

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5634-PUD/067

USO E APLICAÇÕES DE SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DO
POTENCIAL E EXPLORAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA: UMA ABORDAGEM
METODOLÓGICA

Sergio Azevedo Marques de Oliveira

Monografia referente ao exame de Integrado em Sensoriamento
Remoto aprovado em 10.04.1995

INPE
São José dos Campos
Junho de 1995

RESUMO

O presente trabalho envolve uma revisão de assuntos abordados em estudos de metodologias pertinentes à ocorrência e exploração de água subterrânea em rochas cristalinas. Dentre os assuntos relacionados destacam-se a análise de fraturamentos que se desenvolvem principalmente em zonas de cisalhamento; técnica de fotointerpretação com seus respectivos métodos, ressaltando-se o método sistemático de fotointerpretação, adaptado para o campo das ciências geológicas utilizando imagens fotográficas orbitais; feições estruturais que podem ser observadas em imagens orbitais; fatores que possuem influência na capacidade do aquífero em rochas cristalinas; estudo da forma de ocorrência de água subterrânea em meios fraturados e aplicações de sensoriamento remoto na pesquisa de água subterrânea. O trabalho dá destaque ao estudo das feições tectono-estruturais, levando em consideração que o fluxo da água através das fraturas é a forma mais característica da infiltração e armazenamento da água subterrânea.

GROUNDWATER RECONNAISSANCE AND EXPLORATION BY REMOTE
SENSING: A METHODOLOGICAL REVIEW

ABSTRACT

The present work is a review of methodological studies related to the current exploration of groundwater in crystalline rocks. Some of the subjects reviewed are: (1) fracture analysis in shear zones; (2) photogeological techniques applied to satellite imagery; (3) structural mapping in satellite imagery; (4) influential factors in crystalline aquifers; (5) groundwater occurrence studies in fracture zones and (6) remote sensing applies in groundwater studies. The work emphasizes the study of tectonic-structural features, considers the waterflow through fractures being the most characteristic way of infiltration and stock of groundwater.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
1 <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 <u>ANÁLISE DE FRATURAMENTOS</u>	2
3 <u>TÉCNICA DE FOTOINTERPRETAÇÃO</u>	8
3.1 - Métodos de fotointerpretação.....	8
3.1.1 - Método sistemático.....	9
3.2 - Feições estruturais em produtos de sensoriamento remoto.....	13
4 <u>FATORES QUE INFLUEM NA OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MEIOS FRATURADOS</u>	16
4.1 - Integração de dados.....	17
5 <u>OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MEIOS FRATURADOS</u>	18
6 <u>TÉCNICA DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADA À PESQUISA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA</u>	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Fraturas de cisalhamento desenvolvidas sob ensaio de compressão triaxial, e relacionamento entre os planos de fratura e o campo de tensões responsável por seu desenvolvimento.....	3
2 - Modelo de desenvolvimento de falhas e fraturas em uma zona de cisalhamento.....	4
3 - Relação entre a elipse de deformação e os elementos estruturais originados por um binário de cisalhamento dextrogiro.....	5
4 - Propriedades que caracterizam as formas da rede de drenagem e do relevo.....	11
5 - Caracterização do relevo através da análise do par "luz-sombra".....	12
6 - Elementos do meio fraturado.....	20

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Estruturas e combinações de elementos estruturais segundo ordem de prioridade.....	23

1 - INTRODUÇÃO

O território brasileiro possui cerca de 60% de sua área constituída por rochas cristalinas, das quais os granitos, gnaisses diversos, xistos variados, quartzitos, filitos, anfibolitos, são as mais características.

As rochas cristalinas, são também chamadas de rochas "duras" e, quando não sofrem processos de intemperismo e/ou fraturamento, apresentam porosidade e permeabilidade desprezível.

Em relação à água subterrânea, considerando as rochas cristalinas como um meio heterogêneo e anisotrópico, a pesquisa hidrogeológica deve se restringir, em geral, às zonas fraturadas.

No meio aquífero fraturado, a porosidade é estritamente função das fraturas, não havendo uma distribuição homogênea em todo o aquífero, mas variando muito de um ponto a outro.

Desta forma, a porosidade é praticamente nula em uma determinada zona do maciço onde não haja fraturas, podendo ser relativamente elevada numa outra zona, onde ocorra uma concentração de fraturas.

A interseção das fraturas de modo a permitir a circulação da água, estabelecendo uma rede aquífera em subsuperfície, determina a permeabilidade do meio.

A produção de água é então função direta da infiltração e acumulação em sistemas de fraturas e, além disso, se estas são abertas ou fechadas.

A abertura da fratura relaciona-se, originalmente, ao regime de esforços sob a qual foi originada. É importante observar que, por sua própria gênese, os planos de ruptura por tração gerados em regime distensivo tendem a ser abertos, favorecendo desta forma a circulação e armazenamento da água subterrânea.

Do ponto de vista da água subterrânea, verifica-se então que as feições estruturais mais importantes, são as originadas em regime rúptil.

Considerando-se ainda, uma camada de competência média a alta sendo comprimida horizontalmente, em condições que propiciem um dobramento acompanhado de fraturamento, deve ser levado em conta que o dobramento gera tensões

secundárias, que diferem ao longo da espessura da camada dobrada.

Desta forma, a análise estrutural que interessa para a hidrogeologia refere-se sobretudo ao fraturamento das rochas e, secundariamente, ao dobramento, ou seja, fraturamento associado ao dobramento.

A aplicação do sensoriamento remoto à pesquisa hidrogeológica, deve levar em conta que o "tratamento e a interpretação de dados de sensoriamento remoto a nível orbital, permite que se construa um modelo evolutivo tectono-estrutural a partir do qual se possa reconhecer as principais feições dúcteis, rúpteis-dúcteis e rúpteis, resultantes das deformações que ocorreram na região de estudo. Desta forma, é possível definir quais feições estruturais de origem distensivas, tem maiores possibilidades de dar origem às redes aquíferas" (Veneziani e Rocio, 1991).

Por outro lado, a interpretação de imagens em sensoriamento remoto pode auxiliar na identificação de outros fatores indicadores das condições hidrogeológicas de uma área, como a determinação dos litotipos e composição da cobertura de alteração e, principalmente, no estudo do padrão de drenagem.

2 - ANÁLISE DE FRATURAMENTOS

Apesar de todas as limitações envolvidas em exercícios de modelagem, a reprodução de um determinado arranjo de estruturas em escala de laboratório, através do estudo da mecânica das rochas, conduz à confecção de modelos e a compreensão dos processos atuantes.

De modo bastante simplificado, pode-se atribuir os elementos estruturais de uma determinada associação a um triedro de esforços compressivos principais (σ_1 , σ_2 , σ_3), que mantém relações angulares bem definidas com respeito às estruturas por ele originadas (Figura 1).

Observa-se nesta figura, a relação entre o campo de esforços aplicados em uma amostra de rocha levada à ruptura num ensaio triaxial, e o padrão de fraturamento resultante. Os planos de cisalhamento aparecem a cerca de 30° do eixo de máximo esforço compressivo (σ_1) e contém o eixo do esforço compressivo secundário (σ_2). O eixo do mínimo esforço compressivo (σ_3) completa o triedro de confinamento do corpo de prova. Este triedro constitui o campo de tensões, cuja posição espacial definirá o

aparecimento de falhas normais, de empurrão/inversas ou transcorrentes.

