

# CRITÉRIOS PARA A PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COM O EMPREGO DE DADOS DE SENSORES REMOTOS NA REGIÃO DE PARAIBUNA-TAUBATÉ-JAMBEIRO, NO ESTADO DE SÃO PAULO

PAULO VENEZIANI \*  
MARCO AURÉLIO RAMALHO ROCIO \*\*

## ABSTRACT

It is presented the development of treatment and interpretation criteria of remote sensing data for borehole siting. The starting point of this work consisted in a regional study which aimed to define favourable areas for groundwater surveying and was taken as a basis for detailed studies. The test area comprises sheared and deformed crystalline rocks. The systems of fracture observed form netlike aquifers and are being studied from their expressions at ground surface. By means of a geographic information system (GIS), the traces of these structures were matched with the probable groundwater flux and topographic data in order to locate boreholes.

## INTRODUÇÃO

Em regiões onde predominam rochas metamórficas e ígneas, a acumulação da água subterrânea está ligada a existência de redes aquíferas, originadas da trama formada por séries e sistemas de fraturamento. Quanto maiores a densidade de fraturamento e a separação entre os blocos rochosos fraturados, maior é a capacidade de infiltração. Por outro lado, quanto maior o número de cruzamentos entre os diferentes sistemas e/ou séries, maior será a capacidade de circulação da água. Entretanto, a identificação das feições estruturais que dão origem às redes aquíferas não é suficiente para a locação de pontos para a perfuração de poços profundos, pois deve-se compreender a evolução tectono-estrutural que levou à configuração geométrica observável em uma dada região.

O tratamento e a interpretação de dados de produtos de sensores remotos de nível orbital, acompanhados de levantamentos de campo, permitem que se identifique um modelo evolutivo tectono-estrutural e que se conheçam as principais feições dúcteis, rúptil-dúcteis e rúpteis resultantes da deformação de uma dada região. Assim, podem-se definir as feições estruturais de origem distensiva e com maior probabilidade em dar origem às redes aquíferas. Somando-se as indicações sobre o fluxo provável da água subterrânea, inferido a partir da assimetria e da tropia da rede de drenagem, podem-se demarcar áreas mais favoráveis à sua concentração.

Dados regionais (1:250.000) já haviam sido levantados para a região do Vale do Paraíba do Sul e Litoral Norte do Estado de São Paulo. A área deste estudo insere-se nesta região, como mostrado na figura 1, e foi escolhida com o fim de ser detalhada estruturalmente, para proceder-se a elaboração de critérios de locação de pontos para perfuração. Tais critérios fundamentam-se nos seguintes passos:

1. mapeamento detalhado das estruturas que compõem a rede aquífera, apoiado na interpretação de fotografias aéreas;
2. integração dos dados estruturais com as curvas do fluxo provável da água subterrânea, via SIG;

