 Km^3 e cerca de $257.790\text{ m}^3/\text{s}$ escoando pelos rios (aproximadamente 185 do potencial de superfície do planeta), como resultado da precipitação de 1.954 mm/ano , da quais 1195mm anuais correspondem a evatranspiração e o restante à parcela do deflúvio anual (759 mm/ano) o coeficiente de escoamento superficial brasileiro é de aproximadamente 38,8% com rendimento unitário de $24,0\text{ l/s/km}^2$. Nas regiões brasileiras, as descargas específicas são as seguintes: Nordeste ($3,8\text{ l/s/km}^2$), Sudeste ($11,4\text{ l/s/km}^2$), Centro - Oeste ($14,9\text{ l/s/Km}^2$), Sul ($20,71\text{ l/s/Km}^2$) e Norte

(33,8 l/s/Km²), considerando as contribuições das águas do estrangeiro. Em nível de bacia Amazônica, a produção hídrica unitária é de 34,2 l/s/Km².

Cerca de 895 da potencialidade das águas superficiais do Brasil estão concentrados nas regiões Norte e Centro - Oeste, onde estão abrigados 14,5% dos brasileiros que precisam de 9,2% da demanda hídrica do país. Os 115 restantes do potencial hídrico de superfície estão nas outras três regiões (Nordeste, Sul e Sudeste), onde estão localizados 85,5% da população e 90,8% da demanda da água do Brasil.

As utilizações brasileiras necessitam apenas de 0,83% do potencial hídrico dos rios do país, sendo que a demanda média per capita, considerando os usos múltiplos (1.134 /hab./dia) , ainda é muita baixa em relação aos padrões de dieta saudável (1.535 /hab./dia)

A situação brasileira não é de tranquilidade absoluta devido aos riscos de crescentes conflitos de quantidade, qualidade e déficit da oferta hídrica em áreas localizadas de vários municípios brasileiros em pequenas bacias hidrográficas. Esse fato é evidenciado pela insuficiência de água tratada e saneamento básico, que motivou o crescimento da indústria de água mineral, com o engarrafamento de água potável de mesa, iniciando na década de 1960 com uma produção de 72 milhões de litros anuais e hoje tem sinalização para virar o século com marca próxima a dois bilhões de litros/ano (DNPM/ABINAM. 1996).

Trata-se de uma água cara, considerando-se que a maioria da população brasileira não tem poder aquisitivo para compra.

O desafio brasileiro será minimizar desperdício de água estimado em 40% e representando prejuízo de cerca de R\$um bilhão por ano, além de ter que investir bilhões de dólares para recuperar a qualidade ambiental e das águas de muitos cursos d'água, tais como: Baía

de Guanabara (RJ), Rio Tietê (SP), Guaíba (RS), Doce (MG), e Paraíba do Sul (SP/MG/RJ) e principais Iguapés de Manaus dentre outros. Não menos importante será aumentar a disponibilidade hídrica artificial do nordeste e o transporte dessa água para beneficiar a população nordestina, pois a escassez hídrica subterrânea e superficial é um fato, considerando que a potencialidade das bacias hidrográficas da região tem vazão unitária estimada em 3,8 l/s/km², com os seguintes rendimentos específicos por estados.

Maranhão 8,1 l/s/km², Alagoas 5,0 l/s/km², Sergipe 3,7 l/s/km², Ceará 3,4 l/s/km², Piauí 3,1 l/s/km², Pernambuco 3,0 l/s/km², Rio Grande do Norte 2,6 l/s/km², Paraíba 2,6 l/s/km² e Bahia 2,0 l/s/km².

Nas regiões Norte e Centro - Oeste, a maior atenção deve ser dada à qualidade das águas e ao maior aproveitamento dos recursos hídricos para promover o desenvolvimento regional sustentável.

Em nível de grandes bacias hidrográficas, há indicativos de conflitos de quantidade no decorrer do século XXI na bacia do Atlântico Sul. Trecho Leste compreendido entre as bacias do rio Japarutuba e do Rio Pardo (BA), pois o potencial hídrico renovável per capita nessa região 1.861 m³/hab/ano. Em alguns estados brasileiros, os valores estão abaixo do referencial para prevenção ou alerta de escassez hídrica, tais como: Pernambuco 1.234 m³/hab./ano, Paraíba 1.348 m³/hab./ano, Distrito Federal 1.528 m³/hab./ano, Sergipe 1.535 m³/hab./ano, Alagoas 1.579 m³/hab./ano e Rio Grande do Norte 1.593 m³/hab./ano (Revista Técnica e Informativa da CPRM. Ano V, N^o 9, 11/1997).

CAPÍTULO II

2 HIDRODINÂMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DOS AqüÍFEROS FRATURADOS

2.1 GEOLOGIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Em sistema geológico, a natureza e distribuição dos aqüíferos e aqüitards são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura das formações geológicas.

A litologia trata da composição mineral, da distribuição de tamanho dos grãos e do grau de compactação dos sedimentos ou rochas constituintes do arcabouço geológico.

A estratigrafia descreve as relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico, tais como lentes, camadas e formações de origem sedimentar. As discordâncias, por exemplo, são características estratigráficas especialmente importantes em Hidrogeologia (Freeze & Cherry, 1979). Tratam-se de descontinuidades estratigráficas ou superfícies que refletem a ocorrência de um intervalo de tempo durante o qual o processo de deposição foi interrompido, ou ainda durante o qual a superfície da rocha existente foi intemperizada, erodida ou afetada por movimento tectônico. Essas discordâncias muitas vezes apresentam-se como superfícies que separam meios de permeabilidade diferente e por isso freqüentemente estão associadas com a ocorrência de aqüíferos.

A estrutura diz respeito as características geométricas produzidas no sistema geológico por deformação após deposição ou cristalização, como é o caso das juntas, fraturas, falhas e dobras.

O conhecimento da geologia de uma região, isto é, da sua litoestratigrafia e estrutura, é o ponto de partida para a compreensão da distribuição espacial dos aquíferos e aquíferos.

2.2 ÁGUA SUBTERRÂNEA EM ROCHAS ÍGNEAS E METAMÓRFICAS

Porosidade e permeabilidade primária - amostras sólidas e não fraturadas de rochas ígneas e metamórficas possuem porosidade praticamente nulas. Os vazios intercrystalinos condicionantes da porosidade são mínimos e não interconectados. Por esta razão a permeabilidade primária dessas rochas, expressa como condutividade hidráulica, são extremamente pequenas (10^{-11} a 10^{-13} m/s). Esses valores foram estimados em amostras intactas de metasedimentos (quartzito, micaxisto, filito e grauvaca) à temperatura ambiente (Stuart et al., 1954). Medidas de condutividade hidráulica em granitos e poços sem fraturas, geralmente fornecem valores da ordem de 10^{-11} m/s, o que equivale a dizer que essas rochas podem ser consideradas como impermeáveis no contexto dos problemas de aproveitamento de água subterrânea.

Porosidade e permeabilidades secundárias - no domínio das rochas cristalinas ígneas e metamórficas em geral sempre se observa, a nível mesoscópico, significativa ocorrência de fraturas produzidas por variações nas condições de tensão verificadas durante os

vários episódios que marcaram a história geológica dessas rochas. As fraturas criam uma porosidade secundária, responsável pelo armazenamento e uma permeabilidade [m^2], que também se expressa como uma condutividade hidráulica [m/s], responsável pela circulação da água subterrânea. Em alguns casos a dissolução da sílica pode produzir aumento nas aberturas das fendas quando a água de recarga é capaz de atacar os silicatos (Tolmam, 1937; Davis, 1969). Muitas vezes, porém, a água de infiltração se enriquece em sílica na zona de cobertura eluvial antes de atingir o domínio fraturado subjacente e, quando isto acontece, ela perde a agressividade em relação aos minerais silicatados presentes nas superfícies das fraturas.

São mostrados resultados de condutividade hidráulica (m/s), permeabilidade (m^2), abertura (mm) e porosidade (%) de fraturas em rochas cristalinas do Nordeste do Brasil (Manoel Filho, 1996). As condutividades hidráulicas médias variam, em geral, na faixa de 3,8 a 5,5 cm/s , exibindo, porém valores excepcionalmente altos (1,3 m/s e 2,5 m/s). A abertura média varia entre 0,2 e 0,95 mm com valores excepcionais superiores a 2 mm. As porosidades são sistematicamente muito baixas, em todos tipos de rochas com médias situadas entre 0,0007% e 0,0071%.

Variação de permeabilidade com a profundidade – alguns estudos efetuados nos Estados Unidos sugerem que a permeabilidade média das rochas ígneas e metamórficas decresce rapidamente com a profundidade (Davis & Turk, 1964; Digman et al., 1954; Gregory & Ellis, 1909; LeGrand, 1954; 1962). Os resultados de estudos efetuados por LeGrand (1954) numa área de rochas cristalinas (granitos, gabro, gnaisse e micaxisto) na Carolina do Norte, sugerem que existe um decrescimento da produtividade de poços com o aumento da espessura

estática saturada (Fig. 3.5). Freeze & Cherry (1979) interpretam os resultados obtidos por LeGrand (op. cit.) como uma expressão quantitativa da tendência que os perfuradores de poços observam de modo mais qualitativo em muitas regiões de rochas cristalinas. A correlação sugerida pela Figura 2.1 entre a profundidade média dos poços e a produtividade média (coeficiente de correlação $R=0,898$) parece significativa.

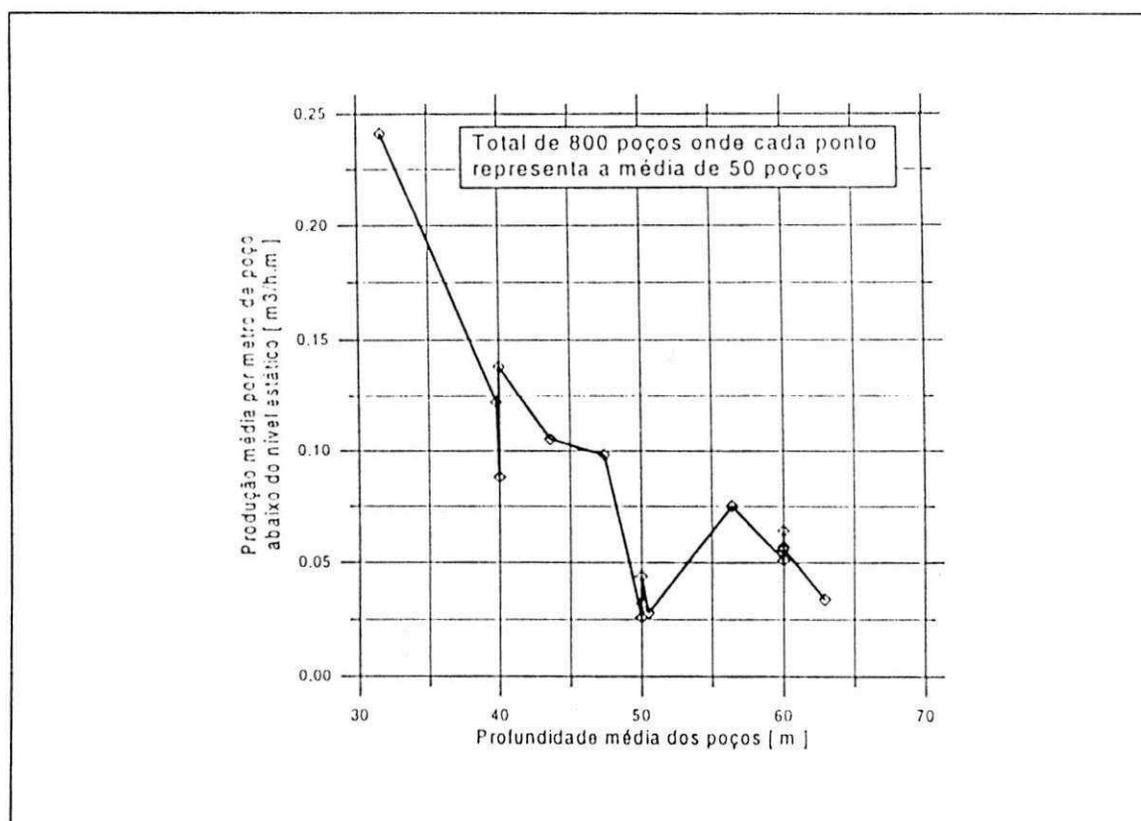


Figura 2.1 Decréscimo na produção média de poços (m^2/h por metro de poço abaixo do nível estático) com profundidade média em rocha cristalina na área Statesville, Carolina do Norte. Os números próximos aos pontos indicam o número de poços usados para obter os valores médios que definem a curva (dados de Legrand, 1954; Davis & De Wiest, 1966).

Usando uma amostra de 800 poços perfurados em rochas cristalinas no estado do Rio Grande do Norte e da Paraíba, com profundidades variáveis de 20 a 70m, foram calculados os valores médios de profundidade e produtividade, em 16 subconjuntos de 50 poços. Os

resultados (Fig. 2.2) não apresentam a regularidade sugerida pela curva de LeGrand. Eles refletem a tendência de crescimento da produtividade, de maneira bem menos significativa ($R=0,704$). Vale notar que três subconjuntos de 50 poços exibem produtividades diferentes para a mesma profundidade média de 40m, assim como para profundidade médias de 50 e 60m.

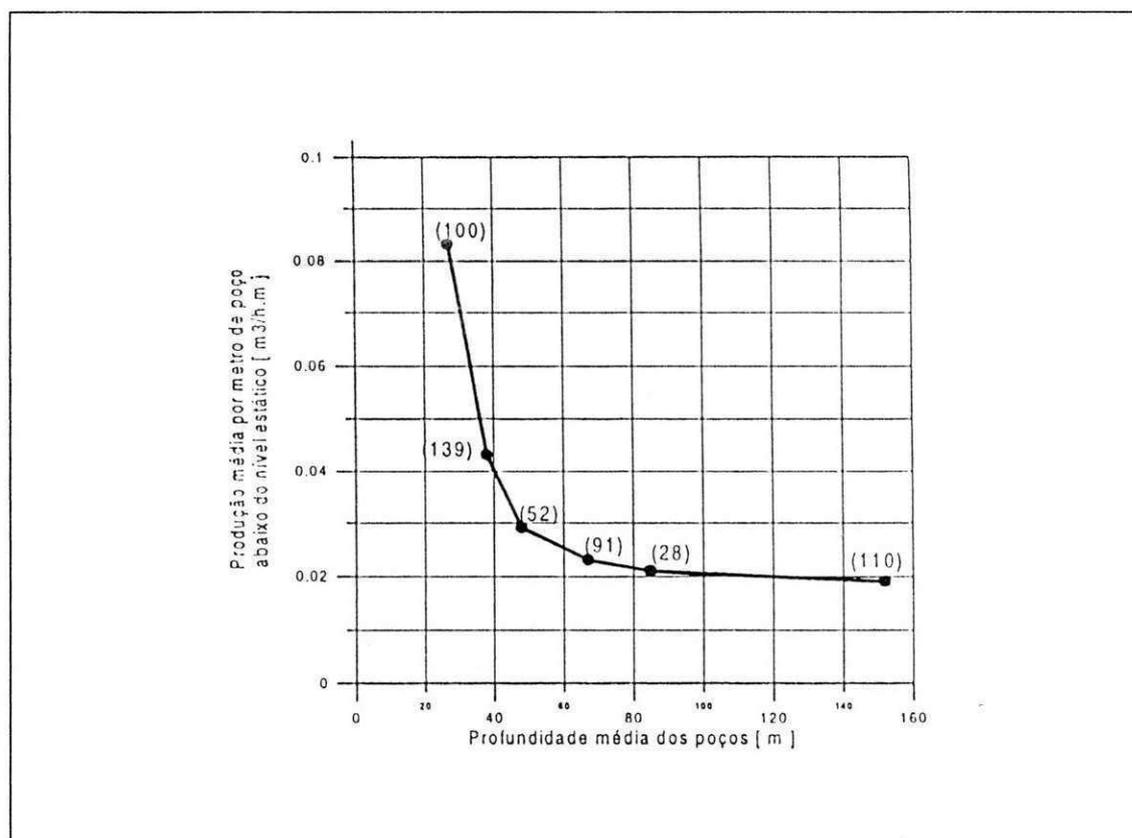


Figura 2.2 – Decrescimento da produção média do poço (m^3/h por metro de espessura abaixo do nível estático) em profundidade média dos poços no cristalino dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (dados de Costa, 1966; Manoel Filho, 1996).

O cristalino da região semi-árida – nas regiões semi-áridas, como por exemplo, o Nordeste do Brasil, com cerca de 500.000 Km^2 ocupado por rochas cristalinas, o aproveitamento de água subterrânea dessas rochas sempre foi uma alternativa que se levou em consideração, notadamente em virtude da carência de outros recursos hídricos. A

produção média de poços é da ordem de $3\text{m}^3/\text{h}$, com média de $2\text{m}^2/\text{h}$. O manto de cobertura indiferenciada (alúvios, elúvios e colúvios) tem espessura média da ordem de 5m com valor mediano da ordem de 4m. As águas apresentam qualidade medíocre, com média de sólidos totais dissolvidos da ordem de 3000 mg/L e mediana de apenas 1500 mg/L (Manoel Filho, 1996). No período de estiagem prolongada, essa água é, muitas vezes, a única alternativa com que quase pode-se contar para a sobrevivência dos rebanhos. O mesmo acontece com grandes regiões da África, Índia, Austrália e Sibéria, conforme indicam muitos dos estudos hidrogeológicos regionais, que tem contribuído para melhor entendimento das propriedades hidrogeológicas do cristalino (Biscaldi, 1968; IAH, 1975; Wright & Burges, 1992).

O cristalino das regiões úmidas – em regiões úmidas, que se caracterizam por uma relativa abundância de água, quase sempre se dispensou o uso da água subterrânea das rochas cristalinas. Nos últimos 20 anos, porém, ocorreram grandes progressos na hidrogeologia do cristalino de regiões temperadas por conta do crescimento da demanda em muitas áreas e devido ao aprimoramento da tecnologia de perfuração, que tornou bastante fácil e pouco oneroso a construção de poços de pequeno diâmetro para captação d água em rochas cristalina (Karrenberg, 1981; Krasny; 1990), principalmente para pequenos abastecimentos, a nível individual. Nas zonas úmidas, uma das características mais importante da água subterrânea, reside na possibilidade de seu uso para os mais diversos fins, já que a qualidade físico-química costuma ser excelente.

Do ponto de vista da ocorrência de água subterrânea, por conta da pluviosidade mais abundante e da sua melhor distribuição no tempo, o domínio das rochas cristalinas é geralmente recoberto por um

manto de intemperismo ou coberto eluvial. No sudeste do Brasil, a espessura média da cobertura eluvial é da ordem de 40m, com valor mediano de 30m (Manoel Filho, op.cit.). Esse manto e a zona fraturada subjacente formam o que se pode denominar de aquífero livre, cujo nível de saturação ora se encontra no elúvio, ora no meio fraturado subjacente. Esse nível costuma ser pouco profundo e a sua recarga é assegurada pelos excessos de água de chuvas. A magnitude dessa recarga (que se realiza por infiltrações a partir do solo) depende, entre outros fatores, da natureza do solo e do tempo de permanência dos excedentes do balanço hídrico. Esse tempo, por sua vez, depende da declividade do solo, da cobertura vegetal etc. Na verdade, são inúmeros os fatores ambientais passíveis de influir nesse processo.

2.3 HIDROGEOLOGIA DOS AQUÍFEROS FRATURADOS

A hidrogeologia dos aquíferos fraturados tem sua principal aplicação no domínio das rochas ígneas e metamórficas, genericamente designadas como cristalinas. Nesse domínio a matriz do maciço rochoso é caracterizada pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha. Na matriz, a água encontra-se em espaço intergranulares na rocha. Nesse meio, a água encontra-se em espaços representados por fraturas ou fraturas, juntas ou ainda em falhas e, em casos particulares, em vesículas, aberturas de dissolução, zonas de decomposição, dentre outros.

As rochas metamórficas de composição calcíferas tais como o mármore, são dotadas de uma feição particular, que é o elevado grau de dissolução. Em vista dessa vulnerabilidade ao ataque químico, essas rochas possuem, em geral, extensas e irregulares zonas de aberturas, tais como sumidores, cavernas, dolinas etc., que em conjunto, recebem a

designação de erosão cárstica. O aquífero é, portanto do tipo cárstico-fraturado, devendo receber um tratamento particular.

As rochas vulcânicas oriundas de derrames vulcânicos também merecem um tratamento específico, devido às feições particulares que apresentam, tais como: camadas detriticas interestratificadas aos derrames, vesículos oriundos de bolhas de ar durante o resfriamento do magma, *traps* de gás ou petróleo, zonas de maior alteração etc.

2.4 ANÁLISE DE FRATURA ELEMENTAR

Uma fratura representa o resultado de uma deformação ruptural sofrida por uma rocha, quando submetida a esforços tencionais de naturezas diversas. A ruptura sem deslocamento dos blocos afetados é denominada de fissura, fratura, fenda, junta ou diaclase, enquanto que a deformação ruptural que acarreta deslocamento de um ou dois blocos é designado por falha ou paráclase.

Para o estudo de uma fratura elementar devem ser considerados os seguintes elementos, que exercem uma grande importância nas características hidrodinâmicas (Fig. 2.3).

- ✓ Abertura (a)
- ✓ Rugosidade das paredes (R)
- ✓ Material de preenchimento

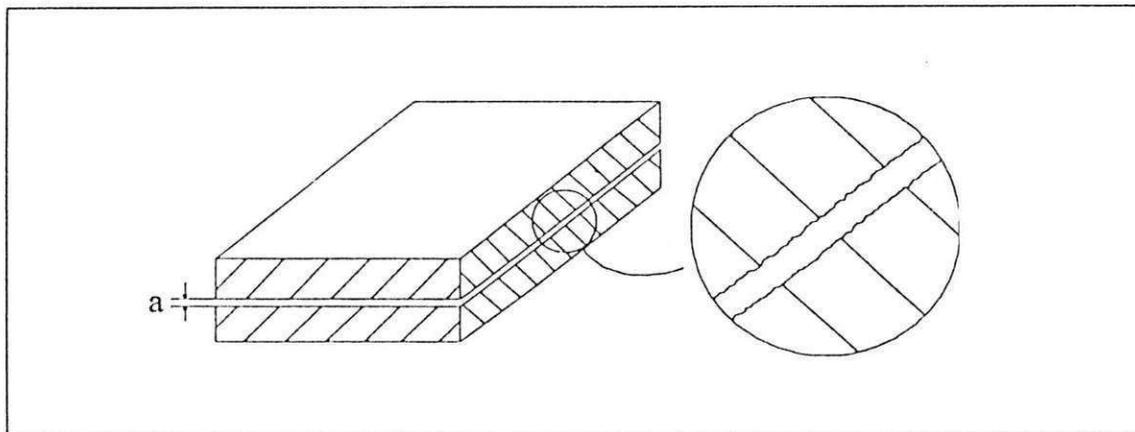


Figura 2.3 – Bloco rochoso contendo uma fratura elementar. O afastamento entre os blocos constitui a abertura (a) da fratura. Ao lado, uma ampliação das fratura, mostrando a rugosidade (R) das duas paredes (Costa, W. D 1986).

Abertura (a) – abertura de uma fratura é definido a como a medida de separação média entre as paredes rochosas ao longo plano de quebramento.