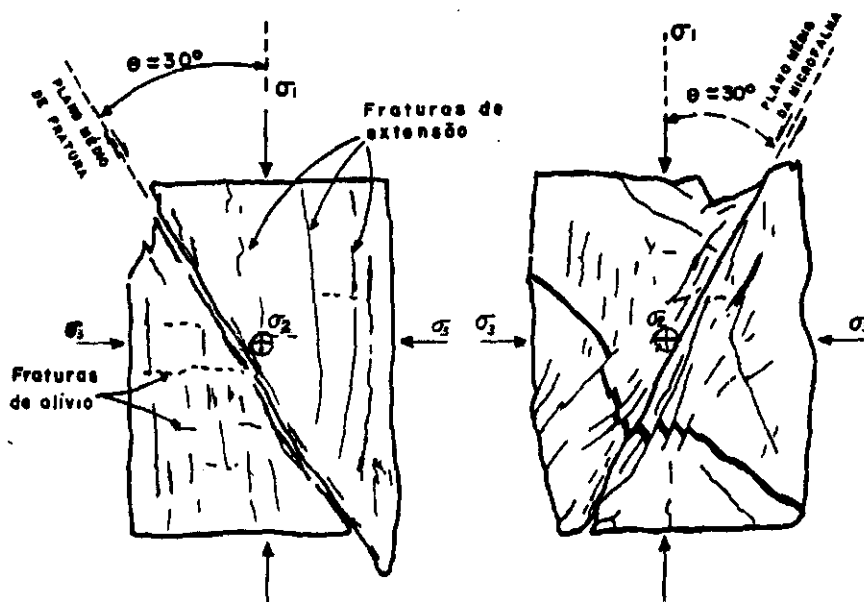


Fig. 1 - Fraturas de cisalhamento desenvolvidas sob ensaio de compressão triaxial, e relacionamento entre os planos de fratura e o campo de tensões responsável por seu desenvolvimento.

FONTE: Loczi e Ladeira (1976), p.20.

Sampaio (1987) comenta que os corpos rochosos quando submetidos a tensões direcionadas (figura 1) são rompidos segundo três famílias principais de fraturas: fraturas de cisalhamento, que ocorrem geralmente sob a forma de pares conjugados, os quais fazem entre si um ângulo próximo a 60° cuja bissetriz tem a direção da tensão principal (σ_1); fraturas de distensão, extensão ou tração, que ocorrem com direção comumente paralela aos eixos σ_1 e σ_2 , sendo geralmente abertas; fraturas de alívio ou relaxamento, distribuídas segundo uma direção aproximadamente normal a de σ_1 .

Sadowski (1983) analisa o modelo de Riedel e comenta que, de forma extremamente básica, este modelo define para uma zona de cisalhamento, quatro famílias de fraturas secundárias que se desenvolvem em função dos

esforços de compressão e tração associados a um binário. Tais fraturas foram designadas T, R, R_1 e P. A família T, representa fraturas de tração. R e R_1 , representam fraturas de cisalhamento sintética e antitética respectivamente, formando um par conjugado de aproximadamente 60° e simétrico em relação a T. A família P representa fraturas sintéticas e simétricas a R em relação à direção de cisalhamento principal. Desta forma há três famílias de fraturas cisalhantes secundárias, excluindo a zona de cisalhamento principal e suas paralelas, das quais apenas as fraturas R_1 são antitéticas (Figura 2).

Sadowski (op. cit.) modificou o modelo proposto por Riedel, adicionando duas outras famílias de fraturas: as fraturas Y, paralelas à zona de cisalhamento principal; e as fraturas X, simétricas a R_1 em relação à direção da zona de cisalhamento (Figura 2).

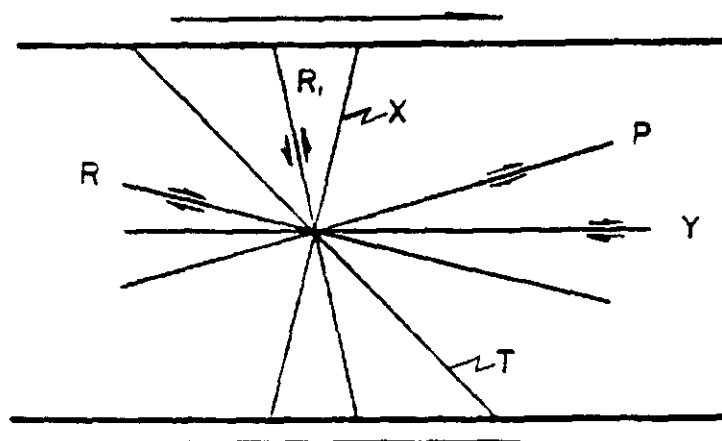
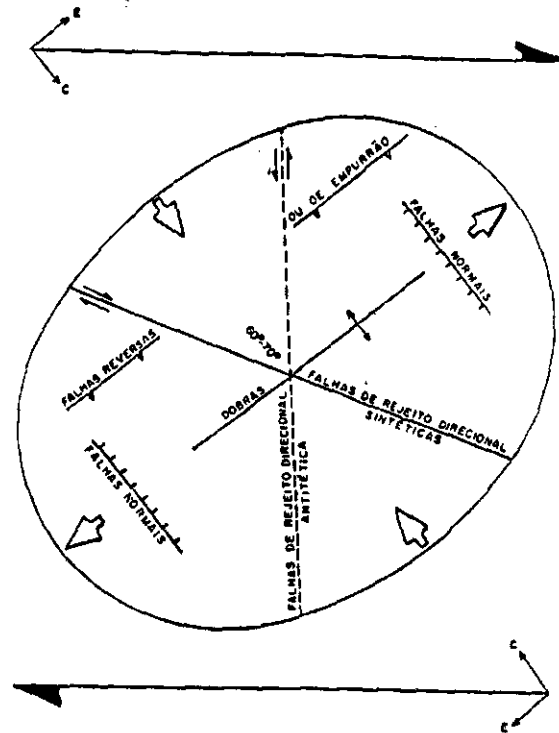


Fig. 2 - Modelo de desenvolvimento de falhas e fraturas em uma zona de cisalhamento.

FONTE: Sadowski (1983), p.38.

Harding (1974) propõe um modelo de deformação em zona de cisalhamento transcorrente que considera as fraturas de cisalhamento conjugadas R_1 e R, como de caráter antitético e sintético, respectivamente, de acordo com o modelo de Riedel. O modelo de Harding apresenta também dobramentos, falhas normais e de empurrão (Figura 3).



C - Vetor de compressão derivado do cisalhamento transcorrente

E - Vetor de extensão derivado do cisalhamento transcorrente

Fig. 3 - Relação entre a elipse de deformação e os elementos estruturais originados por um binário de cisalhamento dextrogiro.

FONTE: Harding (1974), p. 1291.

As zonas de cisalhamento são definidas por Ramsay (1987) como zonas planares ou curviplanares de alta deformação, as quais possuem grandes extensões em relação à sua espessura (razão comprimento/espessura maior que 5:1), sendo também circundadas por rochas que mostrariam um baixo estado de deformação gradativo.