\* Geólogo Especialista Sênior

\*\* Geólogo  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

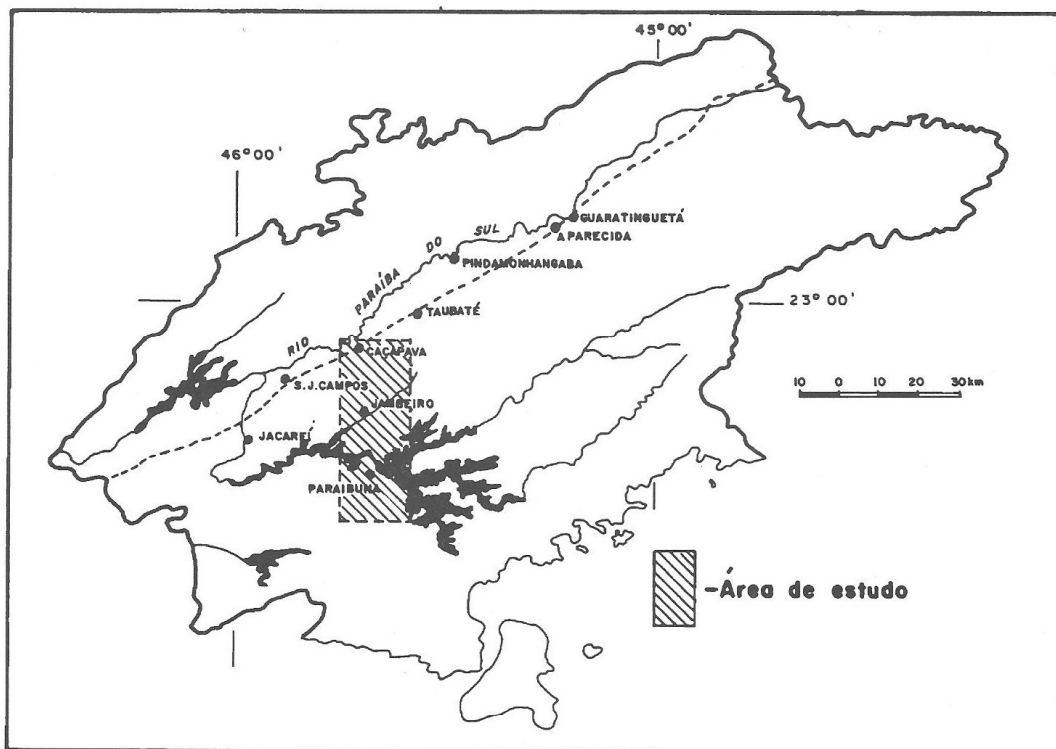


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo

3. integração dos dados anteriores com as curvas altimétricas, também via SIG; e 4. locação de pontos para perfuração.

de ÁGUA Subterrânea. Empregaram-se, também, as folhas topográficas Taubaté e Paraibuna (1:50.000) da Fundação IBGE e as fotografias aéreas em branco e preto (1:60.000), emprestadas pela CPRM.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### MATERIAIS

Foram utilizados os seguintes mapas (1:250.000) do Projeto Mavale (KURKDJIAN et al., 1992), elaborados a partir da interpretação de imagens TM-LANDSAT:

1. Geológico;
2. Lineamentos Estruturais e de Curvas do Fluxo Provável da Água Subterrânea;
3. Areas Mais Favoráveis para a Recarga e Exploração

### MÉTODOS

A metodologia de fotointerpretação baseou-se em SOARES e FIORI (1976), VENEZIANI E ANJOS (1982) E VENEZIANI (1987).

Para estabelecer os critérios de locação de pontos para a perfuração, utilizaram-se os trabalhos de MATTOS et al. (1985), que estabeleceram os critérios definidos na tabela 1; e de SAMPAIO (1987). Esses autores propuseram o mapeamento estrutural; a comparação das estruturas mapeadas com modelos deformativos experimentais; e a definição das redes aquíferas e dos locais mais favoráveis à acumulação da água subterrânea.

PRINCIPAIS ESTRUTURAS REGIONAIS DE INTERESSE		ELEMENTOS ABERTOS	ELEMENTOS HÍBRIDOS	ELEMENTOS FECHADOS	
V	FEIXES DE FRATURA	1   SISTEMAS CONJUGADOS		1   SISTEMAS CONJUGADOS	
		2   SISTEMAS		2   SISTEMAS	
		3   SÉRIES		3   SÉRIES	
IV	FALHAS	1   NORMAIS		1   DIRECIONAIS	
					2   INVERSAS
					3   EMPURRÕES
III	FEIXES X FALHAS	1   ABERTO X ABERTO	1   ABERTO X FECHADO	1   FECHADO X FECHADO	
			2   FECHADO X ABERTO		
	FALHAS X FALHAS	2   ABERTO X ABERTO	3   ABERTO X FECHADO	2   FECHADO X FECHADO	
			4   FECHADO X ABERTO		
	FEIXES X FEIXES	3   ABERTO X ABERTO	5   ABERTO X FECHADO	3   FECHADO X FECHADO	
			6   FECHADO X ABERTO		
FALHAS X DESCONTINUIDADES(*)	4   ABERTO X DESCONTINUIDADE		4   FECHADO X DESCONTINUIDADE		
FALHAS X DESCONTINUIDADES(*)	5   ABERTO X DESCONTINUIDADE		5   FECHADO X DESCONTINUIDADE		
		A	B	C	
(*) Considerar todas as descontinuidades litológico-estruturais, excluindo-se os falhamentos.					
II	TENDÊNCIA DO FLUXO DA ÁGUA	C   CONCORDANTE	D   DISCORDANTE		
I	PERMEABILIDADE ALTA(**)	A   POROSIDADE	B   POROSIDADE DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS ABERTOS		

Tabela 1. Critérios para a definição de zonas estruturalmente favoráveis à acumulação de água subterrânea (MATTOS et al., 1985)

A metodologia de integração de dados, implementada no SIG do INPE (ENGESPAÇO, 1990), constitui as seguintes etapas:

- definição do projeto, determinando-se a área de estudo e a escala de trabalho;
- definição dos planos de informação, que correspondem aos tipos de dados, determinando-se as categorias geométricas destes;
- digitalização das curvas de nível altimétrico e geração do modelo numérico de terreno (1º plano de informação),
- das curvas de fluxo provável da água subterrânea (2º plano de informação),
- dos traços de falha (3º plano de informação),
- dos feixes de traço de junta (4º plano de informação);
- superposição dos quatro planos de informação; e

- escolha dos pontos para perfuração segundo os critérios da tabela 1 (MATTOS et al., 1985).