Esse parâmetro é de fundamental importância para a problemática de infiltração e armazenamento de água.

A textura influi de vários modos. As rochas de textura granular grosseira são menos resistentes que as de texturas granular fina, em virtude da predominância nas primeiras, dos planos de fraqueza representada pela superfície de clivagem dos minerais (como o feldspato). Por essa razão, os pegmatitos e granitos porfiroblásticos (microgranitos) são mais quebradiços do que os granitos de granulação fina. Por outro lado, as rochas de textura granulares são mais resistentes do que as rochas de textura lepidoblástica (com abundância de minerais lamelares, como as micas).

Rugosidades das paredes (R) – rugosidade é definida como a distância entre duas linhas paralelas à linha média e que tangencial a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda (Fig. 2.4).

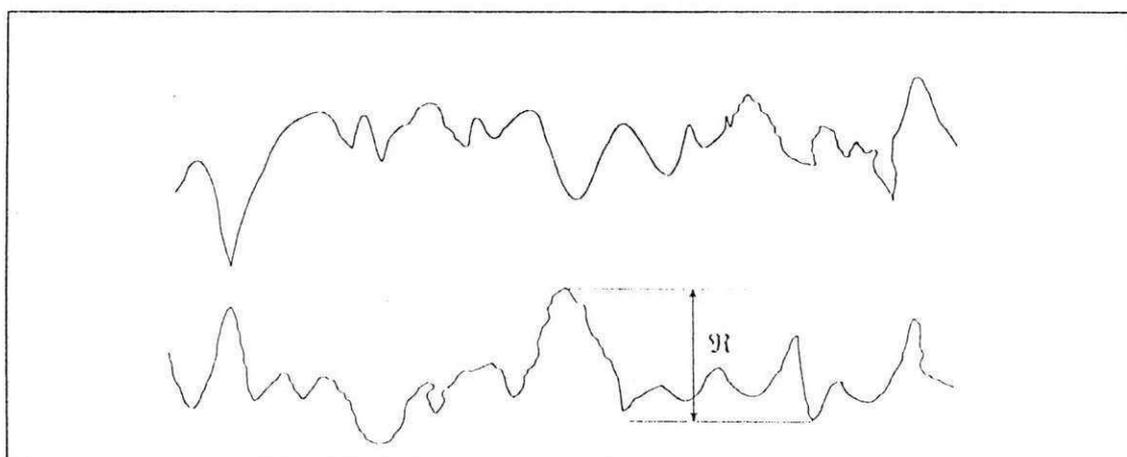


Figura 2.4 – Exemplo de microrrugosidade numa fratura polida em granito compacto, com 500 vezes de aumento, medido por meio de rugosímetro. R é da ordem de 30 microns (Quadros, E. F. 1997, 1982).

Material de preenchimento – as fraturas podem estar total ou parcialmente preenchida por material autóctone ou alóctone (Costa, op. cit.) a origem do material pode esta ligada a:

✓ Fragmento da própria rocha fraturada (material autóctone), em geral nas fraturas de cisalhamento ou zonas de falhas provocadas por compressão (Fig. 2.5 – a).

✓ Detritos de origem superficial, que penetram em meio aquoso, de elevada turbidez, decantando no interior das fraturas (Fig. 2.5 – b).

✓ Recristalização dos sais que precipitam em solução, em função da evaporação do meio líquido que os transportam. Esse processo pode produzir uma cimentação da fratura ou mesmo uma eflorescência (Fig. 2.5 – c).

✓ Ascensão de soluções hidrotermais mineralizantes, solidificando em formas de cristais ou amorfa, quando a temperatura cai sensivelmente próxima à superfície (Fig. 2.5–d).

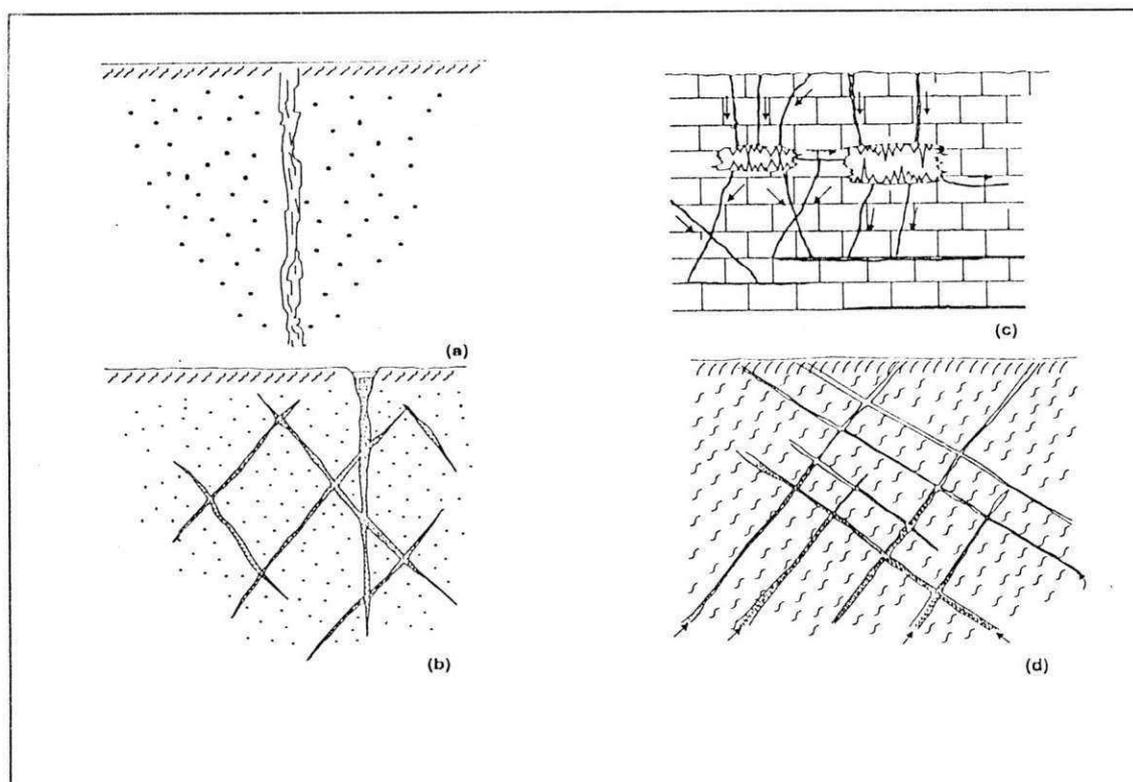


Figura 2.5 – preenchimento de fraturas: (a) o material preenchido provém da própria rocha; (b) o material infiltra-se em meio aquoso superficial decantando dentro da fratura; (c) o material entra em solução a partir da superfície; (d) em solução hidrotermal (Costa, W. D. 1972).

2.5 CARACTERÍSTICAS DO MEIO

Continuidade, homogeneidade e isotropia – um meio hidraulicamente contínuo caracteriza-se pela inexistência de interrupções das características hidrodinâmicas em qualquer direção, ou seja, não possui descontinuidades.

A homogeneidade e a isotropia são características relacionadas à condutividade hidráulica. Se a conectividade hidráulica não varia de um ponto para outro de um material, ele é dito homogêneo e se ele não varia para cada ponto, qualquer que seja a direção considerada, o material é considerado como isotrópico.

Fatores que influem nas características hidrodinâmicas do aquífero fraturado – a condutividade hidráulica (ou permeabilidade) e o escoamento de um aquífero fraturado, dependem dos seguintes fatores:

- ✓ Amplitude da fraturas (l);
- ✓ Aberturas das fraturas (a);
- ✓ Forma e rugosidade das paredes das fraturas (R).
- ✓ Freqüência ou espalhamento das fraturas (bf);
- ✓ Número de família ou sistemas de fraturas (n);
- ✓ Orientação e posição das fraturas (direção e mergulho);
- ✓ Porosidade e permeabilidade da matriz rochosa;
- ✓ Propriedade do material que preenche as fraturas;
- ✓ Distribuição da amplitude da fratura no sistema;
- ✓ Distribuição da amplitude da fratura no sistema que determina a heterogeneidade e anisotropia (Fig. 2.6).

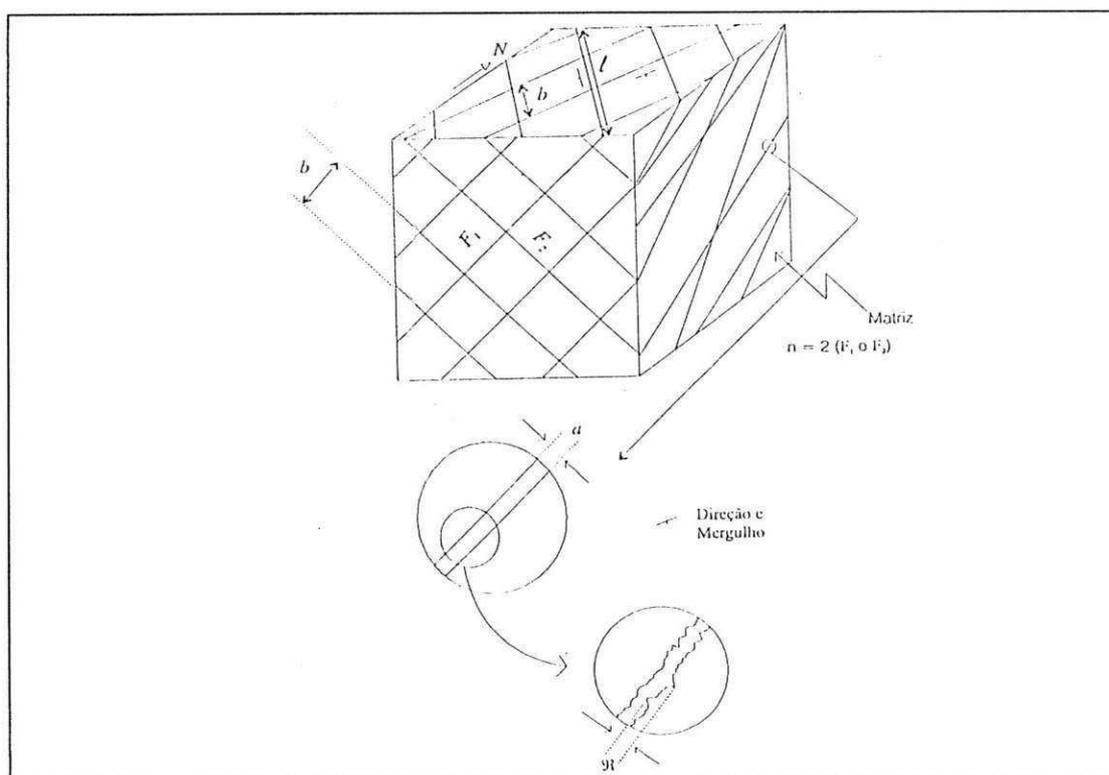


Figura 2.6 – Elementos do aquífero fraturado (Costa, W. D. 1986, 1985).

2.6 FATORES QUE ATUAM NA CAPACIDADE DOS AQÜÍFEROS FRATURADOS E NA QUALIDADE DA ÁGUA

Os fatores que atuam no mecanismo de infiltração, percolação e armazenamento da água em rochas fraturadas e, conseqüentemente, na capacidade do aquífero fraturado, exercendo ainda alguns deles, influência na qualidade da água, podem ser caracterizados em dois grupos:

- ✓ Fatores exógenos
- ✓ Fatores endógenos

O primeiro grupo diz respeito aos condicionantes relacionados aos agentes atuantes na superfície externa do globo terrestre, tais como o clima da região, o relevo, a hidrografia, a vegetação, a infiltração de solução e o intemperismo.

O segundo grupo diz respeito aos agentes que atuam no interior do globo, representados pela crosta terrestre, tal como: estruturas apresentadas pelas rochas em função dos esforços atuantes na crosta terrestre.

Na Tabela 2.1 são relacionados os fatores exógenos e endógenos e suas influências na qualidade e quantidade de água armazenada.

Tabela 2.1 - Fatores que influenciam na água subterrânea em rocha cristalina (Costa, W. D. 1986).

	Fatores	Influência	
		Qualidade	Quantidade
Exógenos	Clima	Elevada	Moderada
	Relevo	moderada	Elevada
	Hidrografia	Moderada	Moderada
	Vegetação	Baixa	Moderada
	Infiltração de solução	Baixa	Moderada
	Cobertura sedimentar	moderada	elevada
Endógenos	Constituição litológica	Moderada	Baixa
	Estruturas	Moderada	Elevada
	Soluções mineralizantes	Baixa	Moderada

2.6.1 EFEITOS DOS FATORES EXÓGENOS

Clima – o clima exerce sua principal influência no problema da qualidade da água. Em região de elevada pluviosidade, os sais solúveis são lixiviados resultando em baixo teor de salinidade das águas subterrâneas.

Ex. Na bacia do Rio Monteiro/PB, a média de resíduo seco em 25 análises de água de poços em granitos e gnáissicos, foi de 2.400 mg/L, enquanto na bacia do Rio Boa Vista/PB, a média em igual número de poços, atingiu o elevado teor de 11.027mg/L, na localidade Palestina (Soledade/PB), o teor atingiu 42.800mg/L (mais elevado do que a água do mar).

Quanto à influência na capacidade dos aquíferos diz respeito a processo de decomposição química da rocha e conseqüentemente formação de um manto de intemperismo. Em clima chuvoso e de elevada umidade, o intemperismo dominante é o químico, porém em climas áridos ou semi-áridos predomina o intemperismo físico.

Relevo – a configuração do relevo é de grande importância para capacidade ou volumes de água produzidos no cristalino. Os trabalhos mais interessantes são de o de Legrand (1959) nas áreas de Carolina do Norte, Pittsylvania e Halifax, incluindo 490 poços na primeira e 282 nas duas últimas, e de Sever (1964) que realizou um tratamento estatístico em 50 poços perfurados em Dawson, Georgia, EUA. Dessa análise conclui-se que, independentemente do tipo de rocha, a pior situação é no topo de uma elevação (colinas, monte etc.) e secundariamente, nos flancos ou vertentes da elevação, ao contrário, a melhor situação morfológica, situa-se nas depressões de bacias, secundada por áreas de planície (Fig. 2.7)

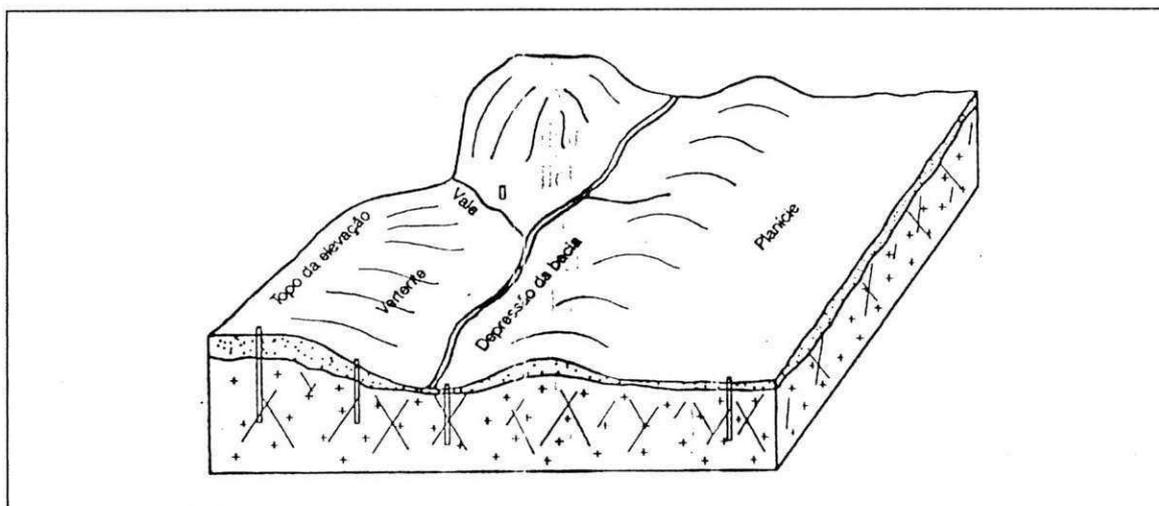


Figura 2.7 - Diferentes situações de relevo na localização de poços (Sever, C. W. 1964).

Quanto a sua influência para a qualidade da água, não existem dados estatísticos completos, relacionando a qualidade da água obtida em poços perfurados em diversas situações topográficas. Entretanto a prática tem demonstrado, como também no Nordeste semi-árido do Brasil, que os poços localizados no vales dos rios principais tendem a possuir maior salinidade do que nos rios menores ou riachos tributários.

Hidrografia – no início da década de 1960, quando surgiram no Brasil as primeiras pesquisas hidrogeológicas, nasceu um conceito utilizado na locação de poços, que foi o de “riacho-fenda” (Siqueira, 1963).

O riacho-fenda corresponde a uma situação onde ocorre a coincidência da drenagem superficial com zonas de fraturas do embasamento rochoso (Fig. 2.8).

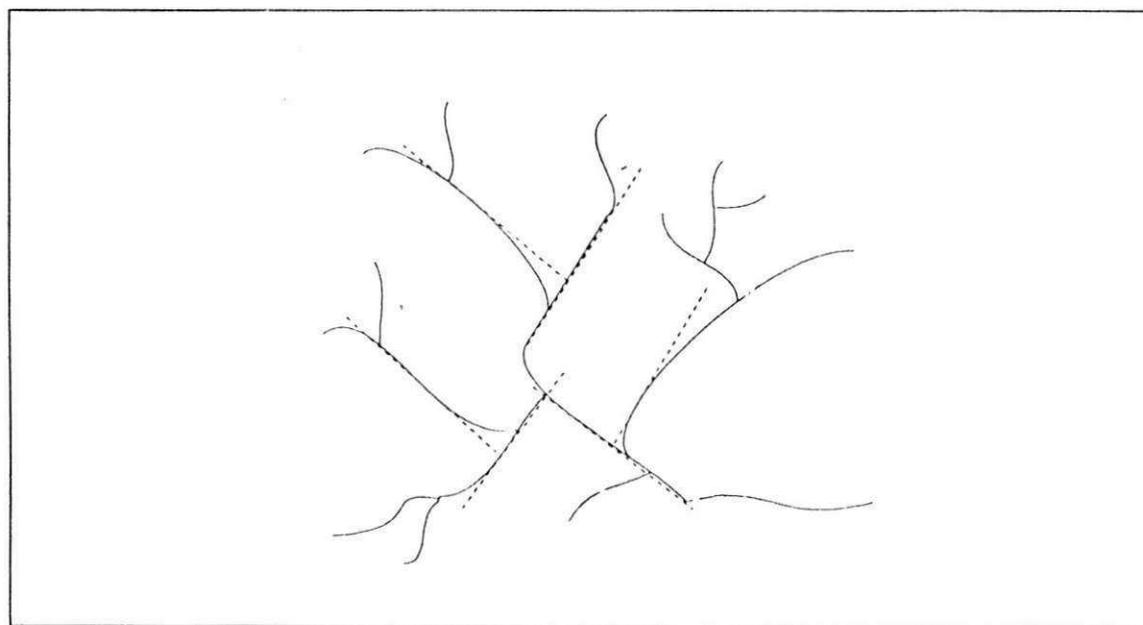


Figura 2.8 - Riacho-Venda: associação da hidrografia com geologia (Siqueira, L. 1963).

A influência da hidrografia na qualidade da água é bastante relativa, pois depende da qualidade da água superficial.

Vegetação – a vegetação é um excelente fator de fixação das camadas superficiais do solo, prevenindo o início de picos erosivos, pois na medida que dificulta o escoamento superficial, propicia condições de maior infiltração.

Na qualidade, a influência da vegetação é excelente, pois somente em alguns casos, como em região encharcada e ambiente redutor, a vegetação pode acarretar má qualidade à água, pelo excesso de matéria prima.

Infiltração de Soluções e Detritos – As soluções com elevada concentração de sílica, associada ou não a ferro, podem produzir a cimentação total ou parcial das fraturas. Nesse caso, os reservatórios ficam definitivamente comprometidos, diminuindo ou até mesmo impermeabilizando totalmente o meio fraturado, que se transforma em aquífugo.

Se ao invés de substâncias dissolvidas, a água infiltrada carrear material detrítico, o efeito resultante poderá ser uma obstrução apenas parcial do meio fraturado, quando esses detritos forem grosseiros (fração areia), ou uma impermeabilidade quase total quando ocorrem detritos finos (fração argila).

Quanto à influência da cimentação na qualidade da água, é muito reduzida, pois apenas a cimentação carbonática provoca uma elevação da dureza da água que, em geral, não a torna imprestável para os diversos usos a que se destina.

Cobertura sedimentar – podemos considerar dois tipos de cobertura sedimentar: Alóctones e Autóctones.

Cobertura alóctone são os capeamentos procedentes de uma sedimentação de rocha subjacente ou encoberta como os depósitos de aluviões e coluviões.

Cobertura autóctone são as coberturas de material procedente de processos de intemperismo da própria rocha subjacente.

2.6.2 EFEITOS DOS FATORES ENDÓGENOS

Constituição Litológica – em 1979, no Simpósio Nacional sobre Água Subterrânea em Rochas Fraturadas, realizada na SUDENE, Costa apresentou uma análise estatística simplificada sobre os parâmetros físicos e químicos de 274 poços localizados no alto Paraíba. As vazões obtidas por tipo de rocha, na ordem decrescente, aparecem na Tabela 2.2.

Tabela. 2.2 Vazões por tipos de rocha nos poços do alto da Paraíba (Costa, 1979)

Rocha	Vazão (L/h)	Capacidade Específica (L/h/m)
Micaxisto	3.240 (28)*	738 (20)*
Gnaise	3.060 (169)*	511 (141)*
Calcário	2.700 (7)*	421 (6)*
Migmatito	2.556 (17)*	245 (15)*
Granito	1.825 (39)*	176 (29)*

(*) Entre parênteses esta represento o número de amostra.

Quanto à relação do tipo de rocha com a qualidade da água Costa chegou aos resultados (valores médios) da Tabela 2.3 a seguir.

Tabela - 2.3 Qualidade da água por tipos de rocha no alto da Paraíba (Costa, 1979)

Rocha	Resíduo seco (mg/L)
Micaxisto	4.182 (131)*
Gnaisse	4.979 (26)*
Calcário	6.079 (6)*
Migmatito	7.649 (15)*
Granito	4.677 (183)*

(*) Entre parênteses esta represento o número de amostra.

A média geral de vazão, para todos os tipos de rocha, foi de 2.873 L/h, e da vazão específica, de 460 L/h/m.

Internacionalmente podem ser citados os mesmos trabalhos de Legrand (op.cit.) e Sever (op.cit), principalmente o primeiro. As vazões médias encontradas (com números de amostras entre parênteses) são apresentadas na tab. 2.4.

Tabela - 2.4 Vazão por tipos de rocha de acordo com os diâmetros dos poços na Pittsylvania e Halifax, (Legrand, 1959).

Rocha	Vazão (L/h)	
	$\phi = 3''$	$\phi = 5''$
Micaxisto	4.980 (169)*	7.080 (87)*
Granito	3.300 (234)*	5.820 (88)*
Diorito	3.120 (69)*	7.080 (11)*
Ardósia	2.400 (19)*	9.480 (3)*
Média	3.780 (490)*	6.600 (189)*

(*) Entre parênteses esta represento o número de amostra.