Segundo Ramsay (1987) zonas de cisalhamento podem ser divididas em zonas de cisalhamento dúcteis, onde o estado de deformação varia continuamente dentro da zona; zonas de cisalhamento rúpteis, onde os limites são separados por uma descontinuidade ou superfície de fratura e vários tipos intermediários conhecidos como zonas de cisalhamento rúpteis-dúcteis, combinando essas feições geométricas em diferentes proporções.

Hasui (1988) considera que as feições estruturais caracterizadas como zonas de cisalhamento "têm espessura submilimétrica a decaquilométrica e extensões que alcançam até centenas de quilômetros. Aquelas de porte reduzido são referidas como bandas de cisalhamento ("shear bands"). Um feixe de zonas de cisalhamento, com ramificações, convergência e anastomose, isolando fatias e lentes menos deformadas, afetando grande faixa linear, constitui o que se chama cinturão de cisalhamento ("shear belt").

Ainda segundo Hasui (op. cit.), as zonas de cisalhamento podem ser rúpteis ou dúcteis, geradas por deformação coaxial ou não coaxial.

- Deformação coaxial rúptil

Na deformação coaxial rúptil, as descontinuidades que se desenvolvem são as de partição (tração, distensão) e de cisalhamento (que normalmente aparecem em pares conjugados simétricos).

As fraturas de partição contêm os eixos σ_2 e σ_1 , sendo perpendiculares a σ_3 . Também podem aparecer fraturas de partição contendo σ_2 sendo simétricas a σ_1 e σ_3 , formando ângulos em torno de 30° com σ_1 .

As fraturas de cisalhamento, na continuidade da deformação, permitiriam deslocamentos relativos dos blocos, constituindo falhas ou zonas de cisalhamento rúptil.

- Deformação coaxial dúctil

Na deformação coaxial dúctil há apenas escoamento plástico. Os elementos estruturais afetados são distorcidos basicamente em função de achatamento na direção Z, estiramento na direção X e encurtamento ou estiramento na direção Y.

Ao se correlacionar feições planares como camadas estratigráficas ao modelo de deformação coaxial dúctil,

verifica-se que o comportamento das camadas pode estar associado a dobramento (encurtamento) e boudinage (estiramento).

- Deformação não-coaxial rúptil

Na deformação não-coaxial rúptil, as descontinuidades que se desenvolvem são as mostradas na figura 2. Estas são as fraturas de tração (T), fraturas de cisalhamento sintética e antitética (R e R_1 , respectivamente), fraturas sintéticas secundárias (P), fraturas paralelas às bordas da zona de deformação (Y) e as fraturas simétricas a R_1 em relação à direção do binário cisalhante (X).

- Zonas de cisalhamento rúptil

As zonas de cisalhamento rúptil são marcadas por produtos de fragmentação e moagem (rochas cataclásticas), espelhos de falha, estrias de atrito e outras feições.

A fragmentação se processa com o desenvolvimento de microfissuras esparsas e não orientadas, que adensam e ampliam até a formação de fraturas e o começo do deslocamento (fluxo cataclástico). Este processo conduz à redução do tamanho de grãos (cominuição) progressivamente, tendendo a constituir "farinha de falha" ("fault gouge") ultrafina. Em estádios intermediários coexistem fragmentos e "farinha". Os produtos da cominuição podem ser coesos e não coesos, sempre envolvendo aumento de volume podendo ainda estar cimentados ou não por materiais precipitados a partir de soluções percolantes.

- Zonas de cisalhamento dúctil

As zonas de cisalhamento dúctil podem ser geradas por cisalhamento e por redução de volume, não sendo comuns as geradas apenas por este segundo mecanismo. Hasui (1988) cita seis tipos de zonas decorrentes das combinações destes dois mecanismos.

- 1) zonas de cisalhamento produzidas por cisalhamento não-coaxial heterogêneo, designadas bandas S ("S-bands");
- 2) zonas de deformação concentrada decorrentes de redução de volume, designadas bandas P ("P-bands") ou faixas ou zonas de dissolução, que são reconhecidas principalmente pela concentração de resíduos insolúveis concentrados "in situ" após a remoção dos materiais móveis;

- 3) zonas de cisalhamento formadas por cisalhamento não-coaxial heterogêneo, com mudanças de volume, designadas bandas PS ("PS-bands");
- 4) zonas de cisalhamento resultantes de deformação homogênea mais cisalhamento não-coaxial heterogêneo;
- 5) zonas de cisalhamento produzidas por deformação homogênea, com mudança de volume;
- 6) zonas de cisalhamento geradas por deformação homogênea, cisalhamento não-coaxial heterogêneo e mudança de volume.

3 - TÉCNICA DE FOTOINTERPRETAÇÃO

A fotointerpretação pode ser definida como o ato de analisar e avaliar a imagem fotográfica com propósito de identificar objetos/alvos e definir seu significado (Summerson apud Veneziani, 1994).

A fotointerpretação além de utilizar o exame de imagens fotográficas, identificando os alvos e definindo o seu significado, vale-se de um processo indutivo-dedutivo e associação de idéias para reconhecer fenômenos ou alvos não definidos diretamente nos produtos de sensoriamento remoto (Veneziani, op. cit.).

3.1 - MÉTODOS DE FOTOINTERPRETAÇÃO

Em termos de interpretação de imagens fotográficas, os métodos de fotointerpretação podem ser definidos basicamente como:

- 1) método das chaves - baseia-se no estudo comparativo, isto é, compara os dados da imagem com padrões pré-estabelecidos;
- 2) método sistemático - analisa as feições e/ou objetos contidos na imagem, estabelecendo um significado das propriedades dos elementos texturais observados.

Tendo em vista a complexidade do campo das geociências, o método que alcança melhores resultados em termos de fotointerpretação é o método sistemático.

3.1.1 - MÉTODO SISTEMÁTICO

O método sistemático de fotointerpretação foi desenvolvido por Guy (1966), sendo os principais tópicos deste método transcritos por Riverau (1972).

Ao procurar apresentar de forma sistemática, codificada e lógica, subsídios para a teoria da fotointerpretação voltada ao campo das geociências, Soares e Fiori (1976) utilizaram este método com fotografias aéreas.

A aplicação do método sistemático em imagens orbitais (sensores MSS e TM/LANDSAT), foi adaptada para as ciências geológicas por Veneziani e Anjos (1982). Estes autores ressaltam o estabelecimento de critérios específicos em função das características destas imagens, que não possibilitam a utilização do recurso da estereoscopia e possuem baixa resolução espacial.

O processo de fotointerpretação pode ser conceituado em três fases, ou seja:

- fotoleitura - consiste no reconhecimento e identificação dos elementos texturais das imagens com os objetos correspondentes e sua repartição;
- fotoanálise - consiste no relacionamento dos elementos estruturais, estabelecendo a associação e ordenação das partes das imagens;
- fotointerpretação - visa à descoberta e avaliação do alvo imageado através de métodos indutivos, dedutivos e comparativos.