## RESULTADOS

O mapa geológico da área estudada é apresentado na figura 2. A porção delimitada por um círculo foi definida como uma área de favorável à acumulação da água subterrânea, segundo os critérios de MATTOS et al. (1985). Essa porção foi detalhada utilizando-se o SGI (ENGESPAÇO, 1990) e o objeto das discussões desta trabalho consiste neste detalhamento.

## GEOLOGIA DA ÁREA

As principais unidades geológicas são descritas sucintamente.

- Unidade gnm(c)** - corresponde a partes do complexo Costeiro (HASUI, et al., 1984). Engloba litotipos de origem metamórfica (gnaises, migmatitos e,

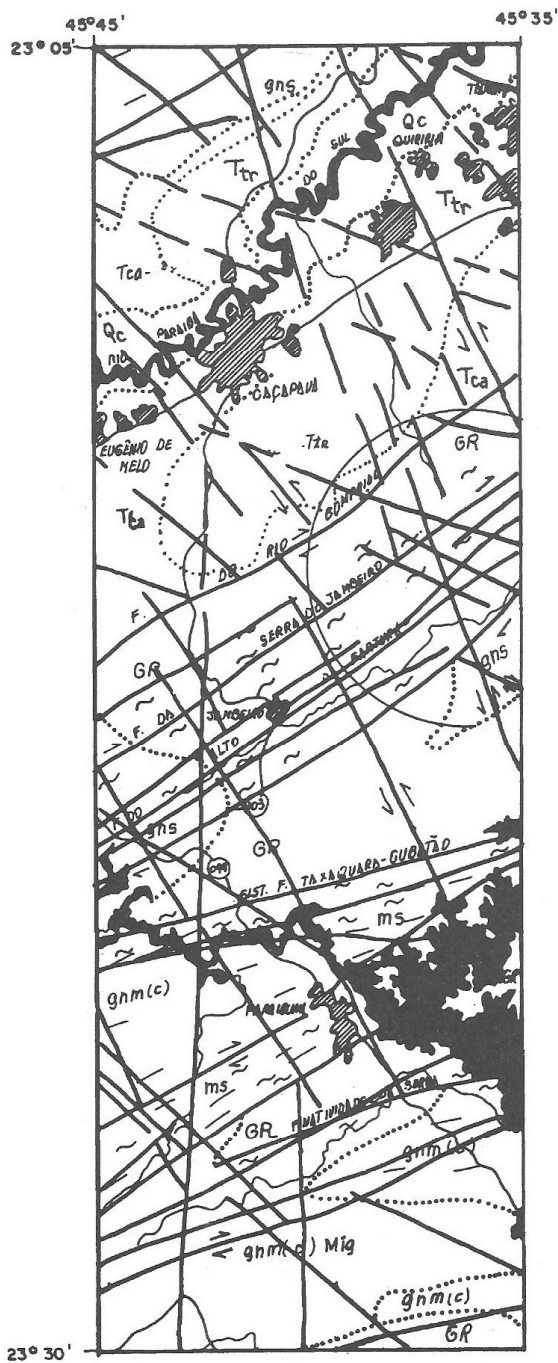
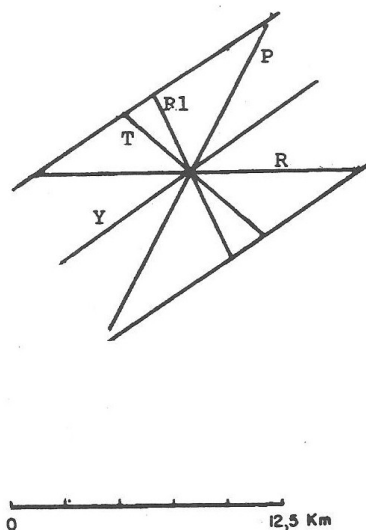


Figura 2. Esboço geológico da área de estudo e modelo de Riedel orientado

subordinadamente, metassedimentos), em graus médio a alto (anfíbólito e granulito), migmatizados em graus variáveis durante os ciclos Transamazônicos e Brasileiro.