O mesmo autor analisando 282 poços nas regiões de Pittsytvania e Halifax, encontrou os resultados apresentados na Tabela 2.5.

Tabela. 2.5 Vazões por tipos de rochas na Pittsytvania e Halifax, (Legrand, 1959)

Rocha	Resíduo seco (mg/L)
Gnaisses variados	3.820 (172)*
Honbleda gnaisse	3.200 (8)*
Granito gnaisse	3.200 (26)*
Micaxisto c/ granito	3.000 (20)*
Micaxisto	2.500 (34)*
Xisto verde	1.800 (14)*
Sericita-xisto/ardósia	1.600 (15)*
Média de todos os poços	3.320 (289)*

(*) Entre parênteses esta represento o número de amostra.

Solução Mineralizante – quando as fraturas atingem grandes profundidades, sobretudo em regiões de instabilidade tectônica, ficam sujeitas ao preenchimento de solutos mineralizantes a elevada temperatura. Ao se resfriarem essas soluções, ocorre à cristalização dos íons que se achavam dissolvidos, formando depósitos minerais que provocam oregelamento das fraturas.

Estrutura geológica – a análise estrutural que interessa para a Hidrogeologia, diz respeito, sobretudo ao fraturamento das

rochas, e, secundariamente, ao dobramento (fraturamento associado ao dobramento).

2.7 LOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO POÇO

2.7.1 ELEMENTOS A CONSIDERAR NA LOCAÇÃO DE POÇOS

Apesar de serem muitos os fatores que influenciam na potencialidade hídrica de rochas fraturadas, bem com na qualidade da água, nem todos devem ser levado em consideração no ato da locação.

Os principais fatores na locação e dimensionamento de poços são:

Relevo – o relevo desempenha um papel muito importante na potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos das rochas fraturadas. Assim, devem ser evitados os topos das elevações das colinas e de divisores hidrográficos (interflúvios) que proporcionam as mais baixas vazões. Também os flancos das colinas ou vertentes dos vales, sobretudo nas porções mais superiores, devem ser evitados. Finalmente, a situação mais adequada corresponde às depressões abertas e vales fluviais.

O binômio estrutura-hidrografia – desempenha o mais importante dos papéis na problemática das águas do cristalino, pois a associação da zona de fraturamento com drenagem superficial propicia as condições necessárias à infiltração e acumulação da água nas fraturas do maciço rochoso.

Há de considerar ainda a qualidade da água, quando a drenagem do rio principal for salinizada, como ocorre com muitos rios no Nordeste do Brasil, deve-se evitar local os poços nas suas proximidades, pois as águas infiltradas a partir da drenagem superficiais já salinizadas tendem a aumentar os teores de sais. Nesse caso deve-se procurar rios e riachos tributários e que não sejam salinizados.

Coberturas diversas – as coberturas diversas mais comuns são as eluviões (ou regolitos) provenientes da desintegração ou decomposição da rocha sem processo de transporte, as aluviões que são depósitos oriundos da erosão fluvial e as coluviões que são depósitos pela ação da gravidade.

A existência dessas coberturas, sobretudo quando predominantemente arenosas, constitui um excelente veículo de indireta realimentação das fraturas. Todavia impede a identificação das zonas fraturadas, o sentido e intensidade do ângulo das fraturas, e sua relação com a lineação da rocha.

Constituição litológica – a rocha quanto mais competente, menor a intensidade de fraturamento, mas em compensação, mais abertas são as fraturas nela existentes, pois será menor a influência dos planos de clivagem dos cristais mais desenvolvidos (ex. feldspato). Também a orientação dos planos de descontinuidades da rocha influi na potencialidade hídrica, pois nas rochas foliadas (ex. Micaxisto) desenvolvem-se mais planos de fraturamento do que nas não foliadas (ex. Granitos) e nas primeiras são melhores as condições quanto à orientação é planar (paragnaisses, por exemplo) do que linear (ortognaisse, por exemplo).

A granulação dos cristais também exerce influência, pois quanto maior e mais desenvolvido (como no pegmatito) mais quebradiço é a rocha, enquanto que na rocha de granulação fina (ex. Granito) a resistência à ruptura é maior.

Uma outra situação favorável é a do contato entre duas unidades petrográficas distintas, ou seja, entre um granito e um gnáisse etc.

No gráfico da (Fig. 2.9) a situação de “A” seria de acumulação de água nas diáclases longitudinais e planas de estratificação ou de clivagem; em “B” a situação é apenas regular e em “C” a situação hidrogeológica é desfavoráveis.

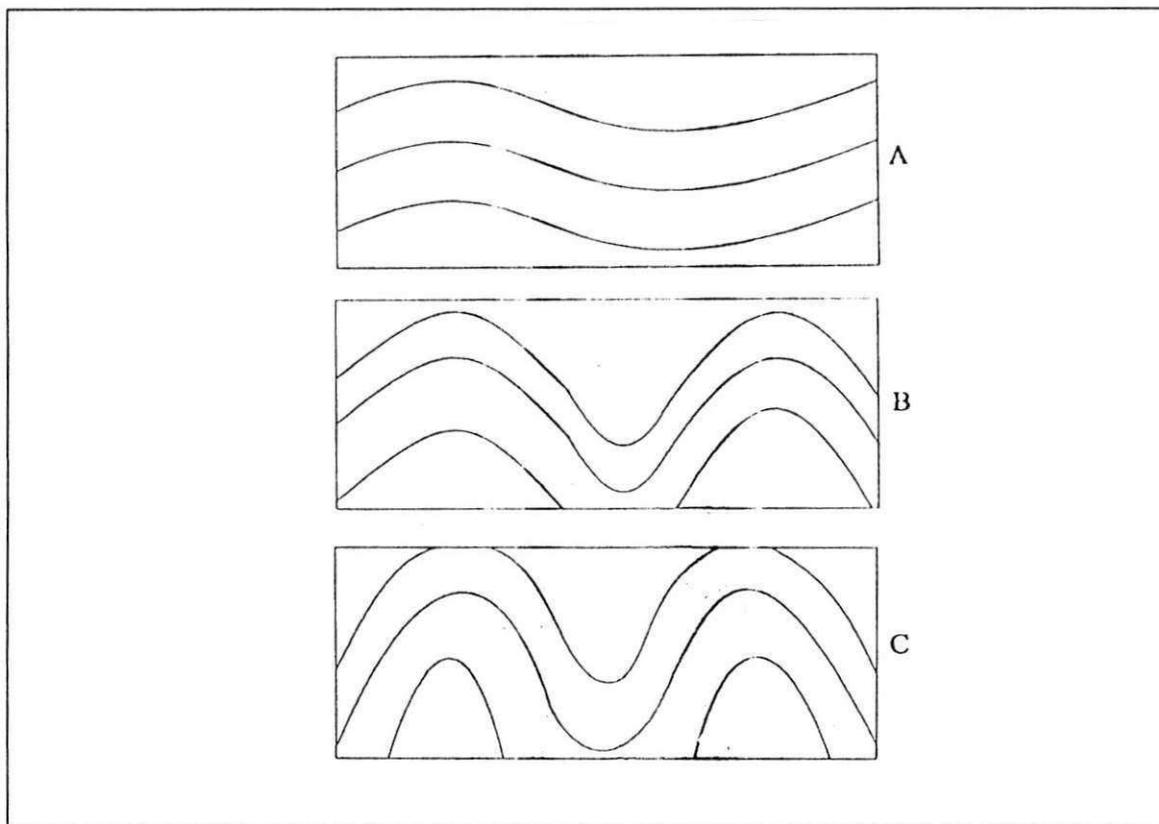


Figura.2.9 – Diferentes situações de mergulho de planos de xistosidade (Costa, W. D. 1985)

Admitindo um mergulho constante de um conjunto de fraturas segundo uma só direção, vamos supor, para efeito de comparação, três situações distintas com mergulho de 20° , 45° e 70° , supondo ainda que a intensidade de fraturas seja a mesma nos três casos, ou seja, com afastamento de 1m entre cada fratura (Fig. 2.10). Observa-se na Figura 2.10 que a situação "A", com fratura mergulhando de 20° , um poço interceptaria 06 (seis) fraturas até a profundidade de 70 m. Na situação "B", com fraturamento mergulhando de 45° , somente duas fraturas foram interceptadas podendo chegar até 03 (três) a depender do local do poço. Na situação "C", com fraturamento de 70° de mergulho, apenas uma fratura é interceptada pelo poço, o qual pode, inclusive não interceptar nenhuma fratura, a depender do local do poço.

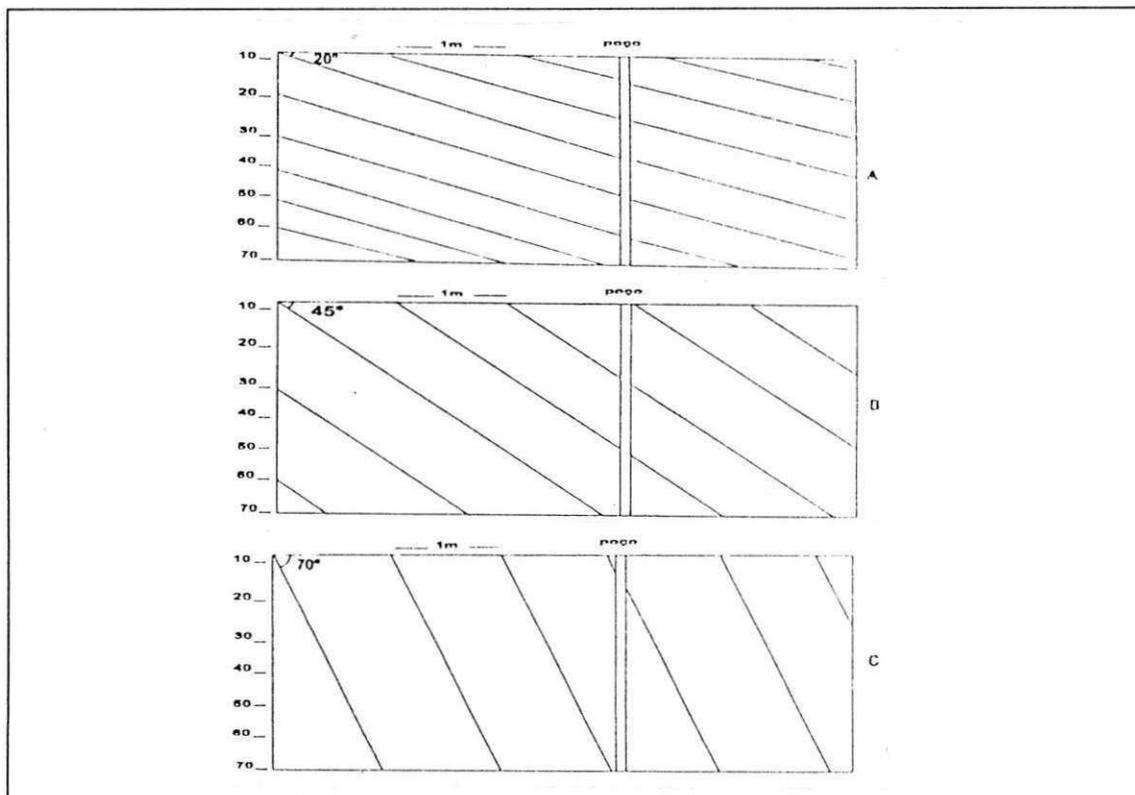


Figura 2.10 - Relação do ângulo de mergulho de fraturas com intensidade de fraturas pelo poço (Costa, W. D. 1982).

Estruturas Geológicas – é o fator mais importante no problema de potencialidade da água subterrânea em rochas fraturadas. As principais estruturas favoráveis à infiltração e acumulação são as falhas, fraturas, juntas de origens diversas e planos de xistosidade e de clivagem.

Uma associação importante é a hidrografia-estrutural, ou simplesmente designada de “riacho-fratura”. Essa associação estabelece a relação que deve existir entre a presença da fratura e a drenagem superficial para alimentá-la.

A locação do poço deve levar em consideração à distância para a fonte de alimentação (riacho ou rio) em função da inclinação ou ângulo de mergulho do plano de fratura. Essa relação é função inversa, isto é, quanto maior o ângulo de mergulho, menor à distância do poço. Suponha seção vertical com 50 m de distância horizontal (na superfície) por 100m de profundidade (Fig. 2.11). No vértice superior esquerdo, encontra-se um riacho que alimenta fraturas de diferentes intensidades de mergulhos (de 10° a 80°). Verifica-se que até a profundidade de 100m, a fratura de 80° somente é interceptada a 10m de distância da zona de alimentação e a de 70° é interceptada até aos 30 m de distância.

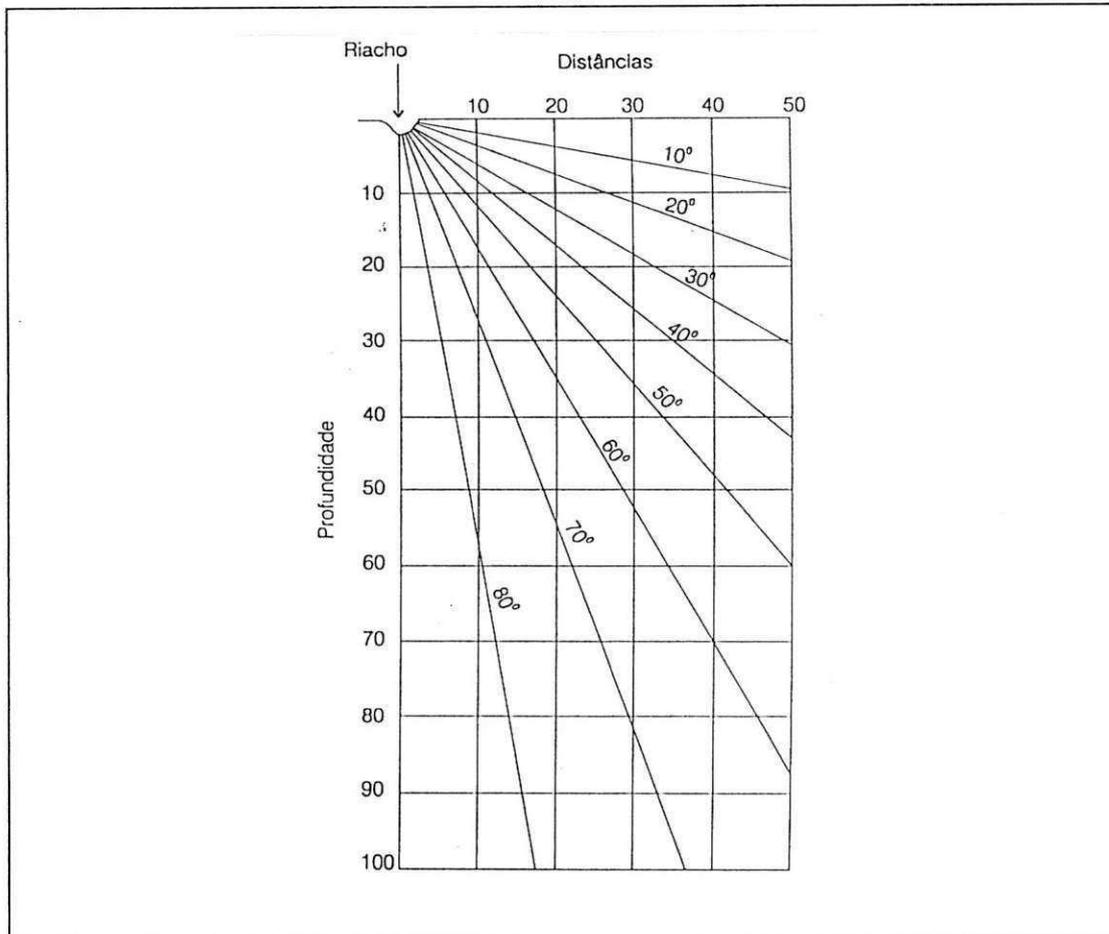


Figura 2.11 – Relação ângulo de mergulho de fratura x distância x profundidade (CDRM, Livro Hidrogeologia, Conceito e Aplicações, Fernando A. C. Feitosa, João Manoel Filho, 1997).

Convém analisar ábaco da Figura 2.12, em que são mostradas as profundidades em que as fraturas são intersectadas em função do ângulo de mergulho e da distância. Assim, por exemplo, uma fratura que possui ângulo de mergulho de 50° será interceptada por um poço a 30m de distância a uma profundidade de 35,7 m. Para profundidades maiores de 40 m, ou distâncias diferentes daquelas representada nas curvas, pode-se calcular as profundidades de interseção, pela expressão:

$$P = d \operatorname{tg} \alpha$$

Onde:

P = profundidade de interseção da fratura no poço

d = distância do poço ao riacho (área de alimentação na superfície)

α = ângulo de mergulho da fratura

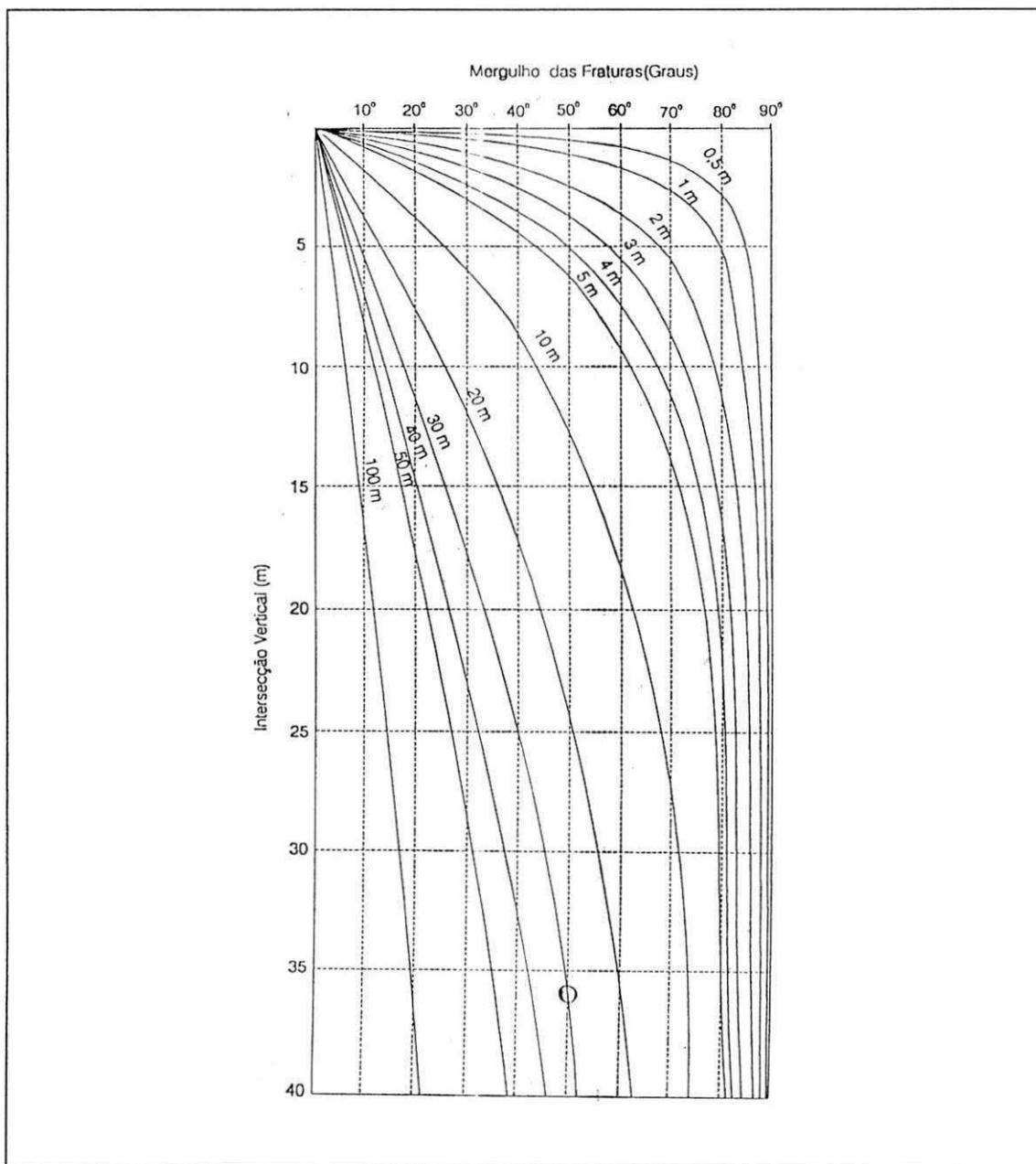


Figura 2.12 – Ábaco para determinação da interseção de fraturas, em relação ao mergulho das fraturas e distância do poço à área de recarga (CDRM, Livro Conceito e Aplicações Hidrogeologia, 1997).

Constata-se que as fraturas de ângulos de mergulho igual ou superior a 70°, somente podem ser interceptadas por poços situados no máximo a 10m de distancia (a 20 m a profundidade já seria de 55 m). Ex. Para perfurar um poço com distancia de 10 m da fonte alimentadora onde a principal fratura de alimentação tem ângulo de mergulho de 80° a profundidade para alcançar esta fratura será de 56,7 m de profundidade (observe o calculo abaixo).

Distância do poço $d = 10\text{ m}$

Ângulo de mergulho da fratura $\alpha = 80^\circ$

$$P = d \operatorname{tg} \alpha = 10 * \operatorname{tg} 80^\circ = 56,7\text{ m}$$

O problema da quantidade de água a ser obtida num poço está relacionado com o rebaixamento disponível e tempo em que esse rebaixamento seja atingido e mantido.

Essas variáveis estão intimamente ligadas aos aspectos estruturais, além da combinação direta ou indireta de outros valores, como o tipo de rocha , o relevo, a profundidade de captação, etc.

De um modo geral, seis condições são consideradas indispensáveis para conseguir-se êxito na perfuração de poços em rochas cristalinas.

- ✓ Existência de fraturamento na rocha
- ✓ Grau de abertura da fraturas
- ✓ Extensão e profundidade das fraturas
- ✓ Freqüência do fraturamento
- ✓ Interconexão das fraturas
- ✓ Conexão do sistema de fraturas com zonas de recarga na superfície (rios, lagoas, capeamento permeável etc.).

