

## CAPÍTULO 6 – HIDROGEOLOGIA DA ÁREA

O estudo hidrogeológico da área teve como base os dados de poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Tubarão e/ou o Sistema Aquífero Cristalino na bacia do rio Jundiaí e áreas adjacentes. Existem ainda alguns poços que exploram o Sistema Aquífero Cenozóico. Embora o foco do trabalho seja a bacia do rio Jundiaí, optou-se por envolver todos os poços presentes na área que circunscreve a bacia (Figura 1.1) e, com isso, melhorar a representatividade das amostras. Espera-se que o comportamento dos aquíferos, tanto na bacia quanto nas adjacências não seja diferente, já que as características geológicas são similares.

Neste capítulo, apresenta-se inicialmente o banco de dados compilado e uma avaliação da qualidade dos dados disponíveis. Em seguida, apresenta-se a análise da evolução do número de poços perfurados por ano e do uso da água subterrânea. Os parâmetros hidrogeológicos dos poços são apresentados por meio de Estatística Descritiva, em busca da caracterização dos sistemas aquíferos e, concomitantemente, apresenta-se a potenciometria dos sistemas aquíferos e algumas tentativas de correlação entre a produtividade dos poços e fatores que possivelmente a controlam. Segue um item abordando a variação dos níveis d'água e da produtividade dos poços ao longo do século XX. A influência da localização dos poços em relação às estruturas geológicas é o tema abordado no próximo capítulo.

### 6.1 BANCO DE DADOS DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

Um banco de dados confiável, além de ser essencial para a caracterização hidrogeológica de uma área, é a base para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. A inexistência de um banco de dados completo, que seja atualizado constantemente e que esteja disponível para o público é um dos principais empecilhos para o desenvolvimento do conhecimento hidrogeológico e para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. Qualquer profissional do setor já deve conhecer a situação dispersa e sem dados consistidos em que se encontram os cadastros de poços no estado de São Paulo e, muito provavelmente, no restante do país.

Nos últimos anos, houve um crescimento expressivo na perfuração de poços tubulares profundos. O órgão gestor no Estado de São Paulo, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), não está estruturado para organizar os dados das perfurações já existentes, de acrescentar novos dados e, o que é mais grave, de atuar na fiscalização das obras de captação

(São Paulo, 2003). A enorme quantidade de poços clandestinos e o descontrole quanto à situação dos poços antigos são problemas que crescem a cada dia. Poços desativados, muitas vezes por interferência do cone de rebaixamento em locais muito explorados, comumente são abandonados sem as devidas medidas de proteção à contaminação.

Apesar dos problemas de consistência e integração de informações dos bancos de dados, eles são os únicos disponíveis para a caracterização hidrogeológica e para o conhecimento, ainda que parcial, da situação de exploração de água subterrânea na bacia. O banco de dados utilizado neste trabalho foi compilado a partir dos cadastros do DAEE, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e da empresa de perfuração “Jundsondas Poços Artesianos”.

Os dados do DAEE são armazenados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIDAS). Apesar de atualmente estar sendo parcialmente disponibilizado no *site* do DAEE (<http://www.dae.sp.gov.br>), o acesso completo ao SIDAS é ainda bastante difícil e só pode ser feito diretamente na central, na cidade de São Paulo. Os dados da CPRM estão organizados em um banco de dados também denominado Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, mas cuja sigla é SIAGAS. Os dados do SIAGAS têm abrangência nacional e estão disponibilizados para o público no *site* da CPRM (<http://www.cprm.sp.gov.br>). A fonte dos dados do SIAGAS para o Estado de São Paulo é o DAEE e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Os dados da Jundsondas foram gentilmente fornecidos pela empresa, em fichas do seu cadastro interno.

A integração de informações dos poços em um único banco de dados não é um processo simples e automático, pois cada um possui formato diferente, numeração diferente e há repetições de poços. Por este motivo, foi necessário um trabalho criterioso de consistência de dados para eliminar poços repetidos ou outros que não correspondessem à realidade.

Na compilação dos bancos de dados, foram obtidos 1.045 poços cadastrados. Infelizmente, a maior parte deles não pôde ser incluída no estudo devido a erros ou à ausência de dados essenciais. A ausência de certas variáveis, como dados de produtividade, vazão de exploração ou coordenadas geográficas, impossibilita a avaliação em termos de disponibilidade hídrica ou em qualquer outro tipo de pesquisa. Estes problemas surgem devido à falta de um banco de dados padronizado e de fácil consulta que, por lei, é responsabilidade dos órgãos gestores dos recursos hídricos.