- **Unidades ms e gns** - Corresponde a partes do grupo Açungui (HASUI, et al., 1984), que inclui metapelitos (filitos e xistos - ms). Tais rochas foram acumuladas, supostamente, no Proterozóico Superior e metamorfizadas/feldspatizadas durante o ciclo termo-tectônico Brasileiro. Mostram um grau metamórfico médio (xisto-verde e anfíbólito, localmente).
- **Unidade Gr** - É constituída por rochas granitóides sintectônicas do Proterozóico Superior (HASUI et al., 1984).
- **Unidades Tca e Ttr** - Correspondem, respectivamente, às formações Caçapava (sedimentos arenosos e siltosos) (REGO, 1938) e Tremembé (sedimentos pelíticos) (ALMEIDA, 1955), que constituem a bacia de Taubaté, de idade cenozóica.

Modelo de Riedel



- **Unidade Qc** - Corresponde aos sedimentos argilo-arenosos da planície do rio Paraíba do Sul, de idade quaternária (PONÇANO, 1981).

## GEOLOGIA ESTRUTURAL

A área em estudo localiza-se na faixa de cisalhamento São Paulo (HASUI et al., 1984), que é caracterizada pela ocorrência de falhamentos transcorrentes, apresentados na figura 2, aos quais associam-se faixas de rochas cataclásticas com foliações miloníticas verticais, lineações de baixo ângulo e demais feições características de cisalhamento dúctil, dúctil-rúptil e rúptil.

- **Modelo adotado** - A interpretação das imagens TM-LANDSAT mostrou que os lineamentos que cruzam a área estudada dispõem-se espacialmente de acordo com o modelo de Riedel para zonas de cisalhamento transcorrente, apresentado na figura 2,. Dados de campo preliminares, obtidos nos perfis Caçapava-Jambeiro-Paraibuna e São José dos Campos-Paraibuna, confirmaram a existência de uma analogia entre este modelo e as feições deformacionais geradas durante a fase de transcorrência que afetou a região. Evidências de cisalhamento de dúctil foram encontradas nas direções de falhamento mapeadas N80W (+/- 15°), N20W (+/- 30°), N30E (+/- 15°) e N60E (+/- 15°), tais como o desenvolvimento de foliações miloníticas subverticais ocasionalmente dobradas (dobramentos disruptos intrafoliares com eixos subverticais) e estiramentos e rotação de minerais. Estruturas de origem rúptil-dúctil também foram observadas, tais como o desenvolvimento de lentes de cisalhamento a partir dos sistemas com direções N80W e N60E, lineações horizontalizadas derivadas ao estriamento e marcas de arrancadura. O conjunto dessas feições indicou movimentos destros nas direções, N80W, N30E e N60E (fraturas R, P e Y, respectivamente) e sinistrais na direção N20W (fraturas R<sub>1</sub>). A família de fraturas com direção N50W (+/- 15°) (fraturas T) apresenta um caráter nitidamente rúptil, com deslocamentos verticais.

A esses sistemas de estrutura associa-se mais uma família de fraturamentos com direções em torno de N-S (+ 15° para E), aparentemente não relacionada ao modelo adotado e com características distensivas (rúpteis).

- **Deformações distensivas** - Foram observados, nos perfis realizados, conjunto de zona de junta com espaçamento regular e de ordem métrica, com distân-

cia entre juntas também regular, mas de ordem centimétrica. Tais conjuntos dão origem aos feixes de fraturamento mapeados, apresentados na figura 3, que distribuem-se ao longo das direções supracitadas, por extensões quilométricas e com mergulhos iguais ou superiores a 70°. São estruturas frágeis (rúpteis) associadas às reativações dos antigos lineamentos, que têm idade pós-pré-cambrianas, mesozóicas e terciárias. A esses conjuntos de zona de junta somam-se espelhos de falha com estrias verticais, nos casos das direções transcorrentes cortando lineações subhorizontais, e deslocando camada horizontais da bacia de Taubaté, com nítida conotação de falhas de gravidade. Isto é, além do fato de a bacia ser limitada por falhamentos paralelos à direção principal do cisalhamento pré-cambriano, esta direção foi reativada após a deposição dos sedimentos. Portanto, os grandes sistemas de lineamento que cortam a área são policíclicos e foram reativados por esforços distensivos em períodos posteriores ao pré-cambriano, originando conjuntos de zona de junta responsáveis pelo desenvolvimento da trama favorável à captação, à circulação e à acumulação da água.