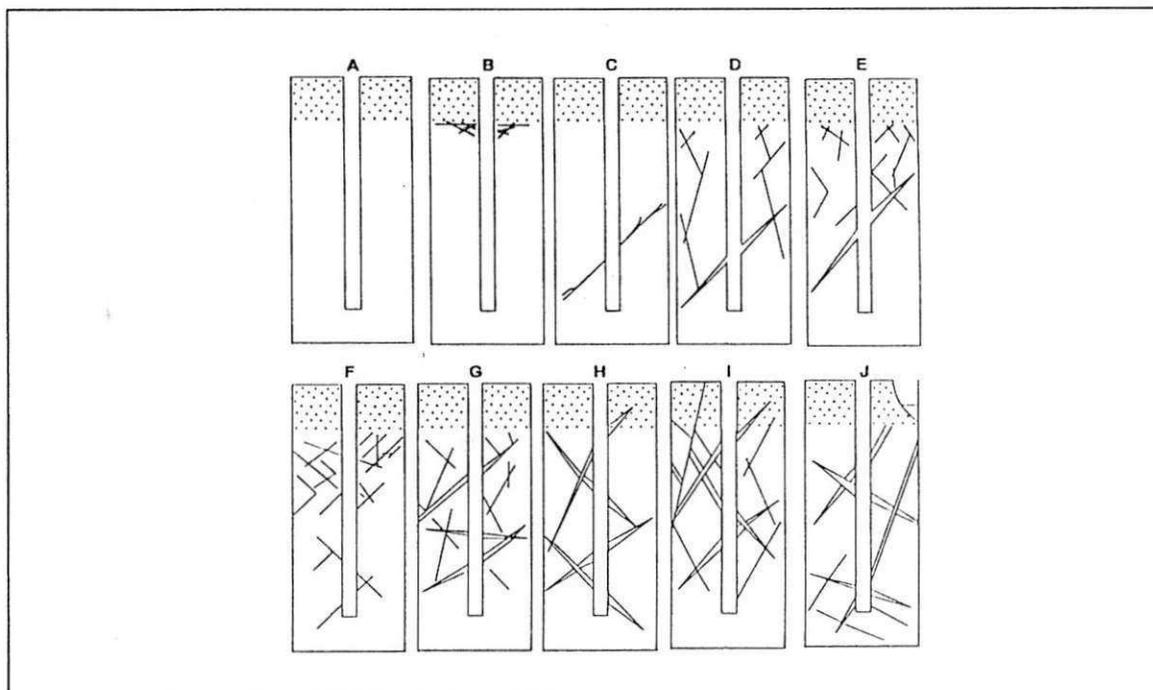


Figura 2.13 – Diferentes situações encontradas na perfuração de poços em rocha cristalina fraturada. A profundidade total é de 80m (aproximadamente), com 15m de revestimento (no manto de decomposição pontilhados na Figura). Os caso “A” e “J” representam as condições extremas de exploração; no primeiro o poço será seco e no segundo, as condições de exploração são as melhores (adaptação de Legrand e Campbell 1959).

Os poços perfurados em aquíferos fraturados podem enquadrar-se em um dos 10 (dez) casos a seguir descritos, considerando-se o aspecto estrutural e as condições supracitadas (Fig. 2.13, de A a J).

Caso A – o poço não penetra fraturas abaixo do revestimento (de apenas 15m). Nesse caso o poço não fornecerá água (poço seco).

Caso B – o poço penetrou numa zona fraturada em que duas ou mais fraturas ocorrem a poucos metros abaixo do revestimento. É

um tipo muito comum de poço. Ele pode produzir vazões de 2 a 4 m³/h durante vários minutos, até as fraturas serem drenadas. Sua vazão declinará subitamente para uma fração do seu valor total, dependendo a estabilização, da permeabilidade do manto de cobertura.

Caso C – o poço penetra apenas uma fratura, bastante extensa e bem abaixo, a uma profundidade de 65m (aproximadamente). Como no caso “B”, a perenização da vazão dependerá da permeabilidade do manto de cobertura e da capacidade de transmissão da fratura, desde que exista, é claro, uma fonte de recarga. Se a carga é retransmitida do manto para a fratura rapidamente e transmitida através da fratura para o poço, a vazão aumentará com o aumento do rebaixamento, até o nível d’água alcançar a fratura contribuinte. Não haverá aumento da vazão abaixo desse nível de bombeamento (nível da fratura). Porém, se a água é fornecidos do manto para as fraturas com velocidade menor do que aquela que é transmitida através da fratura, o nível de bombeamento mais eficiente será numa posição intermediária entre a fratura e a base do manto (no saprolito).

Caso D – o poço penetra apenas uma fratura a grande profundidade (aproximadamente 65m), de boa abertura, porém com extensão limitada, com precária ou difusa comunicação com o manto. Assemelha-se ao caso “C”, porém apresenta em geral uma pseudo-estabilização do rebaixamento durante o bombeamento, devido à presença de um “elevado” volume de água na fratura.

Caso E – o poço penetra várias fraturas , contribuindo com pequena quantidade de água, e uma grande fratura a maior

profundidade (50m), a vazão irá aumentar com o aumento do rebaixamento, até atingir a zona de maior contribuição (no caso, aos 50m).

Caso F – o poço penetra várias fraturas de tamanho pequeno a médio. Estas fraturas são mais amplas e mais aproximadas uma das outras (maior frequência), na parte superior da rocha fraturada.

Caso G – o poço penetrou duas ou três fraturas de boa abertura e pequena extensão, saturada e alimentada por fraturas pequenas a médias (em abertura) que se combinam com o manto de cobertura. Nesse caso, o poço apresenta o fenômeno que ocorreu no caso “D”, porém com sucessivas quedas de rebaixamento, na medida em que a vazão em cada uma das fraturas abertas vai se esgotando com o bombeamento.

Caso H – o poço penetra em várias fraturas de boa abertura, ligadas ao manto, porém preenchidas por material detrítico. A característica principal do poço é o contínuo desenvolvimento, à medida que se prolonga o bombeamento, devido à obstrução gradativa das fraturas. Em geral, são poços de boa produção. A vazão aumenta quando aumenta o rebaixamento e o nível de bombeamento pode ficar numa posição intermediária entre as primeiras e últimas fraturas penetradas.

Caso I – o poço atravessa várias fraturas e é influenciado por uma falha nas proximidades, que atua como uma fronteira impermeável, pois quebra abruptamente a continuidade das fraturas que alimentam o poço, provocando um efeito de depleção durante o bombeamento.

Caso J – o poço é influenciado por fonte perene de carga superficial, representada por um curso d'água (perene ou não). Esse é o caso mais favorável para obtenção de uma boa vazão em rocha fraturada. O nível dinâmico é estabelecido com rapidez e, devido à interconexão do sistema de fraturas, o nível de bombeamento pode descer até a proximidade da fratura principal, que recebe a contribuição da água superficial.

CAPÍTULO III

3 GEOLOGIA E ESTATÍSTICAS DAS FRATURAS DAS SUB-ÁREAS DE ESTUDO

3.1 GEOLOGIA DA PARAÍBA

O Estado da Paraíba encontra-se na maior de sua parte, geologicamente constituído pela unidade *lito-estratigáfica* do *pré-cambriano* e mais restritamente pela seqüência sedimentar *paleomasóicas* constituintes das bacias do *Araripe* (Formação Cariri-Siluro/Devoniano), e *Rio do Peixe* (Grupo Rio do Peixe-Cretáceo Inferior) e da *Faixa Sedimentar Costeira Pernambucana - Paraíba* (Grupo Paraíba-Cretáceo Superior). Afloramentos de rochas efusivas ácidas e básicas, meso-cenozóicas, são observadas nas regiões de Itaporanga e Boa Vista, Cubati e Queimada, respectivamente. Finalmente, as unidades sedimentares *cenozóicas* acham-se representada pela *Formação Campo Novos*, de idade terciária, pelos depósitos terció-quaternários do Grupo Barreira e das coberturas arenosas e lateríticas e pelas aluviões, dunas, sedimentos de praia, etc. de idade quaternária.

De modo geral, as direções estruturais assumidas pelos complexos de rochas do embasamento cristalino pré-cambriano são preponderantemente NE-SW com variações para ENE-WSW até E-W, destacando-se dentro deste esquema, os grandes falhamentos de transcorrência *dextrógira* associados aos lineamentos de Patos, Tatajuba-Malta e Cariris Velhos, além das falhas transcorrestes de Cacerengo e

Malta e Cariris Velhos, além das falhas transcorrestes de Cacerengo e Pipirituba (dextrógiras) e Guarabira (levógira), das falhas de cavalgamento das regiões de Picuí e Aroeira-Macaparana e dos inúmeros dobramentos *sinformes e antiformes* distribuídos por toda a área de domínio das unidades pré-cambrianas.

A interação dos conceitos geotectônicos existentes na região Nordeste evidencia, para o Estado da Paraíba, uma compartimentação característica pelas *Províncias Costeiras e Borborema*, estando esta última, por sua vez, subdividida nas unidades geotectônicas representativas dos sistemas de dobramentos Piancó-Alto Brígida, Pajeú-Paraíba e Curimataú, dos maciços de Caldas Brandão e Rio Piranhas e das zonas geotectônicas de Texeira e Nova Floresta.

A área de estudos encontra-se totalmente enquadrada dentro da unidade lito-estratigráficas pré-cambriana basicamente do Complexo Gnaissico-Migmatítico (pεgn) que compreende os grupos de S. Vicente, Caicó e Uauá, definido por Ebert (1970), Ferreira & Albuquerque (1969) e Barbosa et alii (1964/1970), respectivamente, e constitui-se na unidade pré-cambriana de maior representação, estendendo-se por todos os quadrantes do Estado da Paraíba, ora sendo interrompida pelos grandes maciço granitóides limitando ao Norte com rochas platônicas granulares granitóides (Fig. 3.1).

Quanto à tectônica da área encontra-se dentro da província Borborema com uma superfície aproximadamente de 380.00 km², compreendendo grandes porções dos estados nordestinos, esta província segundo Almeida et alii (op. Cit.), coincide com a Região de Dobramento

Nordeste desenvolvida no decorrer do ciclo Brasileiro, sendo confinada pelas províncias costeira (Leste e Norte), Paraíba (Oeste) e São Francisco (Sul).

Na sua área de domínio estão presente coberturas paleozóicas e mesozóicas, associadas a pequenas bacias cujo sedimento são remanescentes de coberturas mais amplas ligadas as primitivas extensões das bacias do Paraíba e Recôncavo-Tucano-Jatobá.

Com relação aos terrenos pré-cambrianos, Brito Neves (1970), individualizou certas e determinadas áreas, caracterizando faixas de dobramentos separadas entre si por altos do embasamento relacionados ou não com falhas.

Fazendo-se a interação dos conceitos de Almeida et alii (op. cit.) e Brito Neves (op. cit.) e aplicando-os ao Estado da Paraíba, constata-se que a província Borborema é bem caracterizada pelas seguintes unidades geotectônicas: faixa de dobramento Seridó, Pajeú-Paraíba, Piancó-Alto Brígida (sub-faixa Curimataú); zona geoanticlinais de Teixeira e Nova Floresta e maciço mediano intimamente representado na porção centro-Sul do estado, nos limites com Pernambuco.

Quanto aos recursos minerais a região da Borborema ocupa lugar de destaque, tendo em vista encerrar os inúmeros depósitos de *Scheelita* e de pegmatitos mineralizados de *Berilo*, *Tantalita-Columbita*, *Cassiterita*, enquadrado nas duas principais províncias minerais do nordeste: **Província Scheelitífera** e **Província Pegmatítica**. A ilmenita e a zirconita representam bens minerais de grande importância, tendo em vista constituírem os maiores depósitos de *titânio* e *zircônio do Brasil* ("placers" nas dunas litorâneas), sendo encontrado na região de Mataraca.

Ainda entre os minerais metálicos, devem ser ressaltados os fazimentos de *ouro* que ocorrem na região de *Mãe D'Água*, *Princesa Isabel*, *Manaira*, *Ibiara*, *Boqueirão dos Cochos* e, principalmente, no município de Catingueira, onde se acha localizada a *Mina de Itajubatiba*.

Entre os não metálicos, destacam-se o *calcário*, a *bentonita* e o *fosfato*. somando os dois primeiros, 50% da produção mineral da Paraíba. O calcário é representado pelos grandes depósitos sedimentares ocorrentes na faixa litorânea e pelas lentes de *calcário metamórfico*, largamente distribuído nos terrenos cristalino pré-cambrianos. As *jazidas de bentonita* do distrito de Boa Vista, são as únicas reservas conhecidas no Brasil, respondendo por grande parte do consumo nacional. Os *depósitos de fosfato* que ocorrem na zona litorânea revestem-se de grande importância econômica/científica, tendo em vista, constituírem os únicos depósitos econômicos de *fosforitos* conhecidos no Brasil.

Além dos bens minerais citados, ocorrem ainda no Estado, ametista, apatita, fluorita, grafita, granada, vermiculita, ferro, galena, mangânes, níquel, pirita, cobre, amianto, talco, areia branca, argila nobres, barita, calcedônia e caulim, dos quais, os setes últimos apresentam atualmente produção, com destaque para o caulim.

3.2 PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA APLICADA À GEOLOGIA

Os problemas de geologia requerem em geral, uma análise geométrica tridimensional. Até então eles têm sido resolvidos por meio de geometria descritiva, especialmente por métodos que permitem resolver questões que envolvem a determinação de distâncias verdadeiras.

Contudo problemas que envolvem exclusivamente *relações angulares* entre linhas e/ou planos no espaço podem ser solucionados, muito mais rapidamente, pelo emprego da projeção estereográfica. Esta projeção é uma das muitas projeções usadas para representar uma esfera em uma superfície plana, sendo largamente empregada em cristalografia.

3.3 PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA DAS FRATURAS DAS SUB-ÁREAS DE ESTUDO

A área de estudos encontra-se dentro da unidade lito-estratigráfica pré-cambriana na Província da Borborema com Complexo Gnáissico-Migmatítico limitando ao Norte com rochas plutônicas e ao Leste e Sul com rochas granitóides (granitos, granodioritos, tonalitos e monzonitos).

A área de estudo foi dividida em quatro sub-áreas denominadas Queimada (Sul), Bodocongó (Oeste), Riachão (Leste) e Alagoa Nova (Norte), e nestas sub-áreas foram feitos levantamentos sobre azimutes das fraturas e posteriormente analisadas estatisticamente através de programa computacional “Stereo Net” para definir as principais e secundárias direções das fraturas (Fig. 3.1).

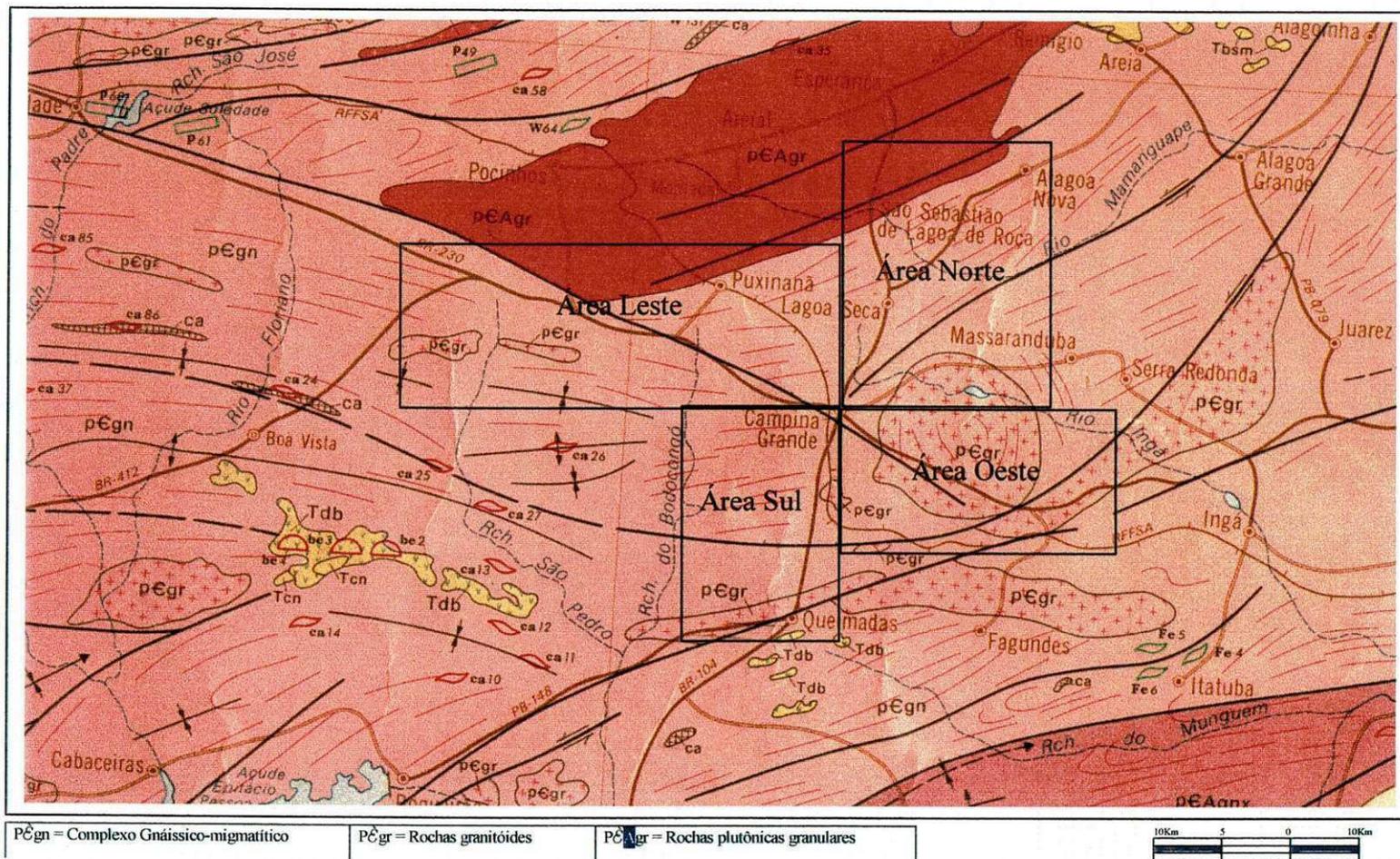


Fig. 3.1 – Área de estudo com respectivas sub-áreas no Estado da Paraíba

3.4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICAS DAS SUB-ÁREAS

3.4.1 SUB-ÁREA DE QUEIMADA (SUL)

3.4.1.1 GEOLOGIA

Uma grande parte da área está basicamente 90% dentro do Complexo Gnaíssico-Migmatítico com intrusões de rochas granitóides próximo a cidade de Queimada transladada por falhas transcorrentes fora da zona de ocorrência e intrusões de rochas granitóides e falhas indiscriminada fazendo contato com as intrusões de rochas granitóides (pegr) com característica de movimento tectônico nos batólitos. Ainda existindo pequenas ocorrências de diabásicos e basalto (Tdb) do sistema de dobramento Pajeú-Paraíba, podemos distinguir dois grupos de foliação uma direção da falha transcorrentes e outro na direção da falha indiscriminada, basicamente com uma direção preferencial de aproximadamente N80° a N60°.

Nesta sub-área foram obtido um total de 36 medições das fraturas, que foram utilizadas nesta análise. Em “loco” verificou-se fratura freqüente próximo à falhas transcorrentes com azimute de 160° e ângulo de mergulho de aproximadamente 90°, onde predomina a direção da falha transcorrente que passa ao Norte de Campina Grande. Nesta zona de falha há intensa deformação com dobras anticlinal e sinclinal. Na zona após a falha transcorrente ao Sul da região constatou-se fratura freqüentes na direção de N125° a N135° com ângulo de mergulho 80° e 90° antes das intrusões.

3.4.1.2 ESTATÍSTICA “STEREO NET”

No Diagrama de polos de fraturas (Fig. 3.2 - a) verifica-se uma concentração de pólos no centro descrevendo uma área de grau de mergulho muito alta (90°) com dispersão de pólos caracterizando mais de uma família de fraturas; no de contorno de fratura (Fig. 3.2 - b) pode-se verificar claramente a alta concentração de fraturas no centro, cerca de 44,4%, demonstrando uma área muito homogênea devido seu contorno bem próximo, pode-se também verificar fraturas de ângulo de mergulho alto variando de 60° a 90° .

No estereograma de Roseta de fratura (Fig. 3.2 - c) verifica-se uma família de fraturas na direção de $N125^\circ$ a $N135^\circ$ e uma uniformidade de família nas direções de $N65^\circ$, $N85^\circ$ e $N105^\circ$ caracterizando intervalos de 20° entre as famílias de fraturas. No de plano de fratura observa-se (Fig. 3.2 - d) diversidade de azimutes nesta sub-área com fraturas relativamente freqüentes no sentido de $N125^\circ$ a $N135^\circ$. Esta diversidade poderá ser atribuída as intensas deformações observadas na região.

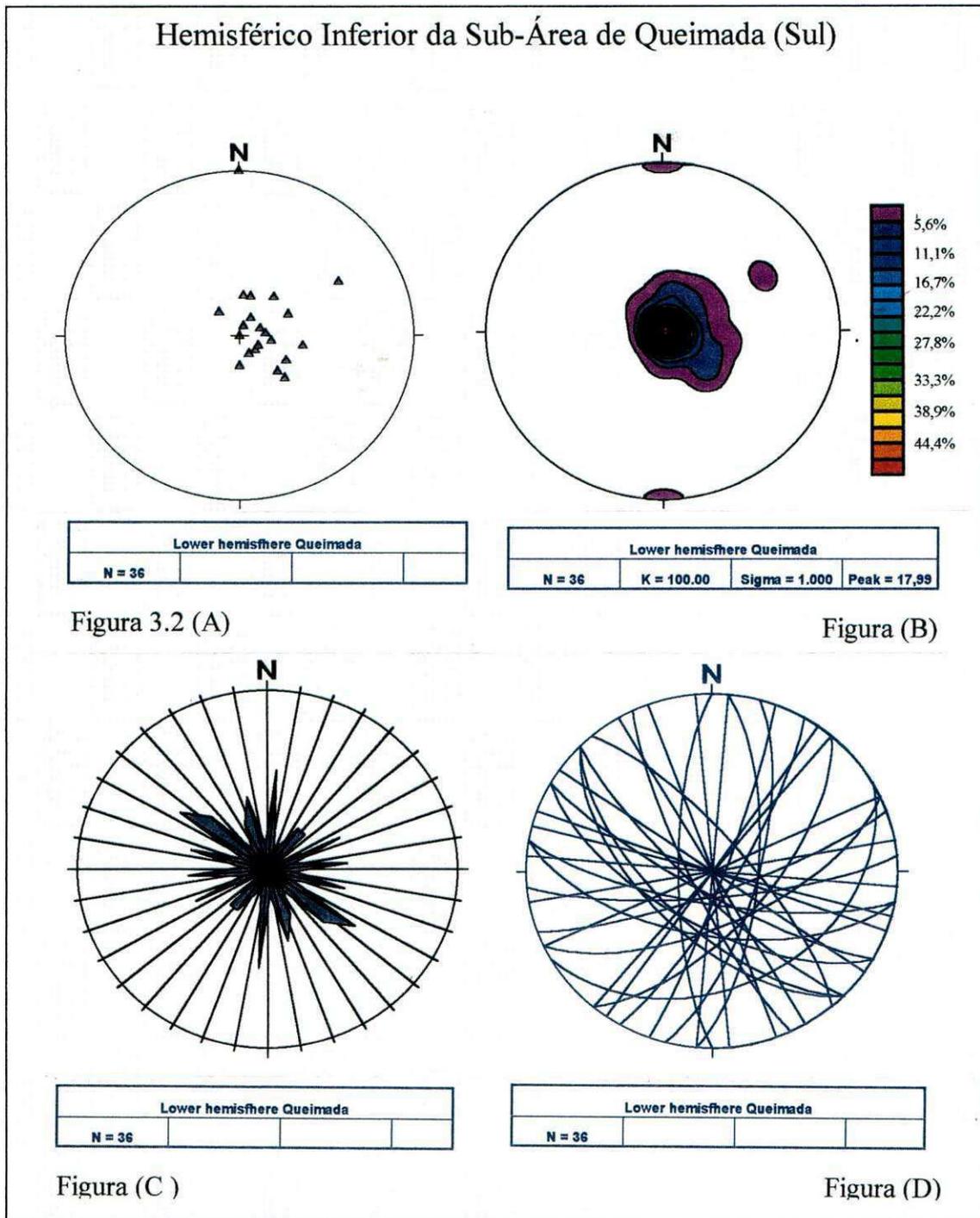


Figura 3.2 – Frequência de ocorrência de fraturas na sub-área de Queimadas (Sul), A=Estereograma de pólo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C=Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.