O gráfico da Figura 6.1 mostra a porcentagem de erros e de ausência de dados dos bancos de dados utilizados nesta compilação. Foram consideradas algumas categorias de dados que são fundamentais para o estudo hidrogeológico, tanto no setor técnico-científico quanto no setor de gerenciamento dos recursos hídricos. Cabe destacar que estes são os erros facilmente

identificáveis; erros de digitação menos grosseiros, bem como erros de medida, obviamente não podem ser detectados neste tipo de avaliação.

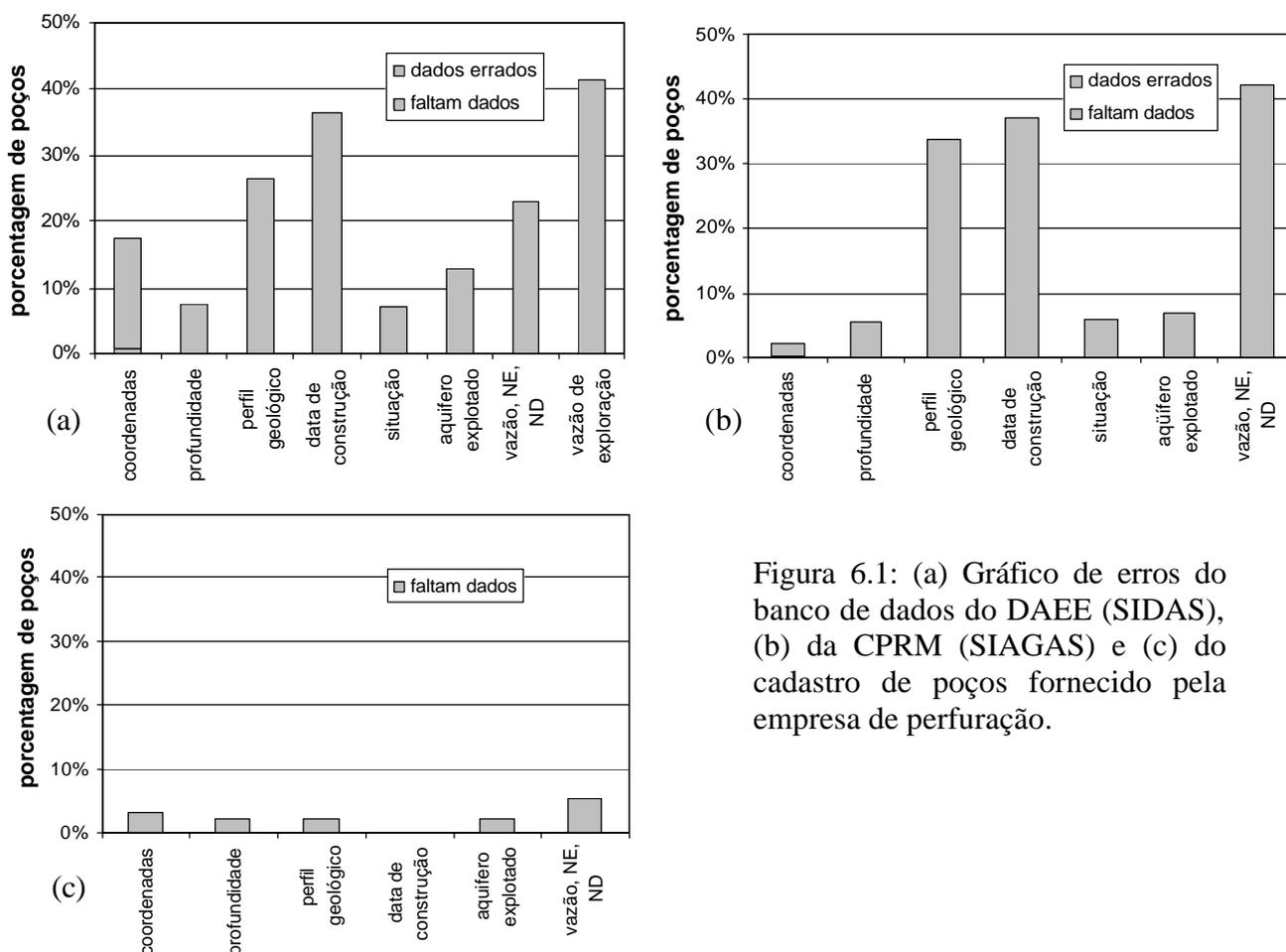


Figura 6.1: (a) Gráfico de erros do banco de dados do DAEE (SIDAS), (b) da CPRM (SIAGAS) e (c) do cadastro de poços fornecido pela empresa de perfuração.

