

CAPÍTULO 2 – MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se o material utilizado e os procedimentos realizados no desenvolvimento da pesquisa. O material é listado abaixo e os procedimentos são descritos nos itens seguintes.

Como material cartográfico e de sensoriamento remoto, foram utilizadas bases cartográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (1971, 1972, 1973a, 1973b, 1973c, 1973d, 1984, 1985) em escala 1:50.000; fotografias aéreas do levantamento USAF de 1965 em escala 1:60.000; imagem de radar do Projeto RADAMBRASIL (Brasil, 1976) em escala 1:250.000; além de mapas geológicos preexistentes (citados no item 2.1.4).

Para a digitalização dos mapas e tratamento digital dos dados, foram utilizados: microcomputador Pentium com 512 Mb de memória RAM, mesa digitalizadora e os programas computacionais AutoCAD 2000 (*Autodesk, Inc.*), Surfer Version 7.00 (*Golden Software, Inc.*), StereoNet for Windows 3.03 (*Geological Software*), ArcView GIS 3.2 (*Environmental Systems Research Institute, Inc.*), Corel Draw 11.0 (*Corel Corporation*), Statistica 6.0 (*StatSoft, Inc.*) e Excel 2000 (*Microsoft Corporation*).

Também foram utilizados estereoscópios de bolso e de mesa, além do material básico para trabalhos geológicos de campo, como martelo, bússola, lupa etc.

A descrição dos métodos apresentada a seguir está dividida em três etapas: levantamento, tratamento e integração dos dados.

2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A fase de levantamento de dados envolveu a coleta de material bibliográfico e de dados geológicos, estruturais e hidrogeológicos que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho.

2.1.1 Levantamento bibliográfico

Em busca do conhecimento existente sobre o meio físico regional, foram consultados os trabalhos desenvolvidos anteriormente que envolveram a bacia do rio Jundiá e região. A revisão bibliográfica efetuada a partir deste levantamento é apresentada no Capítulo 3, juntamente com alguns dados gerados no desenvolvimento da pesquisa.

Um extensivo levantamento dos trabalhos que tratam da hidrogeologia de rochas cristalinas foi feito nas bases de dados textuais e referenciais disponíveis na Internet. No Brasil existem poucos trabalhos que tratam do tema; a maior parte deles é publicada em periódicos internacionais e muitos são de difícil acesso. Mesmo assim, foi possível levantar um considerável volume de informações, que serviu para fornecer uma visão geral do conhecimento existente sobre o assunto. Esta compilação é apresentada no Capítulo 5.

2.1.2 Levantamento de poços tubulares profundos

O levantamento dos poços tubulares profundos cadastrados na área de estudos foi feito a partir do banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e da empresa de perfuração Jundsondas Poços Artesianos, conforme descrito no item 6.1 do Capítulo 6. Com a compilação destes bancos de dados, foi montado, em planilhas do Excel, o banco de dados utilizado no trabalho. Os poços que trazem as coordenadas de localização estão plotados no mapa do apêndice B e parte dos dados do banco de dados compilado é apresentada no apêndice C.

A compilação destes dados não é tarefa simples, pois no Brasil não se dispõe de um banco de dados oficial de boa qualidade. A falta de dados consistentes tem sido um grande empecilho para o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos ou daqueles dirigidos à gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Estes fatos são comentados com maiores detalhes no item 6.1 do Capítulo 6 e na discussão apresentada no Capítulo 8.