3.4.2 SUB-ÁREA DE ALAGOA NOVA/LAGOA SECA (NORTE)

3.4.2.1 GEOLOGIA

Toda esta área faz parte do Complexo Gnáissico-Migmatítico fazendo fronteira ao Norte com uma intrusão com rochas plutônicas granulares, granitóides e as falhas transcorrentes fazendo fronteira nos lados Leste e Oeste da sub-área de queimada. Nessa região observa-se falhas transcorrentes ao Leste e Oeste e ao Norte dentro da intrusão plutônica já no limite da área de falhas indiscriminada. A foliação principal da região é paralela à direção da falha transcorrente do Leste; a foliação secundária é paralela às falhas indiscriminada da direção de N45°. Nesta área foi obtido um total de 36 medições das fraturas para análise.

3.4.2.2 ESTATÍSTICA STEREO NET

No estereograma de pólos de fraturas (Fig. 3.3 - a) observa-se uma concentração relativa no centro, caracterizando ângulo de mergulho das fraturas de cerca de 90°, com alguns pólos espalhados nas direções Nordeste e Sudeste e no de contorno de fratura (Fig. 3.3 - b) pode observar-se, através do espectro de frequência que mais de 40% das fraturas tem um ângulo de mergulho aproximadamente 90° e que o restante apresenta ângulo de mergulho variado.

No Diagrama de roseta de fraturas (Fig. 3.3 - c) observa-se com nitidez as direções preferenciais nas direções de N5°, N35°, N145° e N165° com uma preferência relativa na direção de N145°. As fraturas com direções de N35° e N145° são aproximadamente paralelas às falhas de mesma direção. Verificando no mapa podemos observar falhas nas direções de N30 a N45° e outra N135° coincidindo com as direções de fraturas, a foliação na faixa de N30 a N45°, no diagrama de plano de fratura (Fig. 3.3 - d) reforça o diagrama de roseta mostrando os mergulhos que variam de 90° a 35° desta sub-área.

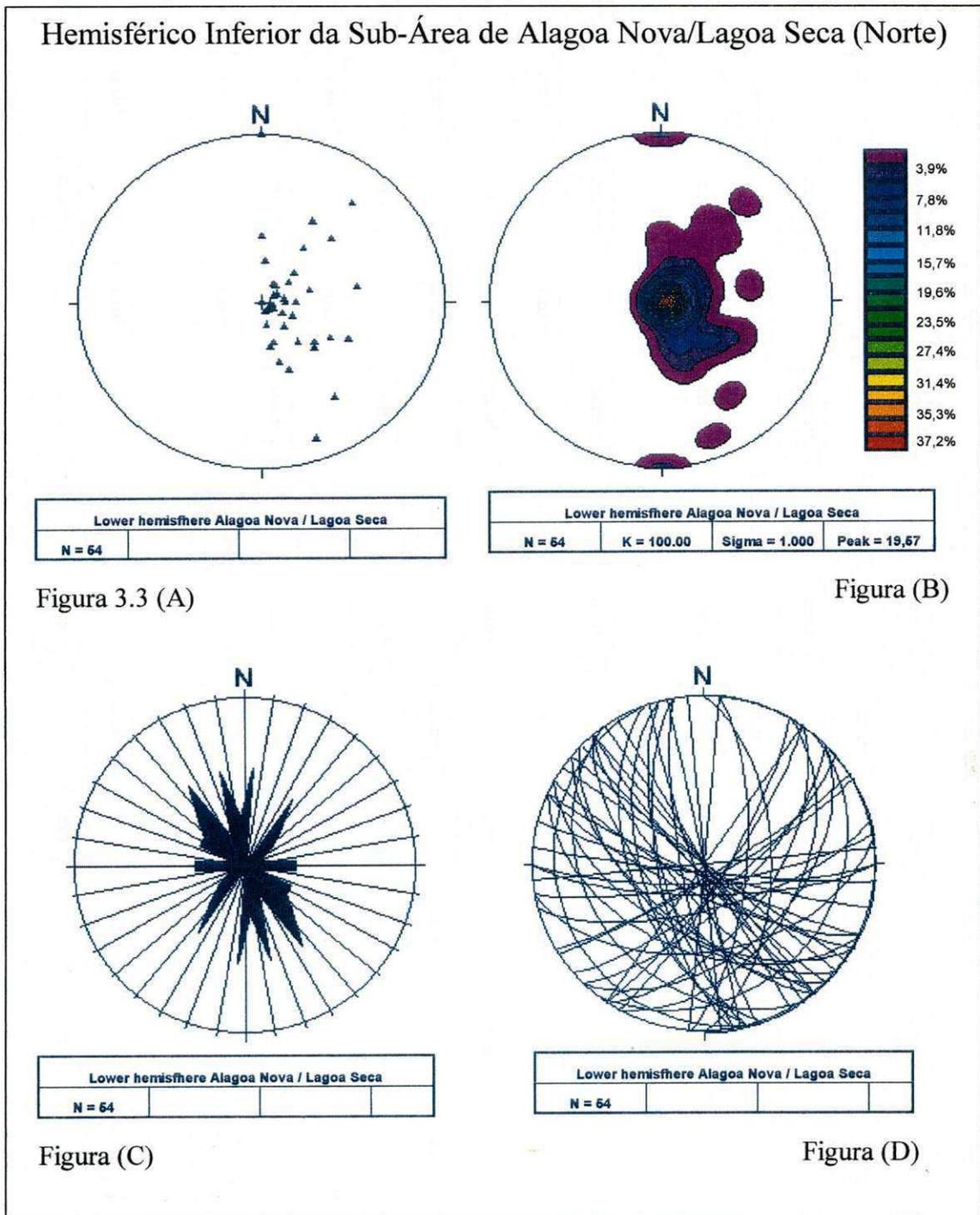


Figura 3.3 – Frequência de ocorrência de fraturas na sub-área de Alagoa Nova/Lagoa Seca (Norte), A = Estereograma de polo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C= Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.

3.4.3 REGIÃO DE RIACHÃO (LESTE)

3.4.3.1 GEOLOGIA

A área encontra-se dentro de uma intrusão de rochas graníticas de forma circular, (Fig. 3.1) sendo transpassada e contornada por falhas transcorrentes e discriminadas. Ainda é uma área de interseção de várias falhas, assim definindo a área como uma zona de cisalhamento. A foliação da região contorna a intrusão no formato circular, resultando numa grande variação de direções. As falhas regionais apresentam-se em três direções distintas de N45°, N70° e N120°.

3.4.3.2 ESTATÍSTICA STEREO NET

No diagrama de pólos de fratura (Fig. 3.4 - a) observa-se uma dispersão dos pólos com formação de pequenos grupos. Os dados mostram também relativamente baixa concentração de fraturas de ângulo de mergulho alto, e no de contorno de fratura (Fig. 3.4 - b) observa-se um afastamento das linhas de contorno, onde 34,3% das fratura encontram-se próxima do centro, caracterizando fraturas de ângulo de mergulho alto.

Verifica-se no estereograma de roseta de fratura (Fig. 3.4 -c) que as fraturas preferenciais ocorrem com maior intensidade na direção de N20° - 30° graus e outras fraturas de menor freqüência nas direções de N65°-75°, N95°-105°, N125°-145° e N175°-180°. No estudo de

campo pode observar fraturas freqüentes nas direções de N20°, N65°, N105° e N170° e esta última é mais comum em toda área do que as outras. Com relação às falhas encontradas na área, pode-se observar que as fraturas da região têm uma preferência na direção da falha transcorrente que passa pela cidade de Serra Redonda com direções de N20° a N30° e no estereograma de plano de fratura (Fig. 3.4 - d) observa-se à diversificação nos azimutes das fraturas com a preferência na direção de N20–30°.

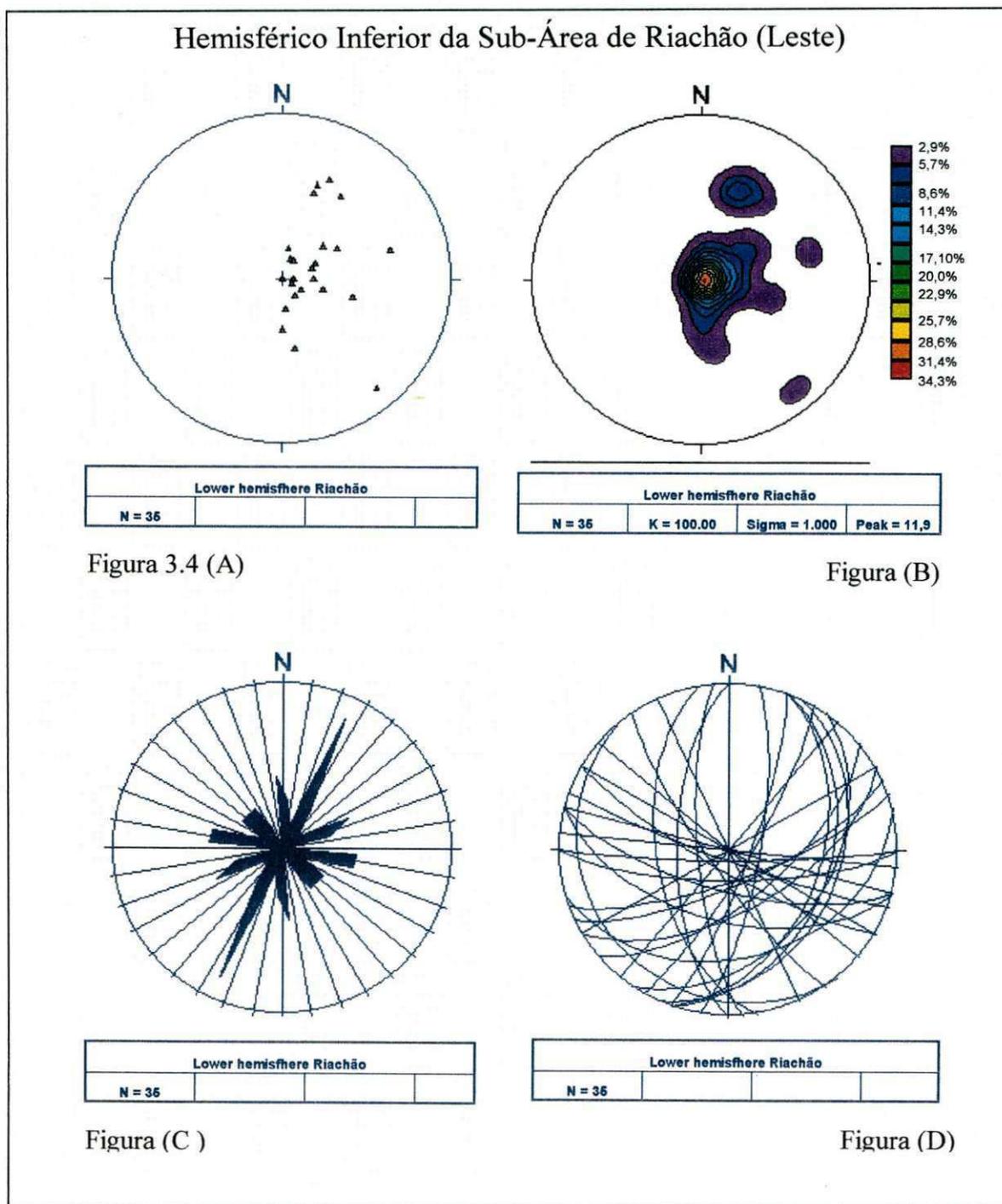


Figura 3.4 – Frequência de ocorrência de fraturas na sub-área de Rachão (Leste), A=Estereograma de pólo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C=Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.

3.4.4 SUB-ÁREA DE BODOCONGÓ (OESTE)

3.4.4.1 GEOLOGIA

O Complexo Gnáissico caracteriza esta sub-área, limitando ao Norte com rochas plutônicas com pequenos batólitos de rochas granitóides com forma elipsoidal (Fig.3.1). As lineações são paralela à falha com dobramento anticlinal e sinclinal com lentes de calcário. Nesta área os pontos de coleta de dados foram ao longo da BR 230 que fica paralelo a falha em um total de 34 medições de fraturas.

3.4.4.2 ESTATÍSTICA STEREO NET

Analisando o estereograma de pólos de fraturas (Fig. 3.5 –a) verifica-se uma pequena dispersão dos pontos. Pouca concentração no centro caracterizando área com direções de fratura bastante variada. No diagrama de contorno de fratura (Fig. 3.5 - b) fica evidenciada a dispersão das fraturas pelo afastamento das linhas de contorno. Na legenda pode-se notar o número de fraturas de mergulho alto que é de 29,4%. É um número baixo em relação às outras áreas. Também ocorrem algumas fraturas isoladas, fora da área de maior concentração, semelhante as que ocorrem na região de Riachão.

No diagrama de roseta de fratura (Fig. 3.5 - c) nota-se fraturas de direções de N05°, N35°-45°, N85°, N105°, N125° e N165°. As fraturas mais freqüentes são de N05° e N125°. As fraturas de N125° variam pouco na direção, por isso resulta a roseta em uma linha reta, o mesmo

acontece, mas com mesma frequência para a direção de N05° e N105°. Fica evidenciada a confirmação freqüente de fraturas na direção N120° - 125° paralelas da falha, já que os pontos de amostra estão bem próximos à falha e coletados paralelamente, no diagrama de plano de fratura (Fig. 3.5 - d) observa-se nitidamente a quantidade de planos que passa na origem do estereograma com ângulo de mergulho de 90°az. e a variação de direção e mergulho da área em estudo.

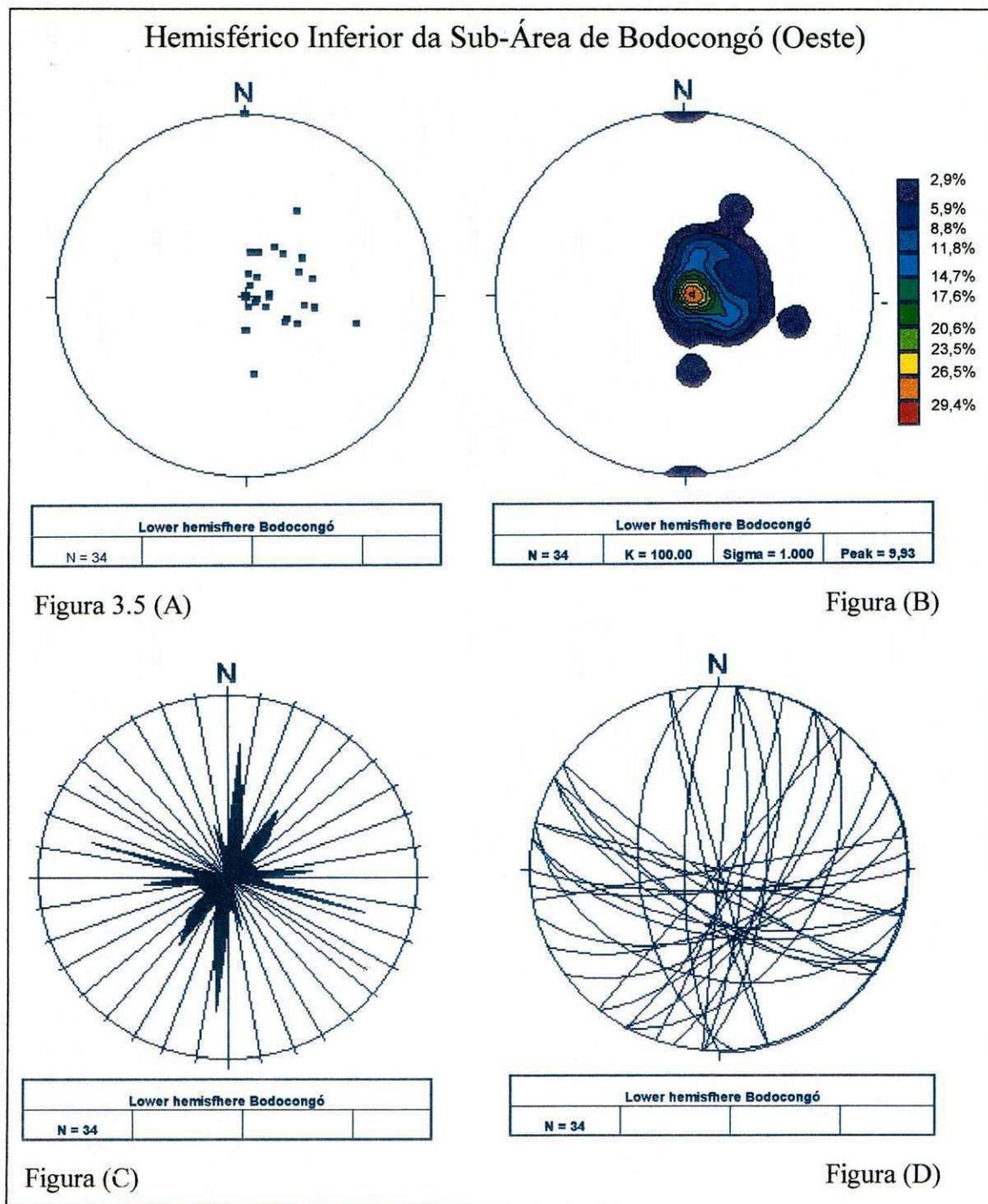


Figura 3.5 – Frequência de ocorrência de fraturas na sub-área de Bodocongó (Oeste), A=Estereograma de pólo de fratura, B = Estereograma de contorno de fratura, C=Estereograma de roseta de fratura e D = Estereograma de plano de fratura.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS MAPAS DE FRATURAS

4.1 METODOLOGIA E ELABORAÇÃO DOS MAPAS DE FRATURAS

Este capítulo está baseado na elaboração de mapas de fraturas e interpretação da hidrodinâmica das fraturas, correlacionando-as com poços existentes, significado de zona de cisalhamento e identificando-se micro áreas propícias ao armazenamento de água.

Os mapas de fraturas das sub-áreas (área Norte, área Sul, área Leste e área Oeste) foram elaborados através da demarcação das áreas de estudo (Campina Grande) no mapa geológico da Paraíba. A demarcação foi feita da seguinte maneira:

A área de estudo foi definida no mapa geológico da Paraíba e foram anotados as coordenadas geográficas dos vértices de cada sub-área.

As coordenadas dos vértices de cada sub-área foram transferidas do mapa geológico para o mapa de fratura ampliada. Definindo-se assim os limites de cada sub-área no mapa de fratura. Assim a escala do mapa de fratura da sub-área ficou em 1:500.

Em relação às coordenadas geográficas dos afloramentos pesquisado no campo, foram coletados os valores de longitude e latitude através do GPS (Geographic Positioning System). Os

afloramentos pesquisados foram plotados no mapa de fratura em cada sub-área.

Os dados sobre as direções de fraturas, direção de mergulho e ângulo de mergulho coletados no campo em cada afloramento, foram colocados no mapa de fratura. O azimute de cada fratura obtido no campo foram traçadas no mapa e extrapoladas até o limite da área de demarcação, já que as fraturas se distendem em sentido regional.

Plotados as fraturas no mapa que são representadas pelas linhas em cada ponto de afloramento, foram marcados as direções de mergulho de cada fratura, estas representadas por setas definindo-se a direção de mergulho.

As informações sobre os poços artesianos foram baseadas na bibliografia e dados fornecidos por órgãos estaduais e federais, com CDRM-PB (Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba) e o Departamento de Engenharia Rural da cidade de Campina Grande – PB e dados bibliográficos do Catálogo de Inventário Básico do Nordeste.

Com as informações fornecidas pelos órgãos onde constam as coordenadas geográficas de poços perfurados, seguiu-se o mesmo procedimento na plotação dos poços no mapa de fratura (Anexos A, B, C e D).

Para o estudo detalhado, foram feitas as classificações de fraturas no campo, como fraturas freqüentes no afloramento, fraturas freqüentes regionais e fraturas não freqüentes, segundo as suas freqüências de ocorrência ou espaçamento no afloramento e na área de estudo.

Fraturas freqüentes no afloramento – são fraturas que aparecem com freqüência no afloramento, onde à distância ou espaçamento

entre as fraturas variam de centímetro a alguns metros, definidas ainda em muito, médio e pouco freqüente.

Fraturas freqüentes regionais – são fraturas da mesma direção que aparece em vários afloramentos da região, definida também em muito, médio e pouco freqüente, com espaçamento em dezenas de metros.

Fraturas não freqüentes – são fraturas que não são comuns e não aparecem com freqüência nos afloramento da região.

As fraturas freqüentes foram classificadas segundo sua ocorrência em alto, médio e baixo (Tab. 4.1).

Tabela 4.1 Classificação das fraturas segundo sua freqüência de ocorrência.

	Freqüência de ocorrência		
	Baixo	Médio	Alta
Fratura freqüente regional	2 vezes	3 vezes	> 3 vezes

As direções do ângulo de mergulho das fraturas freqüentes foram classificados em alto, médio e baixo (Tab. 4.2).

Tabela. 4.2 Classificação da freqüência de ocorrência conforme o ângulo de mergulho

		Ângulo de mergulho		
		Baixo	Médio	Alto
Fratura	freqüente	00° - 30°	30° - 60°	60° - 90°
no afloramento				
Fratura	freqüente	00° - 30°	30° - 60°	60° - 90°
regional				

4.2 SUB-ÁREA DE QUEIMADA (SUL)

Aqui é discutido o comportamento das fraturas, falhas e distribuição de poços existente na sub-área Sul denominado Queimadas.

4.2.1 FRATURAS

As fraturas da região estão representadas na Tabela 4.3, estes dados foram coletados no campo e definidos por afloramento, e classificadas as fraturas quanto à freqüência de ocorrência.

Tabela. 4.3 Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Queimadas (Sul)

Afloramento	Direção de Foliação da rocha	Direção de fraturas	Fraturas frequentes no afloramento	Coordenadas		
				Latitude	Longitude	Altitude
I	85°	160°, 140°, 175° e 65°.	160°	07° 15' 57"	35° 52' 57"	478m
III		110°, 100°, 45°, 155° e 5°.		07° 15' 22"	35° 53' 20"	474m
IV	60°	60°, 135° e 100°.	135°	07° 18' 30"	35° 52' 38"	395m
V	100°	05°, 150° e 125°.	125°	07° 20' 18"	35° 53' 54"	477m
VI		35°, 125°, 160° e 95°.		07° 20' 48"	35° 53' 59"	420m
VII	80°	80°, 70° e 160°.		07° 21' 26"	35° 54' 05"	393m

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

As fraturas regionais da região de Queimadas apresentam dois grupos principais de fraturas de alta frequência regionais e um grupo de fratura de média frequência regional.

Grupo 1 (fratura de alta frequência regional) – as fraturas nas direções de N150° - 160°, apresenta-se em cinco afloramento I, III, V, VI, e VII da região sul (Queimadas) em um total de seis afloramentos pesquisado.

Grupo 2 (fratura de alta frequência regional) – as fraturas nas direções de N95° - 100° apresentam-se nos afloramentos III, IV, V e VI.

Grupo 3 (fratura média frequência regional) – as fraturas nas direções de N125° - 135°, apresenta-se em três afloramento IV, V, e VI.