Segundo Veneziani e Anjos (1982), a metodologia de fotointerpretação adotada segue os critérios desenvolvidos para a interpretação de fotografias aéreas, sendo os conceitos básicos descritos a seguir:

- elemento textural - é a menor superfície contínua e homogênea, distinguível na imagem fotográfica e possível de repetição (Riverau apud Soares e Fiori, 1976). A individualização deste elemento é função da escala e resolução espacial;
- textura - é o arranjo dos elementos texturais representando a disposição das menores feições da imagem;

- estrutura - é a lei que exprime o padrão de organização no espaço dos elementos texturais, podendo estes apresentarem-se com uma disposição ordenada ou aleatória;
- forma - exprime a disposição espacial de elementos texturais com propriedades comuns (Figura 4);
- tonalidade ou nível de cinza - refere-se à reflectância dos alvos e depende da faixa do espectro eletromagnético com que a cena foi imageada;
- par luz-sombra - é resultante da iluminação do Sol sobre a superfície do terreno. Fornece a noção de relevo, constituindo-se em elemento fundamental para o caso de imagens sem o recurso da estereoscopia (Figura 5);
- zona homóloga - é a área delimitada sobre a imagem, sendo caracterizada por elementos texturais que possuem propriedades semelhantes e a mesma ordem e grau de estruturação;
- limites - os limites entre zonas homólogas podem ser: definidos - quando coincidem com formas lineares estruturadas; progressivos - quando se verifica a transição progressiva das propriedades de uma zona em relação à outra zona adjacente; envoltórios - quando a passagem entre zonas de propriedades e estruturas distintas é muito difusa;

Após a etapa da fotoanálise, que define as propriedades dos elementos texturais e das formas, representando-as através de legendas em um mapa, inicia-se a fase de fotointerpretação. Esta fase consta do processamento dedutivo e indutivo dos dados obtidos durante a fase de análise, buscando a definição do significado geológico das feições analisadas, elaborando então um modelo fotointerpretado.

O significado geológico das propriedades dos elementos texturais de relevo e drenagem segundo Veneziani(1991), pode ser definido através de alguns itens como:

- Densidade textural: pode indicar o grau de dissecação das unidades litológicas, podendo a densidade ser

considerada em função do conjunto global dos elementos texturais de relevo e drenagem;

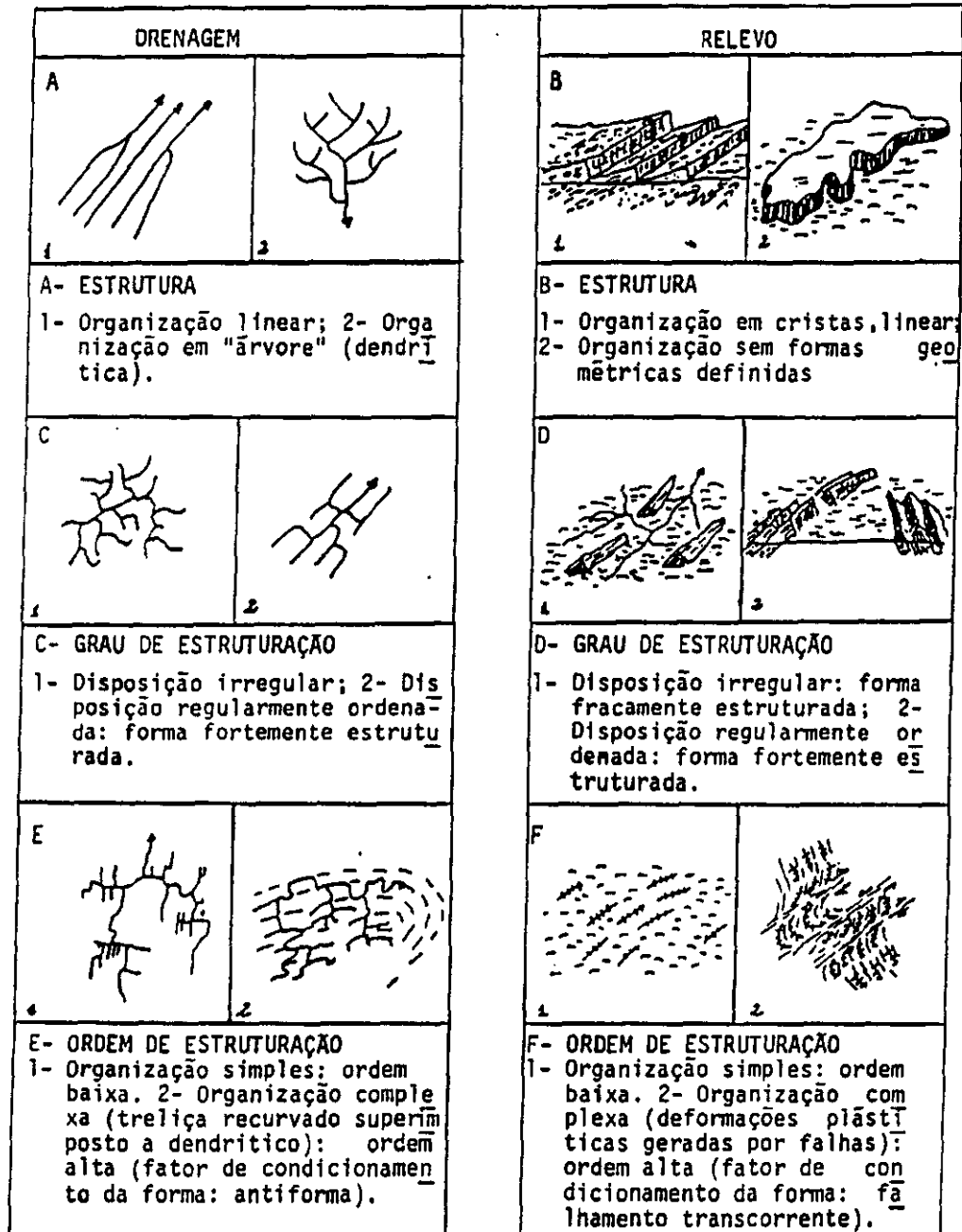


Fig. 4 - Propriedades que caracterizam as formas da rede de drenagem e do relevo

FONTE: Veneziani e Anjos (1982), p. 9.

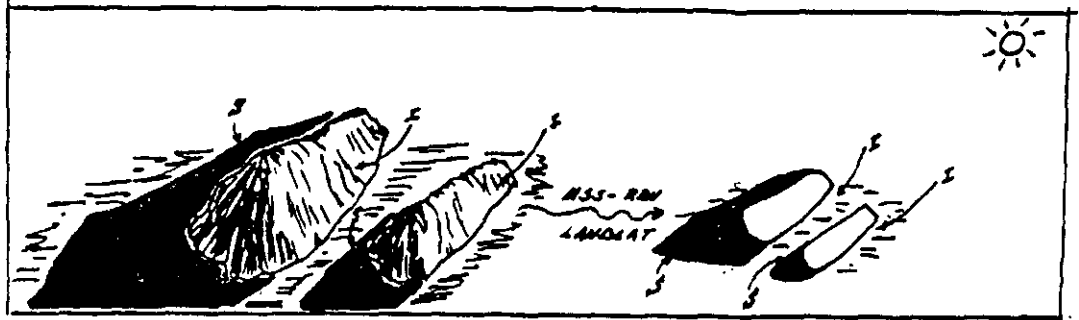


Fig. 5 - Caracterização do relevo através da análise do par "luz-sombra".

I- região iluminada (luz)

S- região sombreada (sombra)

I e S- elementos texturais de relevo

FONTE: Veneziani e Anjos (1982), p. 5.