Devido à ausência de dados e à existência de dados incorretos, nem todos os poços cadastrados puderam ser utilizados. Foi necessário selecionar diferentes conjuntos de poços para cada etapa do trabalho, o que foi feito da seguinte forma:

- todos os poços cadastrados, mesmo aqueles **sem** coordenadas e **sem** dados hidrodinâmicos, foram considerados na contagem geral e na análise dos erros (Capítulo 6, item 6.1);
- todos os poços cadastrados **com** coordenadas, mesmo que **sem** dados hidrodinâmicos, foram plotados no mapa de localização dos poços (apêndice B);
- todos os poços **com** dados hidrodinâmicos, mesmo que **sem** coordenadas, foram considerados na análise estatística (Capítulo 6, item 6.3);
- apenas os poços **com** coordenadas e **com** dados hidrodinâmicos foram considerados no estudo da variação espacial da produtividade (Capítulo 7).

Define-se como “dados hidrodinâmicos” aqueles referentes ao nível estático, nível dinâmico e vazão dos poços, coletados no teste de bombeamento e que possibilitam o cálculo da capacidade específica (Q/s).

2.1.3 Preparação de mapas temáticos

Os mapas produzidos neste trabalho e/ou digitalizados foram confeccionados da seguinte forma:

- a) Mapas topográfico e hipsométrico: as curvas de nível com equidistância de 20 metros foram digitalizadas em mesa digitalizadora a partir das bases cartográficas em escala 1:50.000. O arquivo com extensão “dwg” do Autocad foi importado para o ArcView, onde foi construído o mapa hipsométrico. Ele também foi utilizado na construção do Modelo Digital do Terreno (MDT), por meio do tratamento com a rotina em Autolisp “vert14.lsp”, cujo produto foi importado no programa Surfer sob a forma de arquivo “txt”.
- b) Drenagem: A rede de drenagem também foi digitalizada no Autocad a partir das bases cartográficas em escala 1:50.000.
- c) Lineamentos: A imagem de radar em escala 1:250.000 foi utilizada por destacar as feições estruturais do terreno e propiciar visão completa dos lineamentos regionais. Neste procedimento, seguiu-se a metodologia proposta por Liu (1987) e Wise (1982). A separação dos vários sistemas de lineamentos foi possível com a digitalização em diferentes camadas de informação. As fotografias aéreas de escala 1:60.000 foram utilizadas para o traçado dos lineamentos em escala de maior detalhe e também foram digitalizadas. Um terceiro mapa de lineamentos foi obtido a partir do mapa de drenagem impresso em escala 1:100.000. Os diagramas de rosetas foram construídos no Autocad, por meio da rotina “roseta.lsp”.

A utilização dos termos “lineamento”, “alinhamento”, “lineação” e “fratura” para se referir às feições lineares da superfície terrestre tem gerado discussões e interpretações equivocadas, motivo pelo qual considera-se adequado tecer as seguintes considerações.

No presente trabalho, adota-se os conceitos de O’Leary et al. (1976), que apresentam uma ampla revisão sobre o assunto. De acordo com O’Leary et al. (1976, p. 1467), o termo “lineamento” (*lineament*, em inglês) deve ser usado em um sentido essencialmente geomorfológico: “um lineamento é uma feição linear simples ou composta, mapeável, cujas partes são alinhadas de forma retilínea ou levemente curvilínea e que

diferem do padrão de feições adjacentes, presumivelmente refletindo um fenômeno de subsuperfície”. O termo “lineação” (*lineation*, em inglês) deve ser utilizado em estudos de escala mesoscópica, conforme sua concepção original, para se referir a uma feição petrográfica pertencente à estrutura interna da rocha (lineação mineral, por exemplo). O termo “alinhamento” (*alignment*, em inglês) pode ser usado para descrever informalmente qualquer linha definida pelo alinhamento de feições retilíneas.

O termo “fratura” (*fracture*) não é citado por aqueles autores, mas considera-se seu uso inadequado para se referir às feições lineares identificadas em imagens de sensores remotos. As fraturas constituem estruturas geológicas identificáveis em escala mesoscópica ou microscópica e, de acordo com as definições de Allaby e Allaby (1990), definem qualquer descontinuidade rúptil do material, incluindo, portanto, juntas (*joint*) e falhas (*fault*). As juntas constituem fraturas rúpteis ao longo das quais não houve movimentação paralelamente ao plano de fratura e as falhas constituem fraturas rúpteis ao longo das quais ocorreu movimento relativo entre blocos adjacentes.