As direções das foliações encontradas no trabalho de campo apresentada no afloramento I na direção de N80°, no afloramento IV com N60° e no afloramento V com N100°. Esta variação na direção de rocha é devido a duas grandes falhas transcorrentes apresentadas nesta região onde as suas direções variam conforme a direção de foliação encontrado no campo.

Algumas fraturas são freqüentes no afloramento destacando-se por conter varias fraturas da mesma direção, com pequeno espaçamento na região:

- a) A fratura com direção de N160° no afloramento III
- b) A fratura com direção de N135° no afloramento IV
- c) A fratura com direção de N125° no afloramento VI

4.2.2 DIREÇÃO DO ÂNGULO DE MERGULHO

O ângulo de mergulho de fraturas desta região é classificado em alto entre N70°-90°, provavelmente não favorecendo a retenção de água por haver pouca interseção das fraturas ou interseção de fraturas muito profunda (Tab. 4.4).

Devido à ausência de fraturas freqüentes e fraturas de médio e baixo ângulo de mergulho na região podemos considerar que não é uma região propicia para retenção de água nas fraturas, pois encontra-se poucas interseções das fraturas, mostrando-se assim uma região, mas propicia de recarga de água do que armazenamento.

Tabela. 4.4 Ocorrências de fraturas quanto ao ângulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Queimadas (Sul).

Afloramento	Direção de Fraturas	Direção de Mergulho	Ângulo de Mergulho
	DF	DM	AM
I	85°, 160°, 140°, 175° e 65°.	175°, -, 45°, - e -	80°, 90°, 75°, 90° e 90°.
III	110°, 100°, 45°, 155° e 5°.	-, -, -, 255° e 275°	90°, -, -, 80° e 70°
IV	60°, 135°, 135°, 135° e 100°.	150°, -, 40°, 40° e 90° -	35°, 90°, 60°, 65° e 90°.
V	100°, 05, 150° e 125°.	180°, -, - e -	75°, 90°, 90° e 90°.
VI	35°, 125°, 160° e 95°.	-, -, - e -,	90°, 90°, -, -
VII	80°, 70° e 160°.	-, 330° e -.	90, 80, 90,

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

4.2.3 FALHAS

Duas grandes falhas transcorrentes são bem visíveis nesta região, no sul da cidade de Campina Grande, com direção de N70° - 90° azimute nesta região com a tendência para N35° - 45° na região leste e a foliação nos afloramento conforme a direção da falha, já às fraturas freqüentes não seguem a direção de falhas, praticamente transversas em relação à falha nos afloramentos citados. Essas fraturas são tencionais com abertura suficientes para conduzir o líquido.

É provável que as fraturas freqüentes regionais e freqüentes de afloramento desta região sejam de recarga para zona de cisalhamento. Isso porque as fraturas ocorrem perpendiculares às falhas e ângulo de mergulho alto, assim favorecendo um escoamento da água para área mais baixa, caracterizando como fratura de escoamento e não de retenção.

4.2.4 . POÇOS

Pode-se citar várias micro áreas propicias a água nesta região baseado no estudo de fratura onde está sendo demonstrado no mapa de fratura e legendado como (Anexo A):

Área verde – são micro áreas dotadas de várias fraturas com ângulo de mergulho direcionados para o centro da micro área, formando uma espécie de funil com várias interseção de fraturas onde seria o local mais propício a localização de um poço.

Área Vermelha – são micro áreas que não apresentam interseção de ângulo de mergulho dentro da área legendada. Todavia não apresenta condições favoráveis a retenção de água.

Área amarela – são micro áreas propícias onde estão localizados poços e extrapoladas fraturas freqüentes regionais e freqüentes aflorantes assim demonstrando uma área de carga de água próxima aos poços.

Estas extrapolações de fraturas deram-se em retas paralelas a fraturas freqüentes.

4.3 SUB-ÁREA DE BODOCONGÓ (OESTE))

Neste sub capítulo apresentado dados sobre o comportamento das fraturas, falhas e poços da região Oeste denominado Bodocongó.

4.3.1 FRATURAS

As fraturas da região estão representadas pela tabela. 4.5, estes dados foram coletados no campo definidos por afloramento e classificadas as fraturas quanto à freqüência de ocorrência.

Tabela. 4.5 Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Bodocongó (Oeste)

Afloramento	Direção de Foliação DR	Direção de fraturas DF	Fraturas freqüentes no afloramento	Coordenadas		
				Latitude	Longitude	Altitude
I'	85°	125°, 30°, 85° e 05°.	125°, 30°, 05° e 85°.	07° 12' 27"	35° 56' 43"	418m
II'	90°	90°, 15°, 120°, 45° e 70°.	120° e 45°	07° 12' 27"	35° 56' 43"	418m
III'	90°	90°, 110°, 175°, 120°, 80°, 130°, 70°, 110°, 10°, 75°, 110° e 30°.	90°, 110°, 175°, 10° e 30°.	07° 12' 33"	35° 57' 06"	535m
I	100°	105°, 100°, 75°, 05°, 55°, 30°, 120°, 15° e 175°.	100°, 75°, 55° e 15°.	07° 11' 37"	35° 57' 48"	645 m
II	100°	105°, 165°, 120°, 165°, 100°, 90° e 125°.	120°, 100° e 125°.	07° 10' 45"	36° 00' 00"	692 m
III	105°	105°, 05°, 175°, 40° e 100°.	105°, 05° e 175°.	07° 10' 21"	36° 01' 55"	527m
IV	120°	120°, 30°, 20°, 15°, 180° e 65°.	120°, 30°, 20° 15° e 180°.	07° 09' 45"	36° 04' 10"	527m
V	120°	120°, 40°, 105° e 80°.	120°, 40° e 105°.	07° 08' 51"	36° 07' 13"	621m

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

Analisando as fraturas desta região, observa-se quatro grandes grupos de fraturas, três grupos de fraturas de alta freqüentes regionais e um grupo de fratura de média freqüência regional.

Grupo 1 (fraturas de alta freqüência regional) – são fraturas nas direções entre N120° - 125° comprovadas nos afloramentos I', I, II, IV, e V.

Grupo 2 (fraturas de alta freqüência regional) – são fraturas nas direções dentre N100° - 105° encontradas nos afloramentos I', II, III, e V.

Grupo 3 (fraturas de alta freqüência regional) – são fraturas nas direções entre N30° - 40° encontradas nos afloramentos I, II, III, IV e V.

Grupo 4 (fraturas de médio freqüência regional) – são fraturas nas direção de N05° encontradas nos afloramentos I', I e III.

Pode-se observar nesta região uma definição das fraturas freqüentes regionais com espaçamento pequeno, estas são bem nítidas e visível.

A importância deste grupo é representada pelo alto grau de fraturas freqüente regional, existe uma variação na direção da foliação bem definida e marcante no sentido do crescimento progressivo na direção Leste-Oeste iniciando em N85° (afloramento I'), N105° (afloramento I, II, e III) e N120° (afloramento IV e V) azimute.

Muitas são as fraturas freqüentes aflorante nesta região, e elas são:

- a) As fraturas N05°, N30°, N85° e N125° esta última muito freqüente no afloramento I'.
- b) As fraturas N15°, N55°, N75° e N100° no afloramento I.
- c) As fraturas N100° e N125° no afloramento II.
- d) As fratura N05°, N105° e N175° no afloramento III.
- e) As fraturas N15°, N20°, N30°, N120° e N180° no afloramento IV.
- f) As fraturas nas direções N40°, N105° e N120° a primeira muito freqüente no afloramento V.

Esta área é interessante devido ao seu alto grau de fraturas freqüentes regionais e alto grau de fraturas freqüentes aflorantes uma região de cisalhamento.

4.3.2 DIREÇÃO E ÂNGULO DE MERGULHO

A média do ângulo de mergulho das fraturas desta região é 72,26° e classificado em alto grau de mergulho. Poucas são as fraturas de ângulos de mergulho vertical nesta região, favorecendo a retenção de água nas interseções das fraturas, em nível mais próximo a superfície.

Outra característica observada nessa área é a ocorrência de grande quantidade de fraturas freqüentes, isto demonstrando um espaçamento menor entre as fraturas, acarretando um número maior de interseção das fraturas, propiciando condições para armazenamento da água (Tab. 4.6).

Tabela. 4.6 - Ocorrências de fraturas quanto ângulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Bodocongó (Oeste)

Afloramento	Direção de Fraturas	Direção de Mergulho	Ângulo de Mergulho
	DF	DM	AM
I'	125°, 30°, 85° e 05°.	215°, 305°, 00° e 265°.	85°, 45°, 80° e 80°.
II'	90°, 15°, 120°, 45° e 70°.	00°, 90°, 30°, 325° e 340°.	75°, 70°, 85°, 80° e 45°.
III'	90°, 110°, 175°, 120°, 80°, 130°, 70°, 110°, 10°, 75°, 110° e 30°.	165°, 15°, 85°, -, 165°, 40°, 160°, -, 270°, 80°, 75°, 85°, 90°, 50°, 85°, 85°, 90°, 40°, 340°, 205° e 120°.	75°, 65°, e 30°.
I	105°, 100°, 75°, 05°, 55°, 30°, 120°, 15° e 175°.	-, -, 175°, 95°, 135°, 295°, 30°, 285° e -.	-, 90°, 40°, 70°, 60°, 65°, 70°, 70° e -
II	105°, 165°, 120°, 165°, 100°, 90° e 125°.	195°, 75°, 40°, -, 15°, 170° e 35°	40°, 85°, 70°, 90° 65°, 80° e 70°.
III	105°, 05°, 175°, 40° e 100°.	180, 100, 90, 305, e 05.	85°, 90°, 55°, 65° e 60°.
IV	120°, 30°, 20°, 15°, 180° e 65°.	30°, 120°, 110°, 100°, 280° e 335°.	165°, 80°, 85°, 70°, 75° e 65°.
V	120°, 40°, 105° e 80°.	-, -, -, -	90°, 90°, - e 90°.

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

4.3.3 FALHAS

Uma falha regional transcorrente corta a área no sentido Leste-oeste paralelas as fraturas freqüentes de direção N105° a N120°. As fraturas são classificadas como fraturas de alta freqüência regional e freqüentes no afloramento e outro grupo de fraturas freqüentes é praticamente perpendicular as falha, com direção de N30° - 40° também classificadas como fraturas de alta freqüência regional e freqüente no afloramento.

Isto demonstra uma relação intrínseca entre os grupos de fraturas freqüentes e a direção de falha.

4.3.4 POÇOS

Nesta área há uma grande correspondência de poços ao longo das fraturas com direção de N120° - 130° de classe de fraturas freqüentes e paralelas à falha (Anexo B).

Muitos poços encontrados nas fraturas de direções de 120° - 130° nesta sub-área provavelmente relacionadas com essas fraturas. Encontram-se várias área de classe verde, com alta probabilidade de ocorrer condução de água nessas zonas de cisalhamento (Anexo B).

Também esta área mostra-se como uma área de condutividade de água devido o alto grau de fraturamento em varias direções, com ângulo de mergulho entre médio a alto, muitas interseções das fraturas freqüentes e a alinhamento destas com os poços.

É possível, nesta área, prever que as principais fraturas de condutividade de água dos poços encontram-se nas direções paralelas às falhas.

4.4 SUB-ÁREA DE RIACHÃO

Discutidos o comportamento hidrodinâmica das fraturas, falhas e poços da região leste denominada Riachão.

4.4.1 FRATURAS

As fraturas da sub-área estão representada na tabela 4.7, de dados coletados no campo e estão definidas por afloramento e classificação das fraturas, segundo a frequência de ocorrência.

Tabela 4.7 -Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Riachão (Leste)

Afloramento	Direção de foliação	Direção de fraturas	Fraturas freqüentes no afloramento	Coordenadas		
	DR	DF		Latitude	Longitude	Altitude
II	20°	20°, 20°, 95°, e 20°.	95°	07° 14' 35"	35° 51' 18"	515 m
III		180°, 140°, 20° 170°, 20°, 75°, 100° e 30°.	20°	07° 15' 19"	35° 49' 21"	385m
IV	20°	20°, 105°, 30°, 110°, 60°, 130° e 105°.	100°, 75°, 55° e 15.	07° 16' 07"	35° 47' 32"	387m
V	50°	175°, 35°, 90°, 65° e 95°.	90° e 65°	07° 16' 35"	35° 46' 23"	270m
VI		130°, 180°, 145°, 60°, 175°, 90°, 70°, 10° e 25°.	60° e 25°	07° 16' 26"	35° 44' 57"	296m
VII		40°, 120°, 155° e 105°.	120° e 105°	07° 16' 09"	35° 43' 20"	296m

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

As fraturas regionais da sub-área de leste denominada de Riachão apresentam-se em quatro grupos entre os quais dois classificados em muito freqüente e duas com média freqüência.

Grupo 1 (Fratura muito freqüente regional). – as fraturas estão na direção de N20°-30°, apresentando-se no afloramento II, III, IV e VI em um total de 06 afloramentos pesquisados.

Grupo 2 (Fratura muito freqüente regional) – as fraturas nas direções N95° - 105°, apresentando-se nos afloramentos II, III, IV e VII.

Grupo 3 (Fratura de média freqüência regional) – as fraturas nas direções N60° - 65°, apresentando-se nos afloramentos IV, V e VI.

Grupo 4 (Fratura de média freqüência regional) – são fraturas nas direções de N180°, apresentando-se nos afloramentos III, V e VI.

As direções de foliação encontradas no campo entre os quatro primeiros afloramentos foram de N20° o afloramento II e IV e N50° para o afloramento V.

As foliações de N20° não são paralelas às direções das falhas, porém existe na zona norte desta sub-área as mesmas foliações observadas nos afloramentos II a IV, e ocorre em função da intrusão existente em forma circular onde são observadas. Aparentemente as foliações são perpendicular às falhas que transcorrem a intrusão circular.

Podemos interpretar a direção de foliação de N50°, sendo paralela a direção de falha intermediária da sub-área, onde tem direções variando de N90° a N45° az próximo do afloramento V. Observa-se várias

fratura freqüentes aflorantes nesta sub-área destacando-se por conter várias fraturas com pequeno espaço entre as fraturas em cada afloramento são elas:

- a) A fratura com direção de N20° nos afloramentos III e VI.
- b) A fratura com direção de N60° nos afloramentos IV, V e VI.
- c) A fratura com direção de N105° nos afloramentos IV e VII.
- d) A fratura com direção de N120° no afloramento VII.
- e) A fratura com direção de N90° no afloramento V.
- f) A fratura com direção de N95° nos afloramentos II.

A quantidade de fraturas freqüentes tanto regional como aflorante desta sub-área caracteriza uma região de zona cisalhamento. Verifica-se a influência das falhas sobre as fraturas, onde nesta sub-área transcortada por três grande falhas distintas todas transcorrentes, resultando um alto grau de cisalhamento, como conseqüência, desenvolvimento de grande quantidade de fraturas freqüentes.

4.4.2 FALHAS

Três grandes falhas transcorrentes limitam esta sub-área, a primeira na parte norte com direção de N105° - 110°, a intermediária com variação em sua direção nesta área iniciando com N90° e mudando

para N60° e ao sul com N70°. A falha ao norte segue o sentido paralelo dos afloramentos pesquisados e termina em contato com a intrusão.

A falha intermediária existe um pegmatito no contato com a falha com evidências de derrames de magmas para o lado leste da falha.

Na falha do sul é nítido o movimento ao longo da falha transcorrentes, uma intrusão de granito que sofreu falhamento e assim deslocado um bloco para cima e outro para baixo, dando origem as duas partes, uma em contato com a cidade de queimadas e a outra mais acima, próximo à cidade de Fagundes (figura 3.1).

Observa-se que as fraturas de alta freqüência regionais não são paralelas às direções das falhas, já às fraturas de média freqüência regional são aproximadamente perpendiculares às falhas.

4.4.3 DIREÇÃO E ÂNGULO DE MERGULHO

Uma consideração nesta sub-área é a grande quantidade de fraturas freqüentes, demonstrando assim um espaçamento menor entre as fraturas, acarretando um número maior de interseção das fraturas, assim oferecendo condições para armazenamento da água.

Todavia o seu alto grau de mergulho favorece uma retenção de água numa profundidade em escala considerada de média a profunda, pois os ângulos de mergulho variam de 35° - 90°.

Entretanto, foi observado uma grande variedades de fraturas com ângulo de mergulho de médio grau, variando de 00 a 30° e média de 30 a 60°. Estas não são fraturas freqüentes, mas podem ser consideradas como fraturas de recarga para as fraturas freqüentes, onde o ângulo de mergulho das fraturas freqüentes varia de 75° a 80° (Tab. 4.8).

Tabela 4.8 -Ocorrências de fraturas quanto ângulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Riachão (Leste)

Afloramento	Direção de Fraturas	Direção de Mergulho	Ângulo de Mergulho
	DF	DM	AM
II	20°, 20°, 95°, e 20°.	110°, 110°, 00° e 115°.	40°, 35°, 90° e 45°.
III	180°, 140°, 20° 170°, 20°, 75°, 100° e 30°.	240°, 50°, 110°, 260°, 80, 10°, - e -.	65°, 15°, 80°, 55°, 45°, 35°, - e -.
IV	20°, 105°, 30°, 110°, 60°, 130° e 105°	290°, 20°, 110°, 30°, 00°, 00° e 00°.	80°, 70°, 80°, 85°, 90°, 90° e 90°.
V	50°, 175°, 35°, 90°, 65° e 95°.	320°, 270°, 110°, 180°, 315° e 170°.	65°, 75°, 40°, 75°, 75° e 80°.
VI	130°, 180°, 145°, 60°, 175°, 90°, 70°, 10° e 25°.	00°, 00°, 60°, 305°, 50°, 190°, 340°, 110° e 275°.	90°, 90°, 80°, 60°, 75°, 85°, 75°, 75° e 35°.
VII	40°, 120°, 155° e 105°.	00°, 20°, 00° e 195°.	90°, 80°, 90° e 55°.

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

4.4.4 POÇOS

Não foi possível observar detalhadamente a relação entre os poços existente e as fraturas, pois os dados sobre poços encontrados não foram suficientes para uma melhor interpretação. Mesmo assim, com os poços existentes, foi possível verificar direções preferenciais de ocorrência dos poços na direção de N105° e alguns nos vales de drenagem, com água na região nas direções N20° a N30°. Quase perpendicular às direções de falha. Essas drenagens são desenvolvidas nas direções das fraturas perpendiculares à falha

Podemos observar que poucas são as áreas de classificação verde e a maioria destas está correlacionada com fraturas verticais, dificultando uma interseção com as outras fraturas (Anexo C).

É possível sugerir que as principais fraturas condutora de água subterrânea para os poços encontram-se nas direções paralelas às falhas com N105° e N130° e as de recarga encontram-se perpendiculares entre N20° -35°.

As áreas de classificação supostamente amarelas foram determinadas através das fraturas freqüentes de direção de N105° - 130° cruzando com N20° - 30°.

Quanto às áreas de classificação vermelha, estas são muito evidentes, pois esta é uma área com muitas fraturas de ângulo de mergulho de 90° ou vertical sem zona de interseção com outras fraturas.

4.5 SUB-ÁREA DE LAGOA DE ROÇA/ALAGOA NOVA (NORTE)

4.5.1 FRATURAS

As fraturas desta sub-área estão representadas na tabela 5.9; os dados foram coletados no campo e organizados por afloramento, com classificação das fraturas quanto à frequência.

Tabela. 4.9 - Classificação de fraturas quanto à ocorrência no afloramento da sub-área de Lagoa Seca/Alagoa Nova (Norte)

Afloramento	Direção de foliação	Direção de fraturas DF	Fraturas freqüentes no afloramento	Coordenadas		
				Latitude	Longitude	Altitude
I'	96°	96° e 165°	165°	07° 11' 24"	35° 52' 05"	545 m
II'	60°	115°, 170°, 60° e 135°.	170° e 135°	07° 11' 05"	35° 51' 55"	604 m
III'	75°	75°, 00°, 135°, 145° e 165°.		07° 10' 35"	35° 51' 39"	612 m
IV'		125°, 30° e 45°.	125°, 30° e 45°.	07° 08' 35"	35° 51' 28"	578 m
V'		60°, 170° e 105°.		07° 08' 06"	35° 51' 39"	504 m
VI'	35°	35°, 140° e 80°.	35° e 140°	07° 07' 23"	35° 51' 56"	696 m
VII'	30°	30°, 135°, 115°, 45 e 130°.	30°, 135° e 45°.	07° 06' 38"	35° 52' 02"	669 m
I		140°, 145°, 40°, 05° e 85°.	145°, 05° e 85°.	07° 07' 22"	35° 49' 50"	
II	60°	35°, 115°, 140°, 80°, 05° e 160°.	35°, 115° e 140°.	07° 06' 47"	35° 49' 16"	
III	70°	50°, 150°, 30°, 160°, 175°, 90°, 120° e 70°.	70°, 150°, 30°, 175° e 120°.	07° 06' 12"	35° 48' 30"	572 m
IV	60°	150°, 140°, 120°, 165°, 130° e 170°.	140°, 120° e 60°.	07° 04' 26"	35° 48' 53"	565 m
V		05°, 60°, 120°, 90° e 35°.	60° e 120°	07° 03' 40"	35° 46' 52"	598 m

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

As fraturas freqüentes regionais desta sub-área apresentam sete grandes grupos principais de fraturas, seis fraturas muito freqüentes regional e uma de média freqüência regional. São elas:

Grupo 1 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N140° - 150°, que se apresentam nos afloramentos I, II, III, IV, III' e VI'.

Grupo 2 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N160°-170°, que se apresentam nos afloramentos II, III, IV, I', II', III', e V'.

Grupo 3 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N120°-115°, que se apresentam nos afloramentos II, III, IV, V, II', IV' e VII'.

Grupo 4 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N85°- 90°, que se apresentam nos afloramentos I, III, V, II' e V'.

Grupo 5 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N30°- 35°, que se apresentam nos afloramentos II, III, V, IV', VI' e VII'.

Grupo 6 (Fratura muito freqüente regional) - são fraturas nas direções de N130°- 135°, que se apresentam no afloramento IV, II', III' e VII'.

Grupo 7 (Fratura média freqüência regional) - são fraturas nas direções de N60°, que se apresentam nos afloramentos II, IV e V.

As direções de foliação são bem definidas nesta sub-área, as informações coletadas em campo confirmam a foliação paralela nas direções das falhas, e essa direção de foliação é de $N60^\circ - 70^\circ$, existindo uma mudança na direção da foliação no contato da intrusão de rocha plutônica com direção de $N30^\circ - 35^\circ$.

Pode-se notar também que os principais grupos de fraturas freqüentes regionais encontrados são quase perpendiculares à falha desta região, e variam de $N130^\circ - 170^\circ$, e um outro grupo de fraturas freqüentes regionais classificadas em média freqüência na direção da foliação entre $N30^\circ - 60^\circ$.

Muitas são as fraturas freqüentes de afloramento desta sub-área, e elas são:

- a) Fraturas nas direções de $N45^\circ$ observados nos afloramentos IV' e VII';
- b) Fraturas nas direções de $N60^\circ$ observados nos afloramentos IV e V;
- c) Fraturas nas direções de $N30^\circ - 35^\circ$ observados nos afloramentos II, IV', VI' e VII';
- d) Fraturas nas direções de $N85^\circ - 90^\circ$ observado no afloramento I;
- e) Fraturas nas direções de $N115^\circ - 120^\circ$ observados nos afloramentos II, III, IV, V e IV';
- f) Fraturas nas direções de $N140^\circ - 150^\circ$ observados nos afloramentos I, II, III e IV;
- g) Fraturas nas direções de $N160^\circ - 170^\circ$ observados nos afloramentos III, I' e II'.