Todos os poços que possuem coordenadas de localização estão plotados no mapa do apêndice B. A numeração original dos poços foi mantida, já que cada novo levantamento ou compilação de dados tem adotado uma numeração diferente, dificultando consultas posteriores.

Alguns dados cadastrais dos poços são apresentados no apêndice C onde constam as seguintes variáveis: número do poço, coordenadas geográficas (UTM), cota da boca do poço (m), vazão ( $m^3/h$ ), nível estático (m), nível dinâmico (m), profundidade do poço (m), município, endereço, bairro, proprietário, uso da água, situação do poço, data de construção e fonte dos dados.

## 6.2. EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE POÇOS E USO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

De acordo com os dados cadastrais, o início da perfuração de poços na bacia do rio Jundiá data do começo do século XX. O poço mais antigo de que se tem registro foi instalado

em 1928 e, a partir daí, o número de perfurações de poços por ano aumenta lentamente até o início dos anos 70 (Figura 6.2). Durante a década de 70, o número de perfurações cresce exponencialmente até 1980 e, em 1981, sofre uma queda brusca. Ao longo da década de 80 e até o final da década de 90, o número de perfurações por ano se mantém relativamente baixo e segue outro crescimento importante de 1997 até o ano 2000. A partir de 2001 ocorre nova queda.

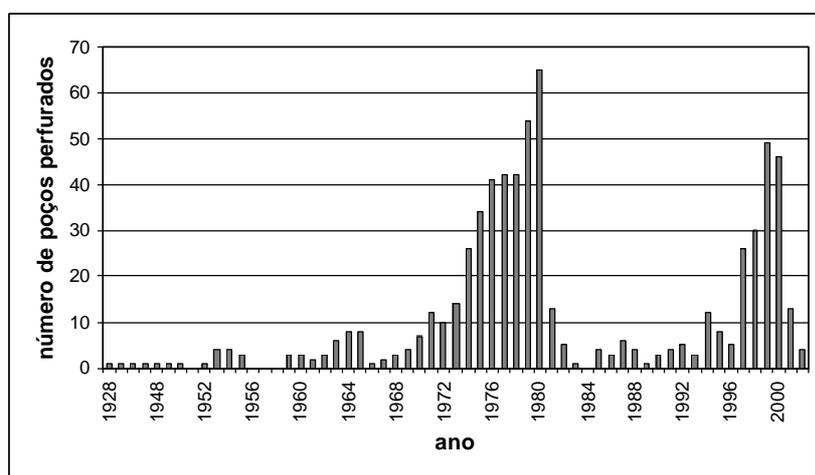


Figura 6.2: Número de poços perfurados por ano na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes de acordo com o banco de dados compilado neste trabalho.

Considerando-se a existência de muitos poços clandestinos e as deficiências dos bancos de dados oficiais, é possível que, na realidade, o número de perfurações por ano tenha evoluído de forma um pouco diferente. No entanto, Oda (1998) mostra resultados semelhantes para a evolução do número de poços por ano na região entre Salto de Pirapora e Itu (Figura 6.3). Naquela área, também se observa um crescimento acentuado do número de perfurações por ano ao longo da década de 70 e uma queda brusca em 1981. Há, porém, uma diferença no crescimento durante a década de 80, onde se nota forte incremento no ano de 1985, o que não ocorre na região de Jundiá.