- **Detalhamento da área de estudo** — A figura 3 mostra parte da área escolhida para detalhamento em função da existência de uma zona mais favorável à concentração de água subterrânea detectada pelo Projeto Mavale (KURKDJIAN et al., 1992), apresentada na figura 2. Aplicou-se a tabela 1 ao conjunto de dados interpretados e verificados parcialmente no campo e indicou-se a sub-área delimitada na figura 3 para proceder-se à integração dos dados da SIG, a partir da qual foram selecionados, na imagem resultante da combinação dos estudos estruturais com o aspecto altimétrico da região, três pontos para a perfuração, apresentados na figura 3.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de um SIG do tipo SGI do INPE (ENGESPAÇO, 1990) mostrou-se um instrumento valioso na prospecção de água subterrânea, no que tange à locação de pontos para perfuração de poços profundos. Embora os resultados ainda sejam preliminares, têm-se aberto um campo para a elaboração de um banco de dados e para integrar as interpretações tectono-estruturais realizáveis a partir de dados de produtos de sensores remotos, de campo; e plani-altimétricos.

Pretende-se, futuramente, introduzir novos planos de informação, como o de zoneamento de vazões e o de

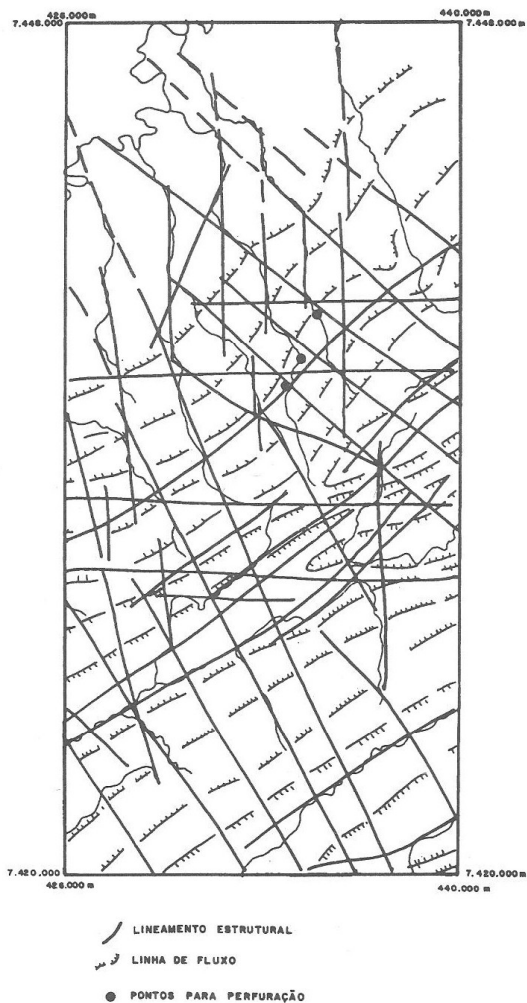


Figura 3. Sub-área para integração no SIG

medições geofísicas, permitindo que mais evidências converjam no objetivo da prospecção da água subterrânea.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. de (1955), As camadas de São Paulo e a tectônica da serra da Cantareira, São Paulo. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, V. 4, n. 2, p. 23-40.

ENGESPAÇO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. (1990), SITIM-150/Sistema Geográfico de Informações: manual de referência do usuário. São José dos Campos.

HASUI, Y.; M.J.G.; RAMALHO, R. (1984), A parte central da região de dobramentos Sudeste e o maciço mediano de Guaxupé. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E.; coord. (1984), Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Brasília: DNPM, cap. 7, p. 307-328

MATTOS, J.T. de; VENEZIANI, P.; WANDERLEY, B. do V.D.; SANTOS, J.A.F. dos; MENEZES, J.W. de A.; SANTOS, V.S.S. dos (1985), Projeto Sergipe: relatório preliminar. Aracaju: SEPLAN/INPE.

PONÇANO, W.L. (1981), As coberturas cenozóicas. In: ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S. de; BISTRICHI, C.A. (1981), Mapa geológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, V. 1, cap. 5, p. 82-96.

REGO, L.F. de M. (1938), A geologia do Estado de São Paulo. Boletim do Departamento de estradas de rodagem, V. 4, n. 2, p. 197-215.

SAMPAIO, O.S. (1987), 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). São José dos Campos: INPE.

SOARES, P.C. & FIORI, A.P. (1976), Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, V. 16, n. 32, p. 107-121.

KURKDJIAN, M. de L.N. de O.; VALÉRIO FILHO, M.; VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. dos; PEREIRA, M.N.; FLORENZANO, T.G.; ABDON, M. de M. (1992), Projeto Mavale: Macrozoneamento da Região do Vale do Paraíba do Sul e Litoral Norte do Estado de São Paulo. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

VENEZIANI, P. (1987), 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 processos evolutivos. (Tese de Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

VENEZIANI, P. & ANJOS, C.E. dos (1982), Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos: INPE. (INPE-2227-MD/014)