- Feições lineares retilíneas a ligeiramente curvilíneas: de drenagem - representam normalmente zonas de juntas e/ou diáclases, ou ainda, foliações e/ou acamamentos verticais a subverticais; de relevo - podem representar estratificações, ou ainda estar relacionados a fraturamentos;
- Simetria - assimetria de relevo e drenagem: ao relacionar a tendência dos traços das feições lineares, podem inferir a interpretação da atitude de feições como planos de foliações/estratificações;
- Alinhamentos das feições lineares de relevo e drenagem: podem indicar falhas transcorrentes; falhas inversas/empurrão; falhas normais/gravidade;
- Limites definidos, progressivos e envoltórios de Zhs: podem ou não estar relacionados com os contatos litológicos. Em relação aos limites definidos, o

contato normalmente coincide, mas no caso dos limites progressivos e/ou envoltórios, os contatos fotointerpretados seriam inferidos ou aproximados.

3.2 - FEIÇÕES ESTRUTURAIS EM PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

"Uma das características das imagens fotográficas de cobertura sinótica, é a capacidade de visualização regional das estruturas geológicas, principalmente as de caráter rúptil" (Crepani, 1988).

Crepani (op. cit.) ressalta que as imagens fotográficas de baixa resolução espacial, como no caso dos sensores passivos (imagens LANDSAT), não permitem estereoscopia. Desta forma, a noção de relevo pode ser dada pelas sombras, sendo estas resultado do ângulo de inclinação do Sol. Os elementos texturais indicativos de feições topográficas (negativas ou positivas) são caracterizados por diferentes tonalidades de cinza.

Sampaio (1987) cita que "a disposição das feições estruturais obtidas de uma imagem fotográfica, quando comparadas com elementos de modelos deformacionais conhecidos, sugere o padrão de fraturamento da superfície imageada, bem como pode revelar o tipo de movimento tectônico ao longo de determinadas direções. Geralmente estes movimentos são indicados através da identificação das estruturas típicas de regimes de esforços distensivos (juntas abertas e falhas normais) e compressivos (juntas, falhas transcorrentes e inversas)".

Para melhor embasar o seu trabalho, Sampaio (1987) cita os conceitos de Billings para fratura, junta e falha:

- fratura - plano de ruptura dos materiais rochosos;
- junta ou diáclase - plano ou superfície de fratura que divide a rocha, e ao longo do qual não ocorreu deslocamento das paredes rochosas paralelamente ao plano de fratura;
- falha - fratura ao longo da qual houve um deslocamento relativo das paredes rochosas.

Segundo Soares e Fiori (1976), as lineações de relevo e drenagem estão associadas a feições estruturais como foliações, acamamentos e fraturas, sempre expressadas na imagem sob a forma de feições lineares, assim como

alinhamentos de relevo e drenagem podem representar descontinuidades geológicas e/ou falhamentos, expressados comumente nas imagens como lineamentos.

O termo lineamento é definido por Loczy e Ladeira (1976) como "qualquer linha condicionada topograficamente e observável em mapas topográficos, no terreno ou em imagens (fotografias aéreas, imagens de satélite e imagens de radar). Os lineamentos podem representar juntas, falhas, fraturas, planos de acamamento, de xistosidade, foliação, lineação".

O'Leary et al. (1976) citam que o termo lineamento foi utilizado originalmente por Hobbs (1904; 1912), para caracterizar algumas relações entre feições da paisagem. O'Leary et al. (op. cit.) propõem novas definições para lineamento, linear e lineação:

- lineamento - "uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões de feições que lhe são adjacentes e, presumivelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície";
- linear - tomando como base a etimologia deste termo, O'Leary et al. (1976) propõem que linear, deva ser utilizado prioritariamente como um adjetivo de terminologia geológica, para descrever a característica relativa da linha, ou seja, para expressar a qualidade geométrica dos objetos, concluindo que o termo não deva ser usado como sinônimo de lineamento;
- lineação - "alinhamento estrutural unidimensional dos componentes internos de uma rocha, imposto por agentes externos, não podendo ser representado como uma feição individual em um mapa". O'Leary et al. (op. cit.) acrescentam que a lineação pode ser simbolicamente representada em um mapa, mas não pode ser representada individualmente como, por exemplo, em um contato geológico formacional.

Waters et al. (1990), com o objetivo de tornar o uso do termo lineamento mais criterioso, sugerem que ele seja aplicado "a qualquer feição retilínea ou suavemente curvilínea ou a qualquer alinhamento de feições descontínuas que sejam aparentes em um mapa, fotografia aérea ou imagem orbital de uma área e a qual, de acordo com

Gold (1980), possam ser atribuídos qualitativos, tais como lineamento geológico, lineamento topográfico, etc, após a interpretação da feição”.

Crepani (1988) cita que “o significado geológico associado às feições lineares negativas em imagens fotográficas de baixa resolução espacial, não é o de fraturas isoladas, mas zonas de concentração de fraturas”.

Plicka (1974) define zonas de juntas como zonas de concentração de fraturas mais ou menos paralelas, com pequeno espaçamento e quase verticais (70° a 90°). Estas zonas podem se estender em grandes áreas e por longas distâncias, separadas entre si de poucos a dezenas de metros e ter grande extensão vertical.

Segundo Plicka (op. cit.) quando estas zonas seguem uma mesma direção e têm uma mesma gênese, são chamadas “conjunto de zonas de juntas”. Os conjuntos de zonas de juntas possuem uma série de características:

- podem ser usados para determinar o padrão tectônico de uma determinada área, porque esboçam as feições tectônicas e fornecem uma visão preliminar de linhas tectônicas importantes;
- são importantes na descoberta da direção de falhas e de redes de finas linhas tectônicas que afetam rochas da superfície da crosta;
- as tendências das falhas seguem as tendências dos conjuntos de zonas de juntas e muitas vezes, quando estas tendências divergem, é porque as falhas passam a seguir outro conjunto de zonas oblíquo ao primeiro. A partir dessa observação, fica evidente que os conjuntos de zonas de juntas se originaram antes das falhas;
- os conjuntos de zonas de juntas emergem de rochas mais antigas e se estendem verticalmente através de rochas sobrejacentes mais novas;
- conjuntos de zonas de juntas são indicados diretamente por feições geomorfológicas;
- a quantidade de zonas de juntas, ou de um conjunto em particular, aumenta próximo a falhas expressivas, o

que relaciona a associação genética e geométrica das falhas ao conjunto de zonas de juntas;

- conjuntos de zonas de juntas podem indicar eventos tectônicos mesmo em cinturões de "nappes";
- os conjuntos de zonas de juntas não se dispõem regularmente em uma determinada área. Alguns conjuntos ou um conjunto, podem cobrir uma grande área, enquanto outros têm pequena extensão ou são confinados a uma unidade tectônica de importância local.

Nickelsen (1974) destaca outras características importantes das zonas de juntas:

- algumas zonas de juntas, representadas por grandes lineamentos, têm persistido desde o Pré-Cambriano, afetando a sedimentação, tectônica, expressão fisiográfica e mesmo a localização de depósitos minerais;
- padrões de fraturamentos são cumulativos (vários episódios de fraturamentos de eventos diferentes podem acontecer na mesma zona de juntas) e persistentes (eventos tectônicos posteriores não apagam as evidências das zonas de juntas pré-existentes);
- padrões de fraturas em qualquer escala, desde microscópica até a nível de imagem de satélite, têm feições em comum.