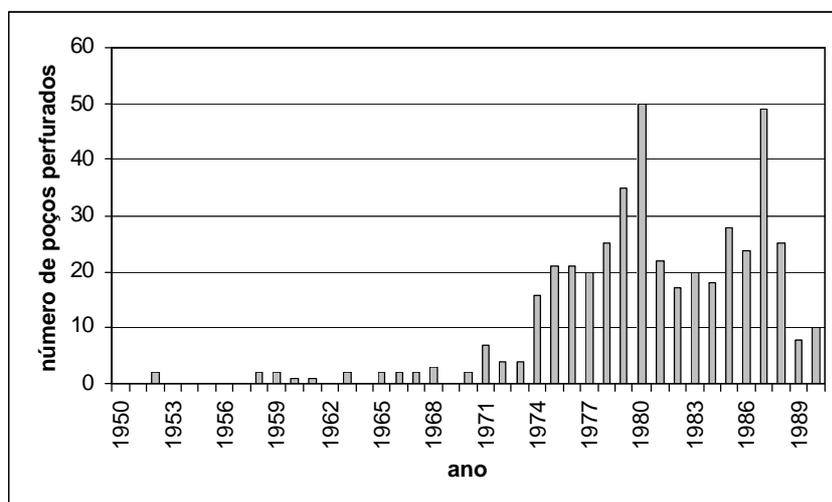


Figura 6.3: Gráfico de evolução do número de poços construídos por ano na região entre Salto de Pirapora e Itu (Oda, 1998).

Por vários motivos, muitos dos poços perfurados não estão ativos atualmente. Os poços têm vida útil limitada e pode haver problemas de obstrução da cavidade, diminuição da produtividade, rebaixamento do nível d'água, dentre outras causas. Em 1996, houve uma checagem da situação de grande parte dos poços cadastrados. O gráfico da Figura 6.4 mostra que 80% destes poços estavam equipados, 11% estavam abandonados, 3% não foram checados e o restante, por algum motivo, não estavam sendo utilizados ou não haviam sido instalados.

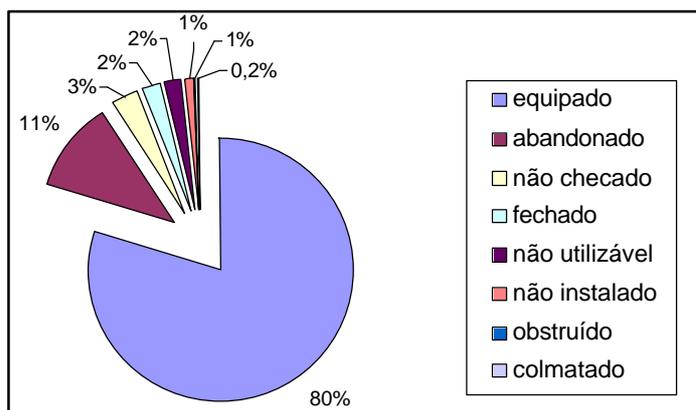


Figura 6.4: Situação dos poços na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes a partir de 1996, de acordo com o banco de dados SIAGAS.

Frente a estes fatos, coloca-se uma questão: os poços abandonados são, necessariamente, os mais antigos ou eles são abandonados por motivos de interferência entre cones de rebaixamento e queda da produtividade? O gráfico da Figura 6.5 mostra que as maiores porcentagens de poços abandonados são aqueles construídos nas décadas de 40, 50, 60 e no ano de 1981, ano seguinte ao forte incremento na perfuração de poços da década de 70.

Com tal variação na exploração dos aquíferos ao longo das décadas, surge o questionamento quanto à variação dos níveis d'água como consequência do rebaixamento provocado pela extração. Este assunto é discutido no último item deste capítulo.

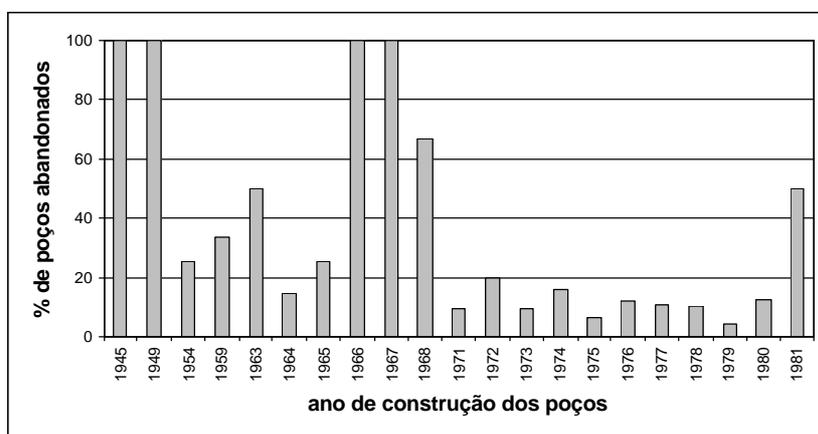


Figura 6.5: Porcentagem de poços abandonados por ano de construção na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes de acordo com o banco de dados compilado.