Essas fraturas podem ser classificadas em dois grupos: o primeiro perpendicular às falhas transcorrentes e falhas indiscriminadas e o segundo com um grau de frequência de ocorrência menor, paralelo às falhas.

4.5.2 DIREÇÃO DO ÂNGULO DE MERGULHO

A direção do ângulo de mergulho das fraturas desta sub-área está representada na tabela 5.10. Estes dados foram coletados no campo, junto com as direções das fraturas e estão organizados por afloramento. São eles:

Tabela 4.10 - Ocorrências de fraturas quanto ângulo de mergulho nos afloramentos da sub-área de Lagoa Seca/Alagoa Nova (Norte)

Afloramento	Direção de Fraturas	Direção de Mergulho	Ângulo de Mergulho
	DF	DM	AM
I'	96° e 165°	355° e 70°	85° e 85°
II'	115°, 170°, 60° e 135°.	215°, 260°, 160° e 00°.	85°, 80°, 75° e 90°.
III'	75°, 00°, 135°, 145° e 165°.	155°, 260°, 60°, 75° e 260°.	70°, 60°, 60°, 35° e 70°.
IV'	125°, 30° e 45°.	00°, 315 e 150°.	90°, 45° e 45°.
V'	60°, 170° e 105°.	00°, 00°, 60°, 305°, 50°, 190°, 340°, 110° e 275°.	90°, 90°, 80°, 60°, 75°, 85°, 75°, 75° e 35°.
VI'	35°, 140° e 80°.	320°, 265° e 15°.	85°, 70° e 85°.
VII'	30°, 135°, 115°, 45 e 130°.	300°, 30°, 15°, 320° e 00°.	50°, 85°, 45°, 70° e 90°.
I	140°, 145°, 40°, 05° e 85°.	230°, 00°, 145°, 00° e 00°.	85°, 90°, 25°, 90° e 90°.
II	35°, 115°, 140°, 80°, 05° e 160°.	00°, 25°, 230°, 180°, 00° e 260°.	90°, 75°, 75°, 80°, 90° e 55°.
III	50°, 150°, 30°, 160°, 175°, 90°, 120° e 70°.	325°, 225°, 300°, 80°, 00°, 180°, 00° e 310°.	75°, 90°, 80°, 15°, 90°, 80°, 90° e 80°.
IV	150°, 140°, 120°, 165°, 130° e 170°.	00°, 00°, 40°, 00°, 45° e 00°.	90°, 90°, 55°, 90°, 60° e 90°.
V	05°, 60°, 120°, 90° e 35°.	280°, 155°, 215°, 00° e 280°.	70°, 80°, 80°, 75° e 80°.

Obs. – Todas as direções de foliação da rocha, direção fratura e direção de mergulho das fraturas referem-se ao Norte magnético.

O ângulo de mergulho das fraturas desta sub-área é alto, variando de 70° – 90° . Por outro lado, observa-se um número intermediário de fraturas de ângulo de mergulho entre 45° – 70° e pequeno número de fraturas com ângulo de mergulho entre 15° – 45° . Esta variação do ângulo de mergulho favorece a retenção de água, e a presença de grande quantidade de fraturas freqüentes, acarretando um grande número de interseção das fraturas leva a crer que esta área apresenta condições de armazenamento de água. Isso é diretamente comprovado com a existência de muito poços de profundidade rasas encontradas nesta sub-área.

Estes poços foram de grande auxílio neste estudo, pois são encontrados ao longo dos vales ou drenagem naturais, mas as direções dos vales correspondem com as direções de fraturas, comprovando a importância da hidrodinâmica das fraturas no escoamento de água.

Pode-se confirmar que as formações dos vales ocorreram nas direções das fraturas, pois são locais de fraqueza nas rochas, que facilitam a infiltração e intemperismo. Várias são as ocorrências dos vales com poços artesianos ou escavados nas direções das fraturas freqüentes. Foi observada a correlação do ângulo de mergulho dos vales com o ângulo de mergulho das fraturas, evidenciando a relação do ângulo de mergulho com o relevo do vale, isto é, quanto maior for o ângulo de mergulho das fraturas maior será a profundidade do vale.

4.5.3 FALHAS

Encontrada nesta sub-área uma falha transcorrente ao Sul, próximo à cidade de Campina Grande e duas falhas indiscriminadas ao Norte, sobre a intrusão de rocha plutônica próxima à cidade de São Sebastião de Lagoa de Roça, com a mesma direção da falha transcorrente determinando a foliação da região entre N60-70°.

Foram encontrados vários afloramentos com foliação horizontal, oferecendo melhores condições de armazenamento de água.

4.5.4 POÇOS

Vários são os poços artesanais nesta sub-área encontrados ao longo do estudo de campo, praticamente todo ao longo dos vales (Anexo D). No mapa de fratura mais uma vez, fica evidenciado uma região com bastante micro área verde, ou seja, micro área propícia ao armazenamento de água.

Esta região é ideal para fazer um estudo detalhado de fraturas no ponto de vista das condições hidrogeológicas, devido às freqüências de ocorrência das fraturas, topografia e número maior de poços existentes na região.

CAPÍTULO V

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.

5.1 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

1. Através dos resultados obtidos na integração dos conjuntos de recursos de sensoriamento remoto (LANDSAT-5), resultados estatísticos, dados bibliográficos pré-existentes e resultados do trabalho de campo foi possível o cumprimento destes resultados.

2. A utilização de reservas de água subterrânea como fonte de abastecimento hídrico é fundamental para o desenvolvimento sócio-econômico de algumas regiões, tornando-as um recurso estratégico que deve ser explorado racionalmente.

3. Analisando a assimetria da rede de drenagem e de alinhamento (fraturas) confeccionado da imagem de satélite (LANDSAT-5) de modo geral, existe um indicativo de tendência das fraturas transversais serem de fluxo de água subterrânea para as falhas. A foliação na direção da falha mostra-se como fissuras secundárias de fluxo de água subterrânea para as falha e fluxo principal para fraturas transversais.

4. A estrutura bem consolidada para expressar água subterrânea em rocha cristalina é a estrutura denominada de “riacho-fraturas”.

5. A direção relacionada com os falhamentos, identificados nas sub áreas de estudo, demonstra qualitativamente que a fratura freqüente regional transversal às falhas tem grandes indícios de fraturas armazenadoras ou transportadoras de água, com menos intensidade as fraturas aflorante transversais às falhas e não regionais, devidos serem fraturas localizadas. As fraturas transversais às falhas observadas na área de estudo são fraturas tencionais (t) do Reidel (1929) e Sadowski (1983). As fraturas tencionais apresentam abertura para facilitar fluxo ou

condutividade de fluidos. Segundo Muralidhar (1990), a condutividade da fratura depende ou é afetada pela presença de áreas de contato no plano de fratura e a magnitude da média da abertura da fratura. Sendo assim acredita-se que as fraturas tencionais são fraturas com menos áreas de contato e com maior abertura, servindo como condutoras de água.

6. Segundo os critérios adotados e estabelecidos neste estudo, as micros áreas favoráveis à pesquisa de água subterrânea foram discriminadas no mapa de fratura (anexo A a D), que reúne informações sobre estruturas geotectônicas (falhas, fraturas, fissuras, lineamentos, etc.) em combinação com os dados de poços.

7. As micro áreas dos mapas de fratura destacados de cor verde e vermelho referem-se àquelas que ocupam a posição de prioridade máxima e mínima de potencialidade e pesquisa de água subterrânea, a serem utilizadas como parâmetro de estudo. Outras áreas podem ser discriminadas através dos mesmos conceitos adotados.

8. Na micro área propícia ao estudo de água subterrânea rachurada no mapa de fratura a serem (anexo A a D, área verde) comprovam-se a existência de estruturas de fraturas configuradas em forma de cunha, ou seja, fraturas com direção de mergulho com favorecimento do seu ângulo de mergulho, conjugadas com poços já existentes.

9. Micro áreas de potencialidade mínima de armazenamento de água subterrânea delimitada no mapa de fratura (Anexo A a D, área vermelha), foram inferidas pela razão de que as fraturas de ângulo de mergulho vertical ou direção de mergulho das fraturas divergentes e não são correlacionadas com poços tubulares existentes na região.

10. A relação vale-fratura é consolidada no trabalho de campo, onde direção, sentido e ângulo de mergulho correlacionam-se diretamente com formações de vales na área de estudo (Fig. 5.1 a, b e c). Nas zonas de interseção das fraturas ou vales respectivos, sempre há indícios de presença de água. Os vales ou drenagens desenvolvidas nos sentidos de fraturas tencionais tendem a ser bem largos e bem definidos demonstrando a facilidade com que a água é conduzida nestas fraturas. Por outro lado, vales e drenagens que formam paralelos às fraturas compressionais ou paralelas às foliações tendem a ser estreitos e profundos demonstrando difíceis condições de movimento livre da água neste tipo de

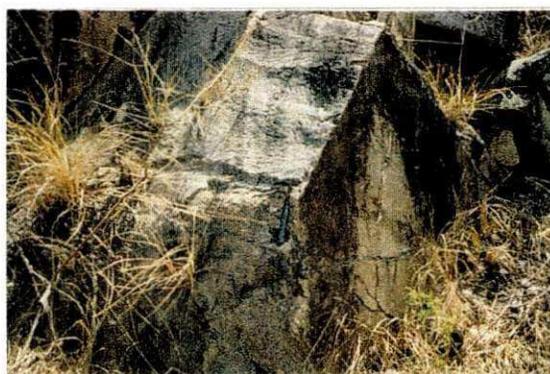
fraturas. Fraturas de ângulo de mergulho acima de 80° não tem condições de favorecer a retenção de água subterrânea.



(A)



(C)



(B)

Fig. 5.1 - Vale-fratura -(Direção, sentido e ângulo de mergulho correlacionam-se diretamente com formações de vales) A - representação das direções dos vales com poços artesianos com poço artesianos, B - fraturas no mesmo local com direção, sentido e ângulo de mergulho idêntico ao vale e C - uma aproximação das fraturas do local, afloramento de Lagoa Nova/Lagoa Seca VI'.

11. As micro áreas de potencialidade média de armazenamento de água subterrânea indicadas nos mapas de fraturas (anexo A a D, área amarela) são caracterizadas por fraturas freqüentes regionais traçadas paralelas às fraturas de mesma direção já constatada em campo, configurando um sistema de interseção de fraturas com direções de mergulho e ângulo de mergulho favorecendo o formato convergente (forma de cunha) em torno do poço existente. As zonas próximas das falhas ou zonas de cisalhamentos são locais, onde as rochas são sujeitas à fragmentação e trituração. As pesquisas anteriores confirmaram que os tamanhos das partículas fragmentadas ou trituradas diminuem gradativamente da falha para fora (Anderson et al. 1983, Newman and

Mitra, 1993, Hattori and Yamamoto, 1999). Fragmentação também pode induzir o desenvolvimento de feixes de micro-fraturas, sistemáticas e aleatórias, resultando em uma zona com características de um aquífero (Moore and Lockner, 1995, Reches and Lockner, 1994, Kusenko et al.1996). Para essa zona de cisalhamento, as fraturas tencionais podem conduzir a água, resultando em um aquífero de grande potência e recarga contínua.

12. Fraturas abertas freqüentes, interconectadas com zona de recarga de água (rios, riachos, etc.) favorecem a um armazenamento de água subterrâneo.

13. Fraturas com direção de mergulho convergente, poderão favorecer área de armazenamento de água subterrânea.

5.2 CONSIDERAÇÕES

Zona de maior permeabilidade em rocha cristalina favorece água subterrânea, acontece em zona de fraturamento com alto grau de interseção.

Seis são as condições indispensáveis para conseguir êxito nas perfurações de poços em rocha cristalina.

1. Existência de fraturamento
2. Interconexão das fraturas
3. Extensão e profundidade das fraturas
4. Frequência das fraturas
5. Abertura das fraturas
6. Conexão do sistema de fraturas com zona de recarga na superfície (rios, lagos, capeamento permeável etc.).

Com um detalhamento mais aprofundado das micros áreas propícias à água subterrânea, poderão indicar tendência do fluxo de água subterrânea das regiões.

A perfuração de poços em rochas cristalinas deve ser concentrada na interseção das fraturas e zonas de cisalhamentos, priorizando as fraturas de aberturas maiores e de recarga superficial.

Nas micros áreas selecionadas, favoráveis à pesquisa de água subterrânea, a confiabilidade na perfuração de poços e localização, ficaram condicionado a dados fornecidos pela CDRM – PB e registro bibliográfico, salvo os poços artesianos confirmados e encontrados no trabalho de campo.

A perfuração de poços deve ser no sentido do ângulo de mergulho das fraturas nas proximidades de zona de recarga se existir.

A locação de poços deve levar em consideração a inclinação do ângulo de mergulho das principais fraturas existentes.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade deste trabalho ou a consideração de novas abordagens que possam utilizá-lo com respaldo técnico poderia ser sintetizadas através dos seguintes temas:

1. Exploração dos dados georeferenciados das micro áreas propícia à água subterrânea, possibilitando uma nova gama de informações para maior confiabilidade na perfuração de poços.

2. Extensão da aplicação e metodologia utilizada, a áreas adjacentes à área de estudo, bem como a outras áreas com característica similares.

3. Utilização de métodos geoestatístico computacionais, direcionados a localização de aquíferos fissurais auxiliando na perfuração de poços.

4. Análise detalhada das áreas com imagens de TM/LANDSAT-5 e aerofoto em relação às estruturas geológicas, litológicas, vegetação, solo, umidade, topografia e drenagem. Em conjunto, poderão ajudar a delimitar as sub-áreas para investigações com GPR (Ground Penetration Radar) e outros tipos de sondagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel, Aziz Ismail Kashef. 1986. Groundwater Engineering. Ed. McGraw-Hill Book Company. New York.
- AbRH. 1987. Modelo Para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Coleção ABRH De Recursos Hídricos. Vol. 1. Nobel/ABRH.
- Albuquerque, J. do P. T. 1971. Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste: folha 15 Jaguaribe-SE. Recife SUDENE, (Série Hidrogeologia, 32).
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B. & Fuck, R. A. - 1977 – Províncias estruturais da Borborema. Atas 8. Simp. Geol. Nordeste, 363-391, SBG, Campina Grande, PB, Brazil.
- Anderson, J. L.; OSBORNE, R. H.; and PALMER, D. F. 1983. Cataclastic rocks of the San Gabriel Fault: an expression of deformation at deeper crustal levels in the San Andreas Fault zone. *Tectonophysics* 98:209-251.
- Barroso, Alberto da Silva. 1988. Diagênese e eficiência de recuperação dos reservatórios de Campo de Araçás, Bacia do Recôncavo, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 18, No 01, 97 – 98 p.(Resumo).
- Batalha, B. L., Parlatore, A. C. 1977. Controle de Qualidade de Água para Consumo Humano: Base Conceituais e Operacionais. São Paulo: CETESB.
- Becker, André Paulo. 1988. Estudo Petrológico dos Reservatórios da Formação Barreira de Itimba, no Campo de Furado, Bacia de Sergipe Alagoas. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 18, No 1, 94 - 94 p.(Resumo).
- Berdmar, Antonio Plata; SILVA, Adelbani Braz de. 1980. Utilização de isótopos ambientais na pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Karst da região do Jaíba, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências* Vol 10, 276 – 291 p
- Bertachini, Antonio Carlos. 1988. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de

- Jundiaí, S.P. . Revista Brasileira de Geociências. Vol.18, No 1, 102 - 102 p.(Resumo).
- Biscaldi, R. 1968. Hydrogeologie des roches eruptives et metamorphiques: analyses bibliographiques. Bull. BRGM, v. 3,n. 2, p. 23-24
- Borba, C. 1996. Heterogeneidades estruturais em reservatórios geometria e distribuição de falhas. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 26, No 4, 333 – 333 p.(Resumo).
- Bototto, D. M. 1994. Utilização de método isotopo de urâneo no estudo de aquíferos do Morro do Ferro, Poços de Caldas, M.G. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 24, No 1, 52 – 59 p.
- Cavalcante, I. N. 1991. Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo- área piloto de Atibaia (SP). Revista Brasileira de Geociências. Vol. 22, No 1, 118 - 118 p.(Resumo).
- Cavalcante, J. R. 1996. Previsão de comportamento de cone de água. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 26, No 1, 57 – 58 p.(Resumo).
- Celligoi, A. 1993. Recursos hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral em Londrina-PR. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 23, No 1, 110 - 111 p.(Resumo).
- CETESB. 1974. Água, Qualidade, Padrões de potabilidade e poluição. São Paulo.
- Cleary, M. T. C. F. B. 1993. Investigação através de modelos matemáticos em microcomputadores dos aquíferos dos principais parâmetros hidrogeológicos e dos processos atenuantes de transportes na delineação de área de proteção de poços (APPs) e na remediação de aquíferos contaminados. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 23, No 2, 174 - 174 p.(Resumo).
- Costa, W. D. 1986. Análise dos fatores que atuam nos aquíferos fissurais: área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Dissertação (Doutorado) – Instituto de geociências, USP. 225 p.
- Crepani, Edison. 1988. Análise de fraturas através de imagens fotográficas da baixa resolução espacial: uma combinação ao estudo da evolução tectónica da região da Chapada do Araripe-NE do Brasil. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 18, No 1, 104 - 104 p.(Resumo).

- Cruz, W. B.; Peixoto, C. A. 1991. A evolução química das águas subterrânea de Poços de Caldas – M.G. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 212, No 1, 23 - 23 p.(Resumo).
- CRUZ, Waldemir Barbosa de; PEIXOTO, Carlos Alberto de Mello 1989. As águas subterrâneas de Poços de Caldas, M.G. – Estudos experimentais das iterações água-rocha. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 19, No 1, 76 –86p.
- Custodio, Emilio; Lamas, Manoel Ramóm. 1976. Hidrologia Subterrânea. Ed. Omega S. A. Vol. 01 – 1a. Edição. Baelona.
- Dantas Filho, João Ramalho. 1996. Identificação de área propícia à pesquisa de água subterrânea através de imagens TM/LANDS T-5 nas microregiões homogênea Curimataú (MRH 910) e Seridó Paraibano. Campina Grande – DEA/ CCT/ UFPB, 88 p. (Dissertação de Mestrado).
- Davis, S. N., Dewiest, R. J. M. 1966. Hydrogeology. New York: Jonh Wiley.
- Davis, S. N., Turk, L. J. 1964. Optimun depth of wells in crystalline rocks. Groundwater, v. 2, p.6-11.
- DNPM/ABINAM. 1996. Água mineral do Brasil – retrato histórico da indústria engarrafadora. Ed. Arte & Ciência.
- Ebert, H. 1970 – The precambrian geology of the Borborema Belt (NE-Brazil) and the origian of its mineral province. Geol. Rundschau.
- Editora Abril. Revista Veja. São Paulo, 28.03.1996 e 04.06.1997.
- Etchebehere, M.L.C.1991. Modelo de exploração mineral aplicada á pesquisa de fontes termais no planalto de Poços de Caldas, M.G. – SP. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 21, No 4, 392 - 392 p.(Resumo).
- Falkenmark, M. & Windstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. Population Bulletin (Anais Congresso ABRH – Recife. “Aspecto de Sustentabilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos – Stress Hídrico”)
- Feitosa, F. A. Carneiro., Manoel Filho, 1997. João. Hidrogeologia: CPRM, Labhid-UFPE, 412 p.

- Fenzl, N. 1994. Estudo da permeabilidade em rocha fissurada e carstificada da região de Neve Welt, Austrália. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 24, No 1, 60 - 65p.
- Freeze, R. Allan; Cherry, John A. 1979. *Groundwater*. Ed. Prentice – Hall. Englewood Cliffs.
- Gomes, Francisco Vilmar Moreira; Cabral, Francisco Clodoriano Fernandes. 1981. Uso dos Isótopos Naturais de Urânio nos estudos de água subterrânea no aquífero calcário Bambuí (Ba). *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 11, 179 – 184 p.
- Guedes, Florisvaldo Xavier. 1993. Aplicação de dados de sensores remotos de baixa resolução espacial na pesquisa de água subterrânea: bacia do Rio do Peixe e Adjacências. Campina Grande – DEC/ CCT/ UFPB, 111 p. (Dissertação de Mestrado).
- IBGE. 1991. Censo Demográfico. Centro de Documentação e Disseminação de Informações – CDDI/IBGE.
- Iash, Fao and IAH. 1965. *Hydrology of Fractured Rocks – Proceeding of the Dubrovnik Symposium (Organized by the UNESCO)*. Vol. I.
- Iritani, M. A. 1993. Potencial hidrogeológico da Cidade Universitária de S.P. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 23, No 2, 175 - 175p.(Resumo).
- Karrenberg, H. 1981. *Hydrogeologie der Nichtverkarstungsfähigen Festgestein*. New York; Springer Verlag.
- Kovacs G. Associates. 1981. *Subterranean Hydrology (Water Resources Publications)*. Littleton.
- Legrand, H. E. 1962. Perspective on problems of hydrogeology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 73, p. 1147-1152.
- Lima A. L. de; Macedo, Jose W. P. 1983. Estudo da distribuição de água salgada nos aquíferos costeiro da Região de Caravelas/Alcobaça por prospecção elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 13, No 3, 159 – 164 p.
- Lima, Olivar A. L. De. 1983. Filtração de membrana e a salinização de água subterrânea: aplicada a aquíferos das Bacias do Recôncavo e Tucano. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 13, No 1, 23 – 26 p.

- Lima, Olivar A. L. de; Miranda, Telha A. D. 1988. Condições hidrogeológicas dos aquíferos artesianos na região do complexo Petroquímico de Camacari Bahia. . Revista Brasileira de Geociências. Vol. 18, No 1, 43 - 49 p.
- Manoel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetro hidráulico em meio fissural. Dissertação (Doutorado) – Instituto de Geociências, USP. 197p.
- Mendes, Jose Benetti. 1988. Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de água subterrânea. . Revista Brasileira de Geociências. Vol. 18, No 1, 103 - 103 p.(Resumo).
- MME/DNAEE.1992. Disponibilidade hídrica do Brasil. DNAEE
- Moore, D. E., and Lockner, D. A. 1995. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *J. struct. geol.* 17:95-114.
- Muralidhar, K. 1990. Flow and Transport In Single Rock Fratures. *J. Fluid Mech.* (1990), Vol. 215, 481-502.
- Newman, J., and Mitra, G. 1993. Lateral Variations in Mylonite Zone Thickness As Influenced by Fluid-Rock Interactions, Linville Falls Fault, North Carolina. *J. Struct. Geol.* 15:849-863.
- Oliveira, Patrice Rolando da Silva. 1992. Estudo hidrogeológico de um aquífero aluvial com barragens subterrâneas na região de Santa Lúcia. Campina Grande – DEC/ CCT/ UFPB, 107 p. (Dissertação de Mestrado).
- Oliveira, Iara B. de; LIMA, Olivar A. L. de. 1986. Estudos das condições hidrogeológicas e hidroquímicas dos aquíferos da região Biritinga-Pataíba (Ba) utilizando método geofísico elétrico. *Revista Brasileira de Geociências.* Vol. 16, 176 p.
- Pinto, Nelson L. de Sousa; Holtz, Antônio C. Tatit; Martins, José A.; Gomide, Francisco L. S. 1976. *Hidrologia Básica.* Ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo.
- Rebouças, Aldo da Cunha. 1971. *As Águas Subterrânea no Nordeste (Estimativa Preliminar).* SUDENE (Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste) – Série Hidrogeologia No 06. Recife.
- Reches, Z., and Lockner, D. A. 1994. Nucleation and Growth of Fault In Brittle Rocks. *J. Geophys. Res.* 99:18,15918,173.