4 - FATORES QUE INFLUEM NA OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MEIOS FRATURADOS

Os fatores que atuam no mecanismo de infiltração, percolação e armazenamento d'água em rochas fraturadas, e conseqüentemente, na capacidade do aquífero em meio fraturado, podem ser divididos em dois grupos:

- a) fatores exógenos - são fatores que dizem respeito aos condicionantes que atuam na superfície terrestre, como o clima, relevo, hidrografia, vegetação, infiltração de soluções e intemperismo;
- b) fatores endógenos - correspondem aos condicionantes que atuam no interior da crosta terrestre como as estruturas, constituição mineralógica das rochas e presença de soluções mineralizantes hidrotermais.

A pesquisa de áreas favoráveis à ocorrência de água subterrânea em meios fraturados, levando-se em conta a metodologia de interpretação de produtos de sensoriamento remoto e a sua conseqüente capacidade de fornecer respostas adequadas a uma pesquisa desta natureza, deve ser baseada principalmente na análise do relevo, hidrografia, constituição litológica e estruturas.

4.1 - INTEGRAÇÃO DE DADOS

Além da análise individual de cada fator na avaliação do potencial hídrico de áreas favoráveis à pesquisa de água subterrânea, deve ser observada, principalmente, a associação de dois ou mais fatores condicionantes à ocorrência de aquíferos em meios fraturados.

A associação das zonas de fraturamento com a drenagem superficial, fornece uma das mais importantes condições necessárias à infiltração e acumulação da água no maciço rochoso.

Siqueira (1963) introduziu na literatura o termo "riacho-fenda", sendo este termo utilizado para relacionar a coincidência da drenagem com o fraturamento das rochas regionais, evidenciada pelas zonas retilíneas das drenagens.

Siqueira (op. cit.) comenta que o "riacho-fenda" é "a forma de abastecimento mais proveitosa para o preenchimento dos vazios destas rupturas (fendas)", e permite o reabastecimento contínuo dos aquíferos mesmo em ocasiões de baixa pluviosidade.

Em relação ao manto de alteração, Larsson (1977) comenta que "a ocorrência de água subterrânea no embasamento cristalino é função, principalmente, da permeabilidade conferida pelo fraturamento e da existência de mantos de alteração. Estes mantos recobrem as rochas do embasamento e comportam-se como extensos depósitos, fornecendo água para os aquíferos fraturados que lhes subjazem".

Bertachini (1987) comenta que "uma das características dos aquíferos fraturados em terrenos cristalinos sob clima úmido, reside na presença de um espesso manto de alteração, que influi nas condições de circulação, armazenamento e infiltração das águas subterrâneas desses aquíferos".

Cavalcante (1990) conclui em seu trabalho que "em áreas cristalinas, especialmente nas que se situam em clima úmido, o intemperismo promove a decomposição das rochas, principalmente em zonas de falhas e/ou fraturas, fazendo com que todas elas sejam, em potencial, passíveis de serem boas produtoras de água subterrânea".

Celligoi e Duarte (1990) abordam os condicionantes hidrogeológicos em relação à litologia da região de Londrina e citam os trabalhos de Leinz (1949), Maak (1981) e Melfi et al. (1988), entre outros, que considerando uma inclinação dos derrames a nível regional, esperam permeabilidades hidráulicas maiores na direção E-W, no que diz respeito ao fluxo de água subterrânea através das descontinuidades intra e interderrames.

Veneziani e Anjos (1993), comentam em seu trabalho que "as associações entre os vários conjuntos de zonas de juntas que se cruzam, dão origem às redes aquíferas, isto é, a permeabilidade das rochas cristalinas".

Veneziani e Anjos (op. cit.) analisando os resultados obtidos pela integração dos dados, verificaram que a existência das águas termais da área pesquisada estaria relacionada aos seguintes fatores:

- 1) cruzamento de sistemas de fraturamentos (juntas e falhas), especialmente os três cruzamentos principais observados, com mergulhos no intervalo de 70 a 90 graus;
- 2) ocorrência de brecha muito fraturada que preenche essencialmente as direções N45E a N60E, nos locais onde ocorrem os cruzamentos;
- 3) existência de baixos topográficos nos locais de cruzamentos, devido à erosão diferencial;
- 4) aumento da temperatura relativa nos locais em que os três fatores anteriores são verificados simultaneamente.

5 - OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MEIOS FRATURADOS

De modo geral, o meio fraturado é considerado como um domínio hidrogeológico heterogêneo e anisotrópico, onde o fluxo de água ocorre somente nas fraturas, e os seus parâmetros hidrodinâmicos estão estreitamente vinculados a intensidade, abertura e interconexão da rede de fraturas e entre as zonas de recarga e acumulação. Desta forma, o

aquífero em meio fraturado não apresenta parâmetros hidrodinâmicos constantes.

Como se sabe, a porosidade intersticial das rochas cristalinas é muito reduzida, ficando assim a permeabilidade associada às descontinuidades (planos de xistosidade, estratificação e fraturamentos) dos maciços rochosos.

Os planos de xistosidade e estratificação são em geral muito fechados, tendo pouco significado no armazenamento de água subterrânea.

O estudo da ocorrência de água deve se ater então, à análise mais detalhada dos fraturamentos que afetam os maciços rochosos cristalinos e o seu significado hidrogeológico.

Costa (1994), adota o termo "meio aquífero do tipo fissural", quando as fraturas cortam rochas do embasamento (cristalino ou maciço rochoso). O "meio aquífero do tipo fissural" é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha. Nesse meio, a água se encontra em espaços representados por fissuras ou fraturas, juntas ou ainda em falhas e, em casos particulares, em vesículas, aberturas de dissolução, zonas de decomposição, dentre outros.

De qualquer forma, a quantidade de água no meio fraturado, em comparação a outros tipos de aquíferos, é em geral muito reduzida, dependendo então da intensidade do fraturamento para assumir uma maior importância.

Segundo Costa (op. cit.), no estudo de uma fratura devem ser considerados os elementos que exercem grande importância nas características hidrodinâmicas. São estes, a saber:

- a) abertura - é definida como a medida do espaçamento entre as paredes rochosas ao longo do plano de fraturamento. Este parâmetro é de fundamental importância para a infiltração e armazenamento de água, e vai depender de dois fatores: tensões atuantes e tipo de rocha (em função das propriedades físicas dos minerais e de sua textura);
- b) rugosidade das paredes - é definida como o distância entre a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda dos planos de fraturamento;

- c) preenchimento - as fraturas podem estar total ou parcialmente preenchidas por material autóctone ou alóctone, como por exemplo: fragmentos da própria rocha fraturada; detritos de origem superficial; sais recristalizados; soluções hidrotermais mineralizantes.