Dentre os poços cadastrados, 84,4% trazem informações quanto ao uso da água subterrânea na área de estudos (Figura 6.6). A maior parte (39%) se destina ao abastecimento industrial, 18% ao uso doméstico; 9% não estavam sendo utilizados; porcentagens iguais de 8% se destinavam ao abastecimento urbano e a outros usos como, por exemplo, para lazer; 7% eram usados para irrigação; 6% para serviços (como postos de gasolina etc); 4% para pecuária; apenas 1% para usos múltiplos e menos de 1% para mineração e piscicultura.

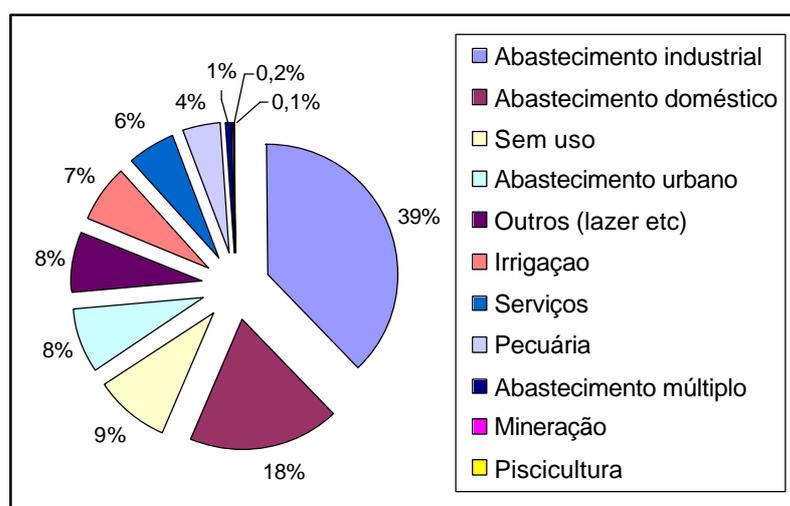


Figura 6.6: Uso da água subterrânea na bacia do rio Jundiaí e áreas adjacentes.

### 6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS COM BASE NOS DADOS DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

Neste item são analisados os dados de capacidade específica, vazão, níveis d'água e profundidade dos poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Cristalino, o Sistema Aquífero Tubarão, ambos os sistemas aquíferos e o Sistema Aquífero Cenozóico na bacia do rio Jundiaí e áreas adjacentes.

#### 6.3.1 Sistema Aquífero Cristalino

No banco de dados compilado existem 899 poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino da área de estudos (apêndice C). Destes, 362 se situam dentro dos limites da bacia do rio Jundiaí e os restantes estão nas adjacências (apêndice B).

Do total de poços cadastrados situados no Cristalino, 47% exploram apenas a rocha fraturada, 1,4% exploram apenas o manto de intemperismo, 7% exploram tanto o manto de intemperismo quanto a rocha sã e o restante (quase 45%) não apresenta tal informação. Muitas vezes faltam perfis geológicos e construtivos nos bancos de dados disponíveis e, portanto, a porcentagem de poços que exploram apenas o manto de alteração pode ser bem maior. A Figura 6.7 mostra alguns perfis geológico-construtivos típicos dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino na área de estudos, conforme consta no banco de dados compilado.