Emprega-se ainda o termo “feixe estrutural” para designar os grandes alinhamentos estruturais formados pelas descontinuidades regionais que controlam as morfoestruturas.

2.1.4 Mapeamento geológico

O mapa geológico da área foi feito em duas etapas. A primeira etapa envolveu a compilação dos mapas geológicos preexistentes. Existem levantamentos geológicos em escala 1:50.000 provenientes de um antigo convênio entre a UNESP e o extinto Pró-Minério, feitos sobre as bases cartográficas do IBGE: Folha Atibaia (Oliveira et al., 1985), Folha Jundiá (Batista et al., 1986), Folha Santana de Parnaíba (Batista et al., 1987) e Folha Cabreúva (Hackspacher et al., 1989). Além destes, existe ainda o mapeamento de Galembeck (1997), também em escala 1:50.000, na área do Maciço Granítico Itu. O mapeamento de Neves (1999) enfoca as coberturas cenozóicas da região de Jundiá e também foi considerado nesta compilação. Nas áreas não abrangidas por estes levantamentos, foram efetuadas fotoanálise e fotointerpretação, intercaladas com trabalhos de campo. O mapa geológico resultante é apresentado no apêndice A.

Na individualização das unidades geológicas foram utilizadas fotografias aéreas em escala 1:60.000, segundo os critérios propostos por Soares e Fiori (1976), com posteriores visitas de campo.

É importante ressaltar que o material que compõe a unidade geológica aqui denominada Depósitos Colúvio-Eluviais foi, por muito tempo, ignorado nos mapeamentos geológicos, que enfocavam mais os litotipos do Embasamento Cristalino. Porém, seu mapeamento é simples, uma vez que confere ao terreno uma textura “lisa” vista em foto aérea, distinta das áreas com rochas pré-cambrianas e paleozóicas. Normalmente, estas coberturas estão associadas a relevos assimétricos: elas ocupam encostas de baixa declividade e, do lado oposto, a encosta tem mergulho mais íngreme e a textura em foto aérea é mais “rugosa”, com maior número de canais de drenagem. Em fotografias de escala 1:60.000, é importante a utilização de estereoscópios de maior aumento para traçar alguns corpos, apesar de que os mais extensos são visíveis mesmo com o estereoscópio de mesa.

2.1.5 Coleta de dados estruturais

Durante os trabalhos de campo, concomitantemente ao mapeamento e verificação das unidades litoestratigráficas, foi feito o levantamento de dados estruturais. As medidas foram feitas com bússola modelo Clar, envolvendo o maior número possível de estruturas geológicas: foliações, zonas de cisalhamento dúctil, zonas cataclásticas, juntas, falhas e contatos litológicos.

2.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Para a descrição da forma de tratamento dos dados, os procedimentos são divididos em dois grupos: o tratamento dos dados relacionados à geologia estrutural e o tratamento dos dados relacionados à hidrogeologia da área.

2.2.1 Geologia estrutural da área

No estudo da geologia estrutural da área (Capítulo 4) foi realizada a análise do fraturamento do maciço rochoso, utilizando-se os mapas temáticos e os dados estruturais coletados em campo, o que permitiu a definição dos sistemas de juntas, das falhas e zonas de falhas e dos domínios estruturais. A comparação entre os principais conjuntos de juntas, as anomalias de drenagem e as anomalias de relevo levaram à definição da compartimentação morfoestrutural da área. As características estruturais dos compartimentos, os diferentes padrões de relevo e de drenagem e a distribuição das coberturas superficiais (sedimentares ou de alteração) são objetos da análise morfotectônica que permitem as interpretações quanto à evolução geológica cenozóica.