Ainda segundo Costa (1994), a condutividade hidráulica (ou permeabilidade) e as condições de armazenamento d'água de um maciço rochoso fraturado, dependem dos seguintes fatores (Figura 6):

- amplitude das fissuras (l);
- abertura das fissuras (e);
- forma e rugosidade das paredes das fissuras (k);
- frequência ou espaçamento das fissuras (b);
- número de famílias ou sistemas de fissuras (n);
- orientação e posição das fissuras (direção e mergulho);
- porosidade e permeabilidade da matriz rochosa;
- propriedades do material que preenche as fissuras;

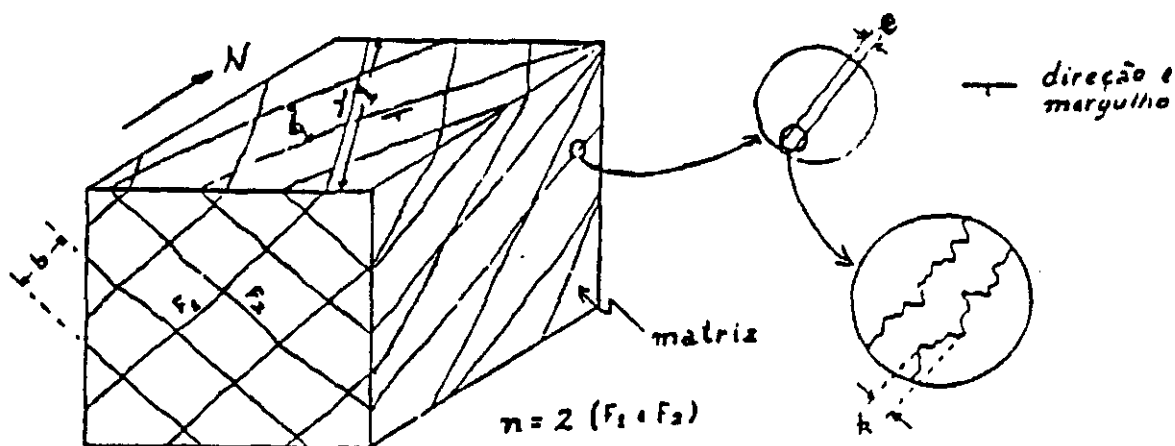


Fig. 6 - Elementos do meio fraturado.

FONTE: Costa (1994).

Em relação à quantidade de água subterrânea no cristalino, Costa (1980) cita que "a quantificação e, sobretudo a capacidade de exploração das águas subterrâneas em rochas cristalinas, dependem fundamentalmente de dois condicionantes:

- a) existência de grandes volumes de vazios, representados geralmente por fraturas abertas;
- b) possibilidades de recargas d'água periódicas (pluviometria)".

Costa (op. cit.) ressalta que os planos de descontinuidade abertos podem ser considerados como os principais condicionantes à exploração de água subterrânea. Desta forma, deve ser levado em conta não só as características do estado de tensões que gerou estas descontinuidades, mas também as características elásticas da rocha, que são responsáveis pelo tipo de deformação sofrida pelo maciço.

Ladeira (1985) afirma que do ponto de vista de água subterrânea, o que interessa são as feições do regime frágil (fraturas) e, "como estas na evolução deformativa são as últimas a se formar, cumpre decifrar a história tectônica da área de interesse para se definir tais fraturas".

Ladeira (op. cit.) lembra que deve-se ater ao fato que as fraturas formadas em fases deformativas anteriores podem, em geral, ser preservadas se a nova fase estiver sob condições de regime rúptil ou dúctil. Por outro lado, fraturas estabelecidas em regime rúptil podem ser totalmente obliteradas e/ou destruídas, se a nova fase deformativa se der em regime dúctil e, principalmente, se este for acompanhado por metamorfismo com conseqüente recristalização generalizada. Por isto, "o que interessa à hidrogeologia são, em geral, as fraturas pós-eventos, dentre as quais as fraturas abertas são as relevantes".

6 - TÉCNICA DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADA À PESQUISA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A interpretação de imagens de satélite, é uma ferramenta de grande importância do sensoriamento remoto para estudos hidrogeológicos.

De um modo geral, a abordagem metodológica ao uso do sensoriamento remoto na pesquisa de água subterrânea em meios fraturados, envolve principalmente o levantamento tectono-estrutural da área pesquisada, já que o fluxo

através das fraturas é o modo mais característico do movimento da água subterrânea.

Desta forma verifica-se que as vazões dos poços apresentam, frequentemente, uma correlação positiva com feições lineares ou com a interseção de duas feições lineares em imagens de satélite ou fotografias aéreas.

Costa (1994) comenta que de um modo geral, seis condições são consideradas indispensáveis para se conseguir êxito na perfuração do poço em rochas cristalinas, quais sejam:

- 1) existência de fraturamento na rocha;
- 2) grau de abertura das fraturas;
- 3) extensão e profundidade das fraturas;
- 4) frequência do fraturamento;
- 5) interconexão das fraturas;
- 6) conexão das fraturas com zonas de recarga na superfície (rios, lagos, capeamento permeável, etc).

A integração dos dados sobre fraturamentos realizada no trabalho de Sampaio et al. (1987), dá destaque à extração e análise dos sistemas de fraturamentos (lineamentos e zonas de juntas), tanto de forma individualizada como nas relações de interferência entre eles (cruzamentos).

Sampaio et al. (op. cit.) apontaram como mais relevantes as feições associadas a regimes de esforços tracionais, levando em conta que estas contém quantidade considerável de elementos estruturais abertos. As estruturas abertas são extremamente importantes do ponto de vista hidrogeológico, já que condicionam a infiltração e armazenamento da água subterrânea.

Sampaio et al. (op. cit.) com base nos dados extraídos dos produtos de sensoriamento remoto, propuseram uma ordem de prioridade de áreas mais favoráveis à pesquisa de água subterrânea, conforme consta na tabela 1. Nesta tabela destacam-se 24 situações de formas de ocorrência de feições estruturais diferenciadas em 3 grupos principais com distintos potenciais de infiltração de água.

Verifica-se de um modo geral que na tabela 1, em relação às áreas favoráveis para exploração de água

subterrânea, a prioridade torna-se decrescente na medida em que se caminha na tabela de cima para baixo e da esquerda para a direita.

TABELA 1 - ESTRUTURAS E COMBINAÇÕES DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS SEGUNDO ORDEM DE PRIORIDADE.

ELEMENTOS ESTRUTURAIS		CRUZAMENTOS				III	ESTRUTURAS INDIVIDUAIS
		I	SISTEMAS CONJUGADOS	II	SISTEMAS		
A	ABERTOS (A)	1	FEIXE x FEIXE	1	FEIXE x FEIXE	1	FEIXES
				2	FEIXE x LINEAMENTOS		
		2	FEIXE x LINEAMENTOS	3	LINEAMENTOS x LINEAMENTOS	2	LINEAMENTOS
				4	FEIXE x DESCONTINUIDADE		
				5	LINEAMENTOS x DESCONTINUIDADE		
B	HÍBRIDOS	1	FEIXE (A) x LINEAMENTOS (F)	1	FEIXE (A) x LINEAMENTOS (F)		
				2	FEIXE (F) x LINEAMENTOS (A)		
				3	LINEAMENTOS (A) x LINEAMENTOS (F)		
				4	FEIXE (F) x LINEAMENTOS (A)		
C	FECHADOS (F)	1	LINEAMENTOS x LINEAMENTOS	1	LINEAMENTOS x LINEAMENTOS	1	FEIXES
				2	FEIXE x LINEAMENTOS		
				3	FEIXE x FEIXE		
				4	FEIXE x DESCONTINUIDADE		
				5	LINEAMENTOS x DESCONTINUIDADE		
						2	LINEAMENTOS

- Obs.: 1. Considerar como descontinuidade as discordâncias litológico-estruturais, excluindo as falhas.
2. Observar a permeabilidade quanto a porosidade ou densidade de elementos estruturais.
3. Verificar a tendência de fluxo de água, se concordante ou discordante às estruturas.