- Riedel, W. 1929. Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. *Cenyalb.F.Min.Geol. Pal., Abt.B*, 354-368.
- Rocha, G. A. 1988. Carta hidrogeológica a escala de 1:2.000.000, texto explicativo, Republica Oriental del Uruguay. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 18, No 1, 105 - 107 p. (RESENHA).
- Ros, Luiz Fernando de. 1986. Petrologia e caracterização de reservatório da Formação Sergi (Jurássico) no Campo de Sesmaria, Bacia do Recôncavo, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 16, No 4, 419 p.(Resumo).
- Sadowski, G.R. 1983. Sobre A Geologia de Cinturões de Cisalhamentos Continentais. Tese (Liver Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 108p.
- Santos, Nelson Césio Fernandes. 1992. Estudo do comportamento de aquíferos aluviais no período seco no semi-árido do nordeste brasileiro. Campina Grande – DEC/ CCT/ UFPB, 149 p. (Dissertação de Mestrado).
- Server, C. W. 1964. Geology and groundwaterresources of crystalline rocks: Dawson County, Geogia. Geological Survey, Information Circular, 30.
- Silva, Fernando Fernandes da. 1998. Investigação e modelamento do fluxo subterrâneo em aquífero aluvial no semi-árido da Paraíba. Campina Grande – DEC/ CCT/ UFPB, 99 p. (Dissertação de Mestrado).
- Silva, Rosa Beatriz Gouveia da. 1983. Estudo hidroquímico e isotópicos das águas subterrâneas dos aquíferos Botucatu no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 13, 207 p. (Resumo).
- Siqueira; Torquato, Haroldo Barbosa de Joaquim Raul F.; Santiago, MarluCIA Freitas; Frischkorn, Host. 1980. Contribuição ao estudo dos isótopos e químico dos aquíferos da região de Frecheirinha-Ceará. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 10, 546 – 552 p.
- Sopper, Ralph H. 1977. Geologia e Suprimento D'agua Subterrânea no Rio Grande do Norte e Paraíba. DENOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) – Série I. D. Geologia No 26. Rio de Janeiro.
- Sturart, W. T., Brown, E. A, Rhodehamel, E. C.1954. Groundwater investigations of the Marquette ironming district. Michigan Geol. Surv.Div., n. 3.

- Tolman, C. F. 1937. Groundwater. New York: McGraw-Hill.
- U. S. Departamento of the Interior. 1981. Groundwater Manual (A water Resources Tecnical Publication). Denver.
- Villela, Swami Marcondes; Mattos, Arthur. 1975. Hidrologia Aplicada. Ed. McGraw-Hill do Brasil LTDA. São Paulo.
- Vujica, Yevjevick. 1976. Probability and Statistics in Hidrology. Ed. Fot Collins. Colorado.
- Yamamoto, H., and Hattori, I. 1998. Geological Laboratory, Fukui University, Fukui 910-8507, Japan.
- WMO (Wold Meteorological Organization). 1979. Aplicacion of Remote Sensing to Hidrology. Geneva.

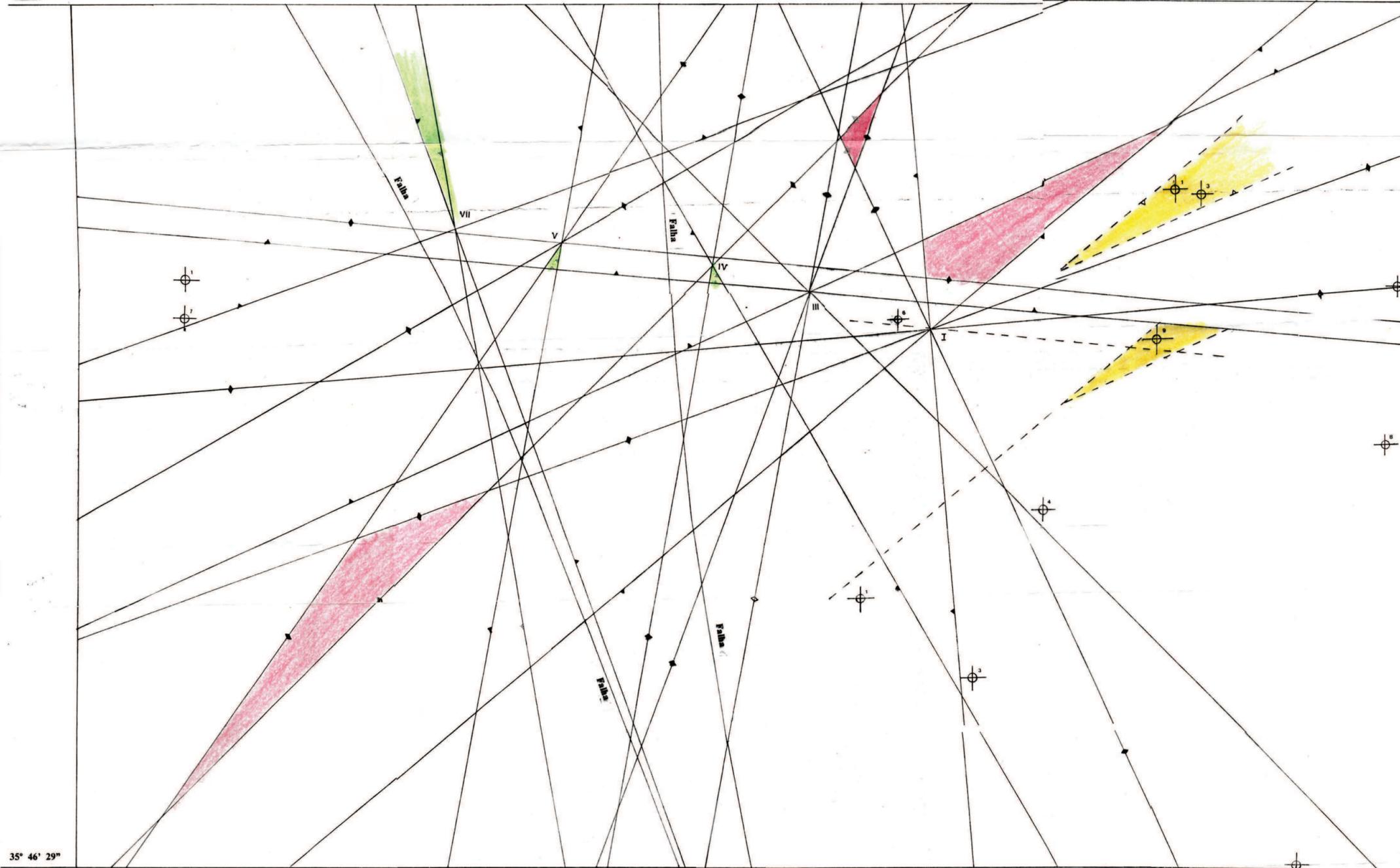
ANEXOS

ANEXO A

MAPA DE FRATURAS
REGIÃO DE QUEIMADAS (SUL)

MAPA DE FRATURAS REGIÃO DE QUEIMADAS (SUL)

35° 56' 44"



35° 46' 29"

07° 26' 01"

07° 10' 18"



- Fraturas paralelas as fraturas frequentes
- Fraturas coletadas no campo
- ▲ Direção de mergulho da fratura
- { I, II, I' ... n } Afloramento (Ponto de coleta das fraturas)
- ~ Falha
- ⊙ Cidade

- Poços Perfurados:
- ⊙ A Poço tubular (A = quantidade de poços no local)
 - ⊙ Poço artesiano

- Micro áreas favoráveis a pesquisa de água subterrânea:
- Vermelha - Micro área não favorável
 - Amarela - Micro área propícia
 - Verde - Micro área favorável

ESCALA 1:50.000



Anexo: A
Autor: Cloves Rogério da Silva Costa

ANEXO B

MAPA DE FRATURA

REGIÃO DE BODOCONGÓ (OESTE)

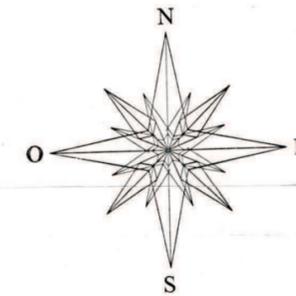
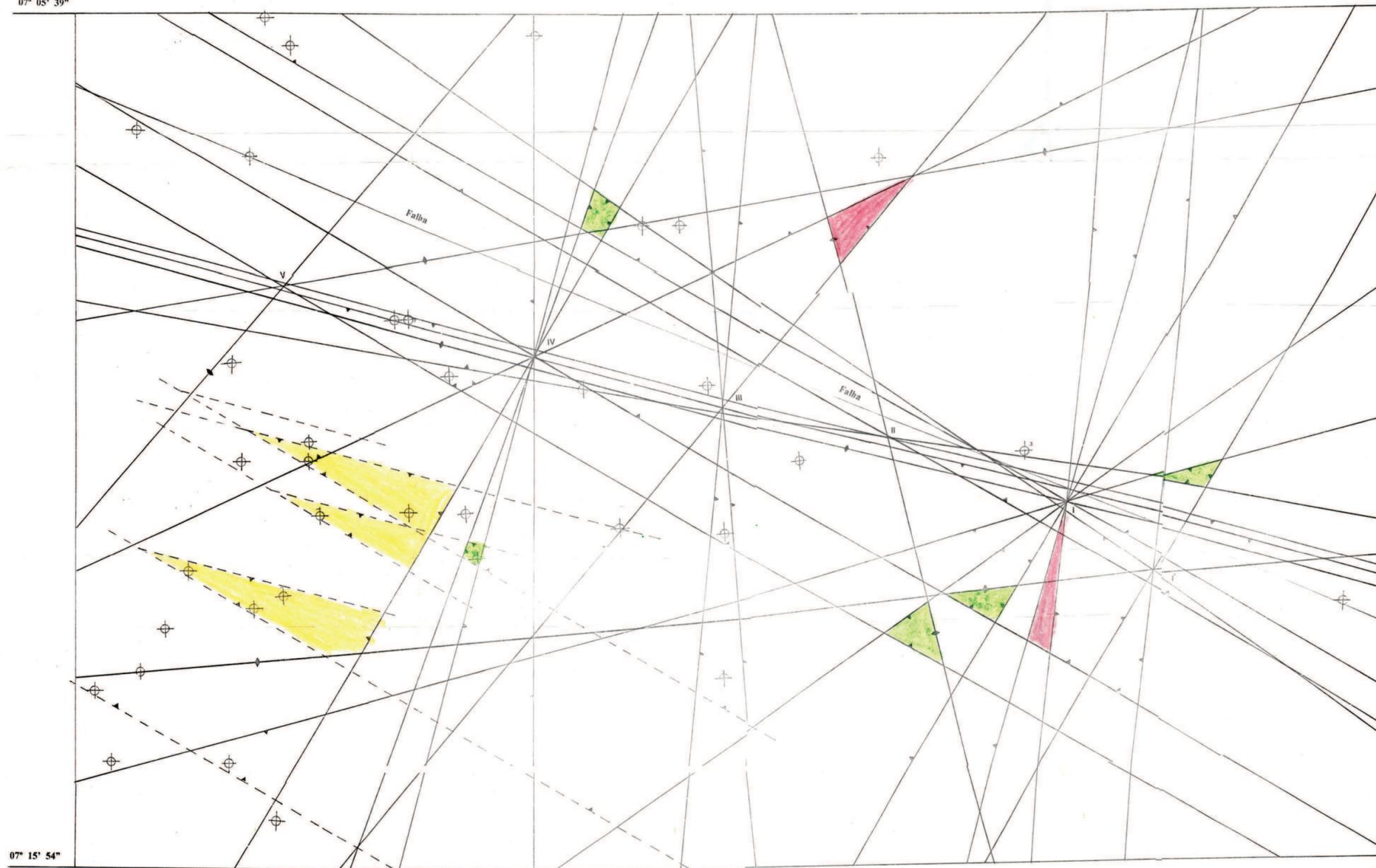
MAPA DE FRATURAS REGIÃO DE BODOCONGÓ (OESTE)

07° 05' 39"

07° 15' 54"

36° 09' 38"

35° 53' 55"



Convenções:

-  Fraturas paralelas as fraturas frequentes
-  Fraturas coletadas no campo
-  Direção de mergulho da fratura
-  Afloramento (Ponto de coleta das fraturas)
-  Falha
-  Cidade

Poços Perfurados:

-  Poço tubular (A = quantidade de poços no local)
-  Poço artesiano

Micro áreas favoráveis a pesquisa de água subterrânea:

-  Vermelha - Micro área não favorável
-  Amarela - Micro área propícia
-  Verde - Micro área propícia

ESCALA 1:50.000



Anexo: B

Autor: Cloves Rogério da Silva Costa

ANEXO C

MAPA DE FRATURA
REGIÃO DE RIACHÃO (LESTE)

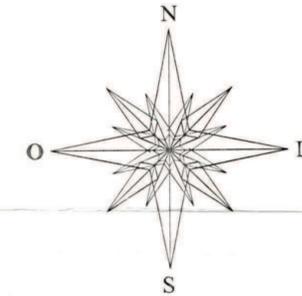
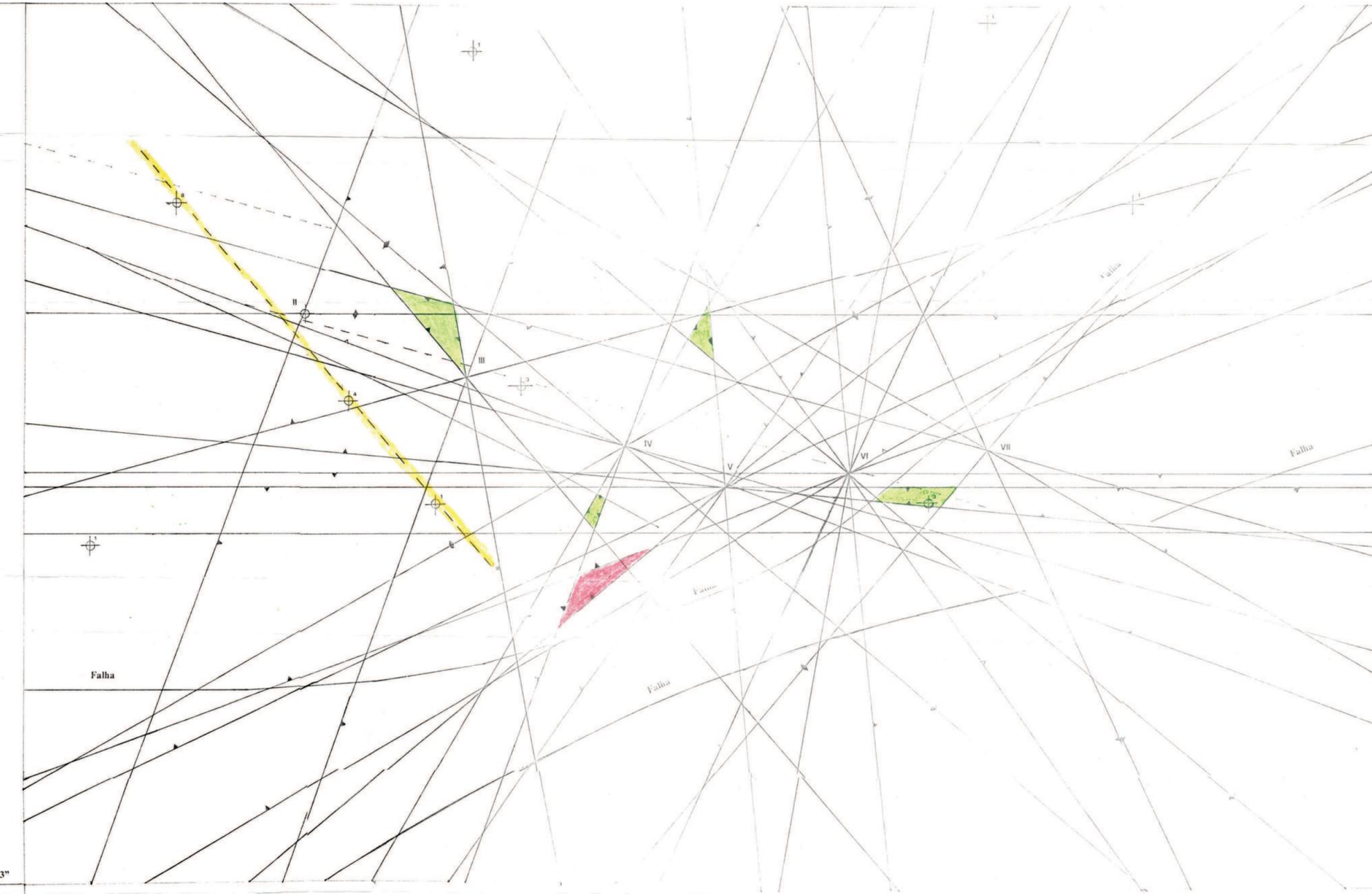
Dissertação de Mestrado:

Hidrocinâmica e Análise Quantitativa das Fraturas nas Rochas Cristalinas da Região de Campina Grande - PB.

MAPA DE FRATURAS REGIÃO DE RIACHÃO (LESTE)

07° 10' 58"

07° 21' 13"



Convenções:

- Fraturas paralelas as fraturas frequentes
- Fraturas coletadas no campo
- Direção de mergulho da fratura
- Afloramento (Ponto de coleta das fraturas)
- Falha
- Cidade

Poços Profundos:

- Poço tubular (A = quantidade de poços no local)
- Poço artesanais

Micro áreas favoráveis a pesquisa de água subterrânea:

- Vermelha - Micro área não favorável
- Amarela - Micro área propícia
- Verde - Micro área favorável

ESCALA 1:50.000



Anexo C

Autor: Cloves Rogério da Silva Costa

ANEXO D

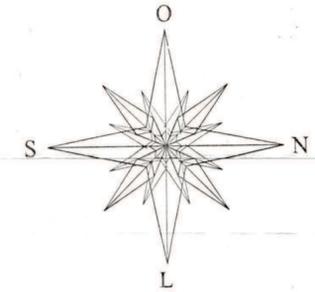
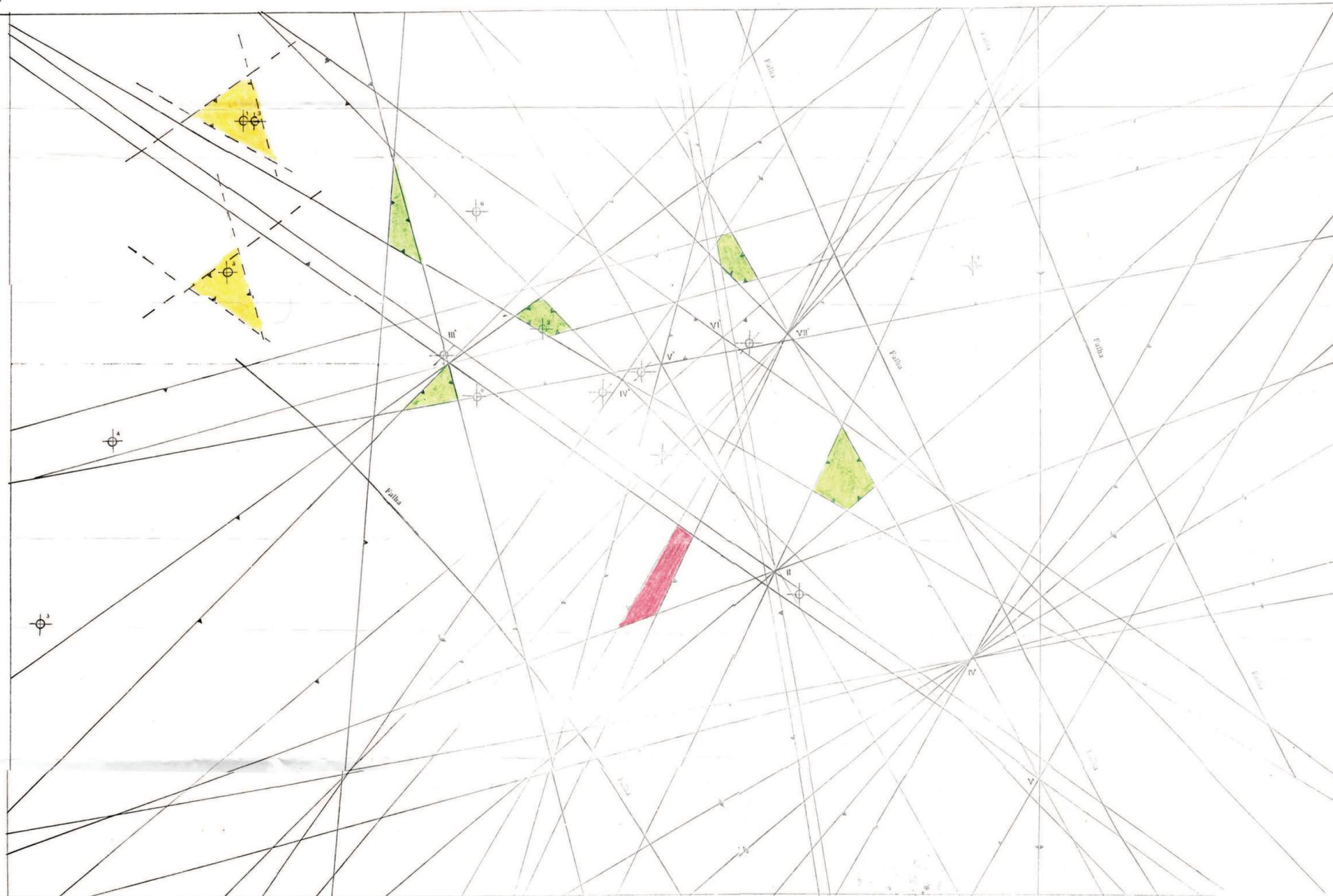
MAPA DE FRATURAS

REGIÃO DE ALAGOA NOVA/ LAGOA SECA
(NORTE)

MAPA DE FRATURAS REGIÃO DE ALAGOA NOVA/ LAGOA SECA (NORTE)

35° 55' 44"

35° 45' 29"



Convenções:

- Fraturas paralelas - fraturas frequentes
- Fraturas coletadas no campo
- ▲ Direção de mergulho da fratura
- { I, II, I' ... n } Afloramento (Ponto de coleta das fraturas)
- ~ Falha
- Cidade

Poços Perfurados:

- A Poço tubular (A = quantidade de poços no local)
- Poço artesiano

Micro áreas favoráveis a pesquisa de água subterrânea:

- Vermelha - Micro área não favorável
- Amarela - Micro área propícia
- Verde - Micro área a favorável

Anexo D

Autor: Cloves Rogério da Silva Costa

ESCALA 1:50.000



07-000-000