2.2.1.1 Análise do fraturamento do maciço rochoso

Por maciço rochoso, entende-se uma massa de rocha intacta constituída de blocos discretos interrompidos por descontinuidades (Fiori e Carmignani, 2001). As descontinuidades constituem planos de fraqueza como juntas, falhas, contatos litológicos e foliações, que conferem ao maciço rochoso seu caráter descontínuo.

A análise do fraturamento do maciço rochoso conduzida no presente trabalho obedeceu duas etapas distintas: a análise em escala macroscópica e a análise em escala mesoscópica.

A análise macroscópica envolveu a descrição dos mapas topográfico, hipsométrico, de lineamentos e de drenagem. O traçado das estruturas regionais que segmentam a área foi feito com base na sobreposição de informações contidas em todos estes mapas, aliadas às informações obtidas na literatura geológica da região.

Na análise mesoscópica, os dados estruturais coletados em campo foram tratados estatisticamente por meio de estereogramas. Os estereogramas foram construídos no programa Stereonet, utilizando-se sempre a projeção no hemisfério inferior. Foram montados estereogramas em projeção ciclográfica, em projeção polar ou de ambos os tipos, conforme a necessidade e o número de medidas disponível. Conceitos básicos de projeção estereográfica podem ser consultados em Carneiro (1996).

Os dados estruturais foram separados por litotipo afetado e, posteriormente, por domínios estruturais. A caracterização estrutural dos diferentes domínios permitiu reconhecer as principais feições estruturais que compartimentam a área.

2.2.1.2 Compartimentação morfoestrutural

A compartimentação morfoestrutural da área seguiu a metodologia utilizada por Neves (1999) e Neves et al. (2003). Os parâmetros considerados na definição dos compartimentos são: o arranjo espacial dos tipos de relevo, o posicionamento dos feixes de lineamentos, os diferentes níveis hipsométricos, a presença de escarpas alinhadas, anomalias de drenagem e alinhamento de confluências. Para tanto, foram utilizados, além do MDT, os mapas geológico, geomorfológico, de lineamentos, de drenagem e topográfico. Trabalhos de campo concentrados ao longo dos limites entre os compartimentos permitiram a identificação dos feixes estruturais que controlam a morfologia do terreno.

2.2.1.3 Análise morfotectônica

Na análise morfotectônica, utiliza-se as premissas da Geomorfologia Tectônica, que considera a estruturação do relevo como resultado da interação entre a tectônica e a heterogeneidade geológica (Penk, 1953; Kostenko, 1975; Summerfield, 1991 e 2000).

Uma importante ferramenta neste tipo de abordagem é a identificação das “escarpas de falha” (Stewart e Hancock, 1990). A atuação dos processos intempéricos dá origem às “escarpas de falha residuais”, ou seja, escarpas maduras onde não se pode mais observar os sinais claros da atuação tectônica (Figura 2.1a). A identificação de feições associadas às escarpas, como facetas triangulares, também auxilia na identificação de condicionamento tectônico (Burbank e Anderson, 2001) (Figura 2.1b).

Outra ferramenta é a investigação dos padrões e das anomalias de drenagem. As anomalias representam perturbações locais da rede de drenagem, como inflexões, cotovelos e capturas, comumente associadas a efeitos neotectônicos (Howard, 1967; Ouchi, 1985; Leeder e Alexander, 1987). A presença de bacias assimétricas se relaciona a processos de basculamento tectônico (Cox, 1994; Keller e Pinter, 1996) (Figura 2.1c) e o alinhamento de confluências pode indicar falhamento e abatimento de blocos (Figura 2.1d).