FONTE: Sampaio (1987), p. 69.

Kurkdjian et al (1992) no intuito de elaborar um estudo da ocorrência de áreas favoráveis à exploração de água subterrânea, utilizaram critérios baseados na interpretação de produtos de sensoriamento remoto, tendo como objetivo observar, analisar e interpretar os tipos de estruturas que ocorrem na área estudada, que é por sua vez dominada em quase a sua totalidade por rochas cristalinas.

Os resultados deste trabalho (Kurkdjian et al, op. cit.), mostraram que a área estudada apresenta-se intensamente fraturada e deformada plasticamente e que além de sistemas de fraturas de origem rúptil, observam-se

estruturas formadas em níveis intermediários rúpteis-dúcteis e níveis inferiores dúcteis.

Kurkdjian et al (1992) destacam então alguns resultados obtidos segundo os critérios metodológicos aplicados à área estudada, sendo estes resultados definidos:

- 1) quanto aos conjuntos de zonas de juntas-feixes de fraturamentos;
- 2) quanto aos lineamentos estruturais;
- 3) quanto às foliações;
- 4) quanto à integração dos dados obtidos;
- 5) quanto à prioridade das áreas apontadas como as mais favoráveis para recarga e para exploração de água subterrânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bertachini, A.C. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiaí, em São Paulo. (Dissertação de Mestrado na Área de Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1987. 104 p.
- Cavalcante, I.N. Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo - área piloto de Atibaia (SP). (Dissertação de Mestrado na Área de Recursos Minerais e Hidrogeologia) - USP, São Paulo, 1990. 123 p.
- Celligoi, A.; Duarte, U. Conotação hidrogeológica dos lineamentos estruturais E-W na região de Londrina - PR. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 6., Porto Alegre, 1990. Anais. Porto Alegre, ABAS, 1990, p. 288-297.
- Costa, W.D. Caracterização hidrogeológica do aquífero fissural no Estado do Rio Grande do Norte. Revista Água Subterrânea, 13: 21-35, ago. 1990.
- _____ A hidrogeologia do cristalino à luz da mecânica das rochas. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1., Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS, 1980, v.1, p. 375-383.
- _____ Curso de hidrogeologia do aquífero fissural. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, dez. 1994.
- Crepani, E. Análise de fraturas através de imagens fotográficas de baixa resolução espacial: uma contribuição ao estudo da evolução tectônica da região da Chapada do Araripe. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 1988. Anais. São José dos Campos, INPE/SELP, 1988, v.2, p. 366-380.
- Guy, M. Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: Symposium International de Photo-Interpretation, 2., Paris, 1966 Acte. Paris, 1966, v.1, p. 2-41.
- Harding, T.P. Petroleum traps associated with wrench faults. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 7(58): 1290-1304. July 1974.

- Hasui, Y.; Costa, J.B.S. Curso de zonas e cinturões de cisalhamento. Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém, nov. 1988. Belém, SBG/UFP, 86 p.
- Kurkdjian, M.L.N.O. et al. Macrozoneamento da Região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo. São José dos Campos, INPE, 1992. v. 1, 176 p. (INPE-5381-PRP/165).
- Ladeira, E.A. Contribuição da geologia estrutural à pesquisa de águas subterrâneas em rochas fraturadas. Revista Águas Subterrâneas, 9: 7-34, dez. 1985.
- Larsson, I. Ground water in hard rocks. Stockholm - Cagliari, Ground Water in Hard Rocks, International Seminar, DLID/FE, Sep.-Oct. 1977. 40 p.
- Loczy, L.; Ladeira, E.A. Geologia estrutural e introdução à geotectônica. São Paulo, Edgar Blucher, 1976. 528 p.
- Nickelsen, R. P. Early jointing and cumulative fracture patterns. In: International Conference on the New Basement Tectonics, 1., Salt Lake City, UT, June 3-7, 1974. Proceedings. Salt Lake City, Utah Geological Association, 1974. p. 193-199.
- O'Leary, D. W.; Friedman, J. D.; Pohn, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin. 87(10): 1463-1469, Oct. 1976.
- Plicka, M. Observations on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. In: International Conference on the New Basement Tectonics, 1., Salt Lake City, UT, June 3-7, 1974. Proceedings. Salt Lake City, Utah Geological Association, 1974. p. 279-289.
- Ramsay, J.G.; Huber, M.I. The techniques of modern structural geology. Vol.2: folds and fractures. London, Academic, 1987. 700 p.
- Rivereau, J.C. Notas de aula do Curso de Fotointerpretação. Brasília. Departamento de Geociências - UNB, Brasília. 1970, (Série Didática 4).
- Rocio, M.A.R.; Veneziani, P. Caracterização das condições de ocorrência das águas subterrâneas no embasamento com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. Anais. São José dos Campos, INPE/SELPER/SBC, 1993, v. 3, p. 312-314.

- Sadowski, G.R. Sobre a geologia estrutural de cinturões de cisalhamento continentais. (Tese de Livre Docência no Departamento de Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1983. 108 p.
- Sampaio, O.S. Estudo de fraturamentos como subsídio à pesquisa de água subterrânea no Estado de Sergipe: uma abordagem através de dados de sensoriamento remoto. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. 128 p. (INPE-4319-TDL/286).
- Sampaio, O.S.; Mattos, J.T.; Veneziani, P. Estudos de fraturamentos para pesquisa de água subterrânea no Estado de Sergipe com produtos de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, 1986. Anais. São José dos Campos, SELPER/INPE/SBC, 1986, v.1, p. 447-452.
- Setzer, J. Água subterrânea no cristalino paulista. Revista Brasileira de Geografia, 3: 187-203, jul.-set. 1966.
- Siqueira, L. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. Recife, SUDENE, 1963. 51 p.
- Soares, P.C.; Fiori, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, 16(32): 71-104, 1976.
- Tchalenko, J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes. Geological Society of America Bulletin, 81(6): 1625-1640, June 1970.
- Veneziani, P. Análise de movimentos da tectônica rúptil e rúptil-dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG): uma correlação com procesos evolutivos. (Tese de Doutorado em Geologia Geral e de Aplicações) - Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1987. 186 p.
- _____. Fotogeologia com imagens orbitais - roteiro de estudos e definições fundamentais. São José dos Campos, INPE, 1991. 24 p.
- _____. Interpretação visual de dados: notas de aulas dadas no Curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE. São José dos Campos, 3. trim., 1994. Manuscrito.

Veneziani, P.; Anjos, C.E. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos, INPE, 1982. 61 p. (INPE-2227-MD/014).

_____. Prospecção de água termomineral na Região de Termas da Guarda (SC) com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. Anais. São José dos Campos, SELPER/INPE/SBC, 1993, v. 3, p. 376-384.

Veneziani, P.; Mattos, J.T.; Ohara, T; Schorsch, H.D. Análise de movimentos tectônicos utilizando produtos de sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 1988. Anais. São José dos Campos, INPE/SELPER, 1988, v.2, p. 341-353.

Waters, P.; Greenbaum, D.; Smart, P.L.; Osmaston, H. Applications of remote sensing to groundwater hydrology. Remote Sensing Reviews, 4(2): 223-264, 1990.