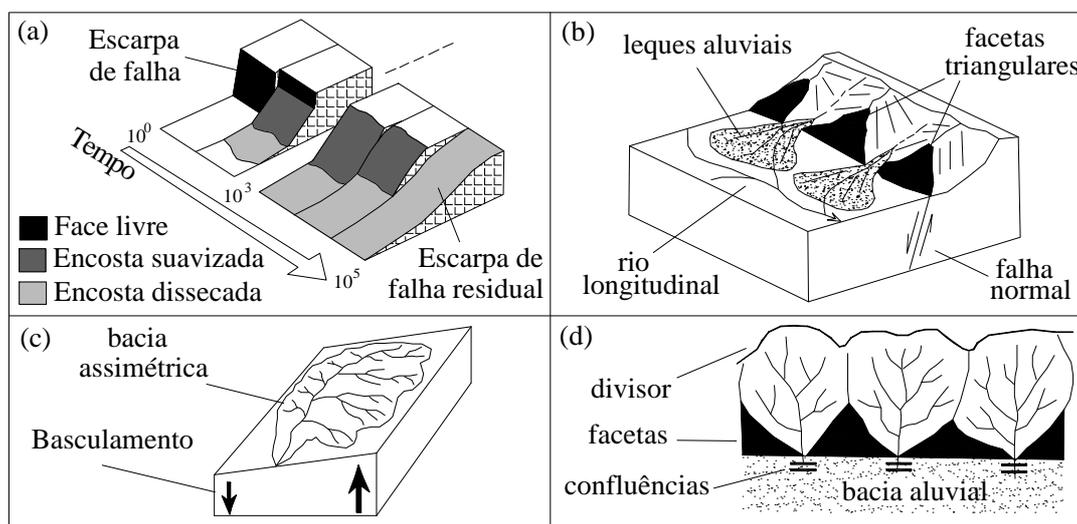


Figura 2.1: Feições utilizadas por Neves et al. (2003) no estudo morfotectônico da região de Jundiáí. (a) Evolução das escarpas de falha para escarpas de falha residuais (Stewart e Hancock, 1990); (b) Formação de facetas triangulares e leques aluviais (Burbank e Anderson, 2001 modificado); (c) Bacia assimétrica indicando basculamento tectônico (Keller e Pinter, 1996 modificado) e (d) Alinhamento de confluências em zona de falha com abatimento de bloco tectônico.

Os estudos morfotectônicos também requerem a caracterização das coberturas sedimentares cenozóicas, a definição de áreas sujeitas a sedimentação e erosão e o levantamento de estruturas geológicas rúpteis.

2.2.2 Hidrogeologia da área

Com os dados dos poços tubulares profundos cadastrados foi possível descrever a evolução do número de perfurações ao longo dos anos e a predominância dos tipos de uso da água subterrânea na bacia. A caracterização dos sistemas aquíferos também foi feita com base nestes dados, utilizando-se os métodos descritos a seguir.

2.2.2.1 Estatística Descritiva

O tratamento estatístico dos parâmetros hidrogeológicos foi feito com auxílio dos programas Excel e Statistica, utilizando-se conceitos básicos da Estatística Descritiva e Análise de Correlação (Vieira, 1980; Wonnacott e Wonnacott, 1990). Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 6.

A comparação de distribuições de frequência utilizando gráficos de frequência acumulada tem sido constantemente empregada em trabalhos hidrogeológicos. Como exemplo, cita-se Banks e Robins (2002) que propõem a utilização destes diagramas na previsão de resultados com base nos dados dos poços existentes em uma determinada área (item 5.4).

2.2.2.2 Superfícies de tendência e mapa de resíduos

As superfícies de tendência são utilizadas no item 6.5 do Capítulo 6, para mostrar a variação dos níveis d'água ao longo do tempo, e no Capítulo 7, para construção dos mapas de resíduos da capacidade específica. Tanto as superfícies de tendência quanto os mapas de resíduos foram confeccionados no programa Surfer.

O conceito de superfície de tendência é definido por Landim (1998), como a superfície que melhor se adapta ao conjunto de observações, construída por meio de técnicas matemáticas. Permite analisar o comportamento espacial de variáveis dependentes condicionadas a uma, duas ou mais variáveis independentes (Figura 2.2). O estudo permite

que dados mapeáveis sejam separados em duas componentes: uma de natureza regional, representada pela superfície, e outra que revela as flutuações locais, representada pelos valores residuais. Assim, para a detecção de anomalias, calcula-se superfícies de tendência de baixo grau e os respectivos mapas de resíduos. O mapa de resíduos mostra os locais onde os valores medidos se distanciam da superfície de tendência regional, no sentido positivo ou negativo.

As superposições entre os mapas de resíduos e os outros mapas (item 7.1 do Capítulo 7) também foram feitas com o programa Surfer.

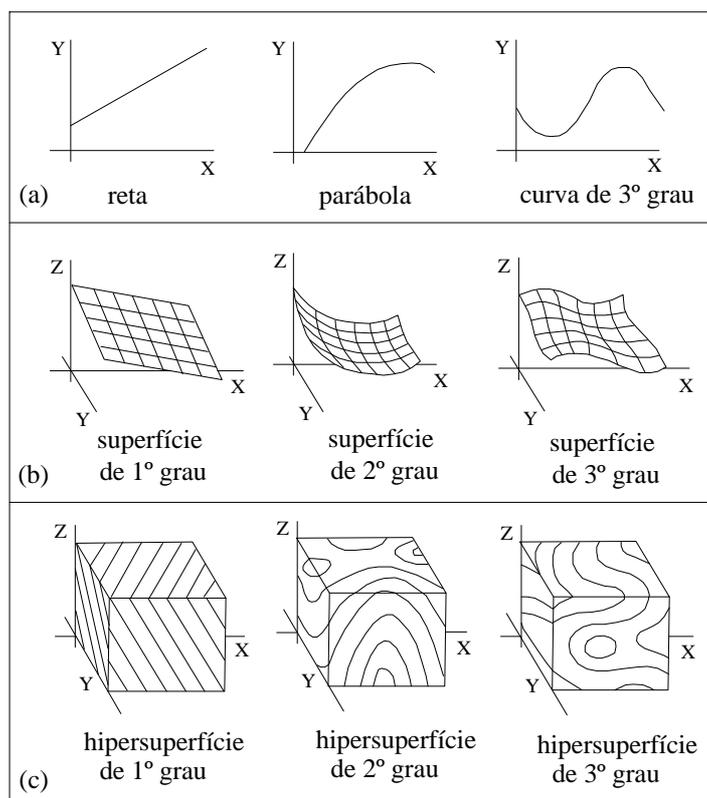


Figura 2.2: Comportamento espacial de variáveis dependentes condicionadas por (a) uma variável independente (linhas), (b) duas variáveis independentes (superfícies) e (c) três variáveis independentes (hipersuperfícies) (Landim, 1998).

2.2.2.3 Geometria do Sistema Aquífero Tubarão

Para definir a geometria aproximada do Sistema Aquífero Tubarão na área de estudos, foram utilizadas informações de todos os poços cadastrados que atravessam o Grupo Itararé na Bacia do Paraná e que trazem informações do perfil geológico-constutivo. Dentre eles estão poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino, mas que atravessam camadas do Grupo Itararé; poços mistos, que exploram ambos os sistemas

aquíferos, e também poços que explotam apenas o Sistema Aquífero Tubarão, mas que atingem o topo do Embasamento Cristalino.

Considera-se estes dados bastante confiáveis, pois apesar de muitas vezes não haver boa qualidade na descrição dos litotipos, a diferença entre a construção de poços em rochas sedimentares e em rochas cristalinas é muito grande e normalmente isto é registrado durante a perfuração. Portanto, o problema encontrado aqui não é a qualidade dos dados, mas sua distribuição irregular, motivo pelo qual salienta-se que os mapas obtidos, tanto o do topo do Embasamento Cristalino, quanto o de isoespessura do Sistema Aquífero Tubarão, são aproximações da realidade. A interpolação dos dados foi feita no programa Surfer, utilizando-se o Método da Mínima Curvatura.

2.2.2.4 Mapas potenciométricos

Os mapas potenciométricos foram confeccionados à mão, utilizando-se conceitos básicos encontrados em vários livros de Hidrogeologia, dentre os quais destaca-se o procedimento detalhado descrito em EPA (1994).

Embora o Sistema Aquífero Cristalino seja heterogêneo e anisotrópico, considera-se possível traçar uma superfície potenciométrica virtual conforme os preceitos de Custodio e Llamas (1996) (item 5.2.2, Capítulo 5). Os dados de medida do nível estático selecionados para este fim mostraram coerência entre si, permitindo o traçado das equipotenciais em concordância com a rede de drenagem e a topografia. Obviamente, em escala local, o mapa potenciométrico sofrerá modificações importantes, conforme a presença de estruturas controladoras do fluxo subterrâneo.

Recentemente, muitos trabalhos que utilizam métodos de interpolação automáticos processados em programas computacionais, têm gerado mapas com erros grosseiros, pois não consideram a influência da rede de drenagem, tampouco da topografia do terreno, na geometria do aquífero.

Outro cuidado necessário na construção de mapas potenciométricos a partir de dados obtidos nos bancos de dados disponíveis é a observação da data de construção dos poços ou do teste de bombeamento no qual se obteve a medida do nível estático. Tal como foi observado neste trabalho (item 6.4, Capítulo 6), a superfície potenciométrica poderá sofrer variações conforme a evolução da exploração do aquífero ao longo do tempo. Assim, é necessário utilizar dados correspondentes a um mesmo período, de preferência dados consistidos.

2.3 INTEGRAÇÃO DE DADOS

O estudo do comportamento da água subterrânea em terrenos cristalinos é tema relativamente recente. A integração entre dados geológico-estruturais e hidrogeológicos não é prática comum, pois existem divergências entre as duas especialidades. Poucos trabalhos aplicam técnicas de análise estrutural à caracterização hidrogeológica de aquíferos fraturados e, em decorrência, ainda não existem métodos consagrados. Vários trabalhos conduzidos sobre o tema consideram diferentes fatores como intervenientes na produtividade dos poços (ver Capítulo 5).

A maior parte dos estudos realizados nos países mais ricos utiliza métodos dispendiosos, como geofísica e medidas de tensão *in situ*. Atualmente, existem muitas linhas de pesquisa que utilizam métodos de sensoriamento remoto e SIG para estudar a variação da produtividade dos poços em terrenos cristalinos. A principal limitação destes métodos está no desconhecimento de qual ou quais fatores efetivamente interferem na produtividade dos aquíferos fraturados e, conseqüentemente, qual peso deve ser atribuído a cada um deles. No presente trabalho, considera-se imprescindível a realização de estudos geológico-estruturais e hidrogeológicos em escala regional e de detalhe para, só então, proceder outros métodos com maior segurança.

Dentro dos objetivos deste trabalho, está a avaliação do quadro geológico-estrutural e morfoestrutural da área e sua influência na produtividade dos poços tubulares profundos já perfurados, passando pela caracterização hidrogeológica dos aquíferos. Na integração dos dados, optou-se por uma abordagem em escala regional e outra em escala local. Em escala regional, a simples superposição entre mapas permitiu a constatação das limitações existentes no uso de associações entre produtividade de poços e lineamentos extraídos de imagens de sensores remotos, seja imagem de radar ou fotografias aéreas, sem análises mais detalhadas. Partiu-se então para o estudo em escala local em áreas selecionadas, com a construção de perfis geológicos e a plotagem dos poços que trazem os perfis geológico-constitutivos e dados hidrodinâmicos. A metodologia revelou-se adequada, mas mostrou que pode haver também vários outros fatores que interferem na variável em estudo.