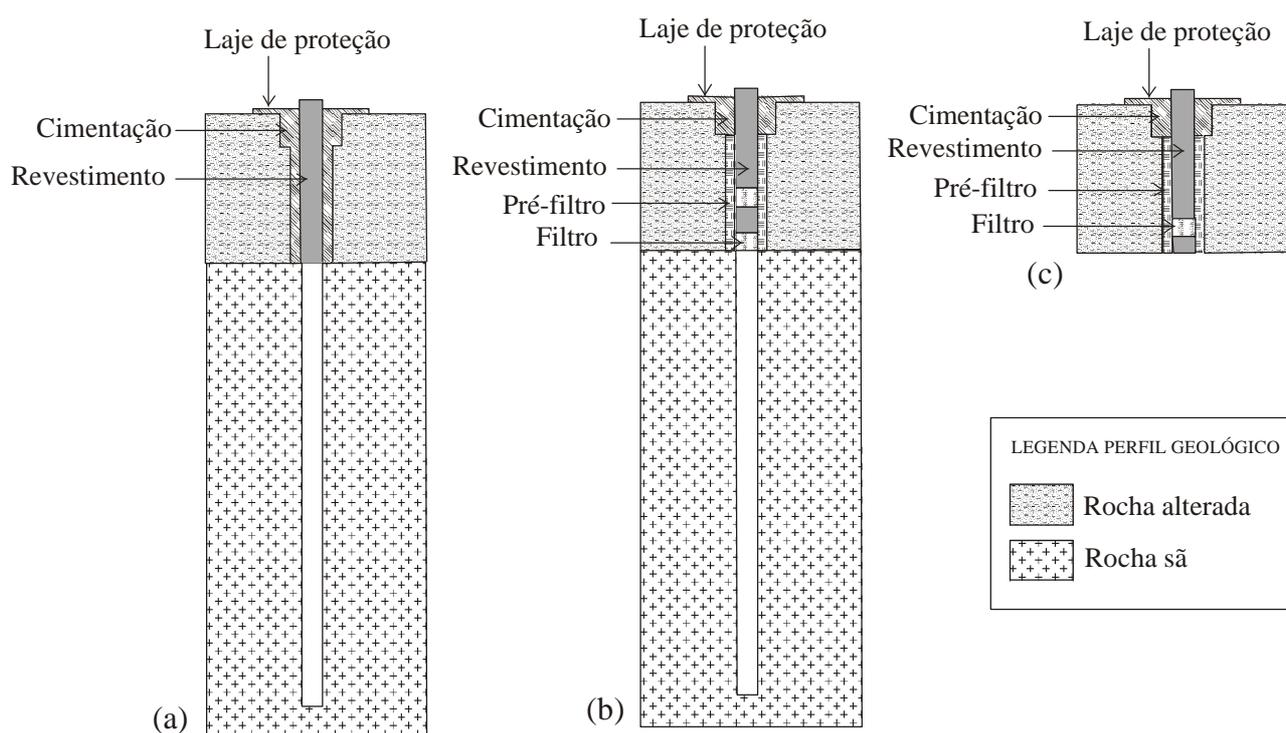


Figura 6.7: Perfis geológico-construtivos típicos dos poços tubulares profundos que exploram (a) apenas a rocha sã, (b) tanto a rocha sã quanto o manto de intemperismo e (c) apenas o manto de intemperismo do Sistema Aquífero Cristalino na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes (sem escalas).

A profundidade dos poços é uma variável que depende muito da escolha do perfurador, das necessidades do cliente e do tipo de uso pretendido. Sabe-se, por exemplo, que muitas vezes há avanço na perfuração de um poço apenas para aumentar o faturamento na obra, independentemente da possibilidade de se obter melhor produtividade em profundidades maiores. Certamente, tais fatores influenciam nos parâmetros estatísticos e na distribuição dos valores aqui apresentados. De qualquer forma, é interessante notar que a distribuição da profundidade dos poços do Sistema Aquífero Cristalino tende a ser do tipo normal (Figura 6.8).

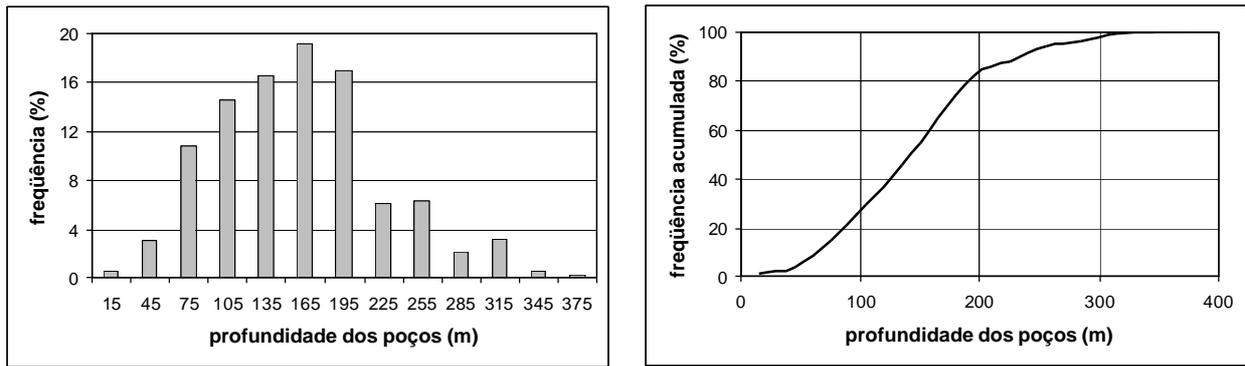


Figura 6.8: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

Os poços que exploram apenas o manto de intemperismo têm profundidade média de 30 metros e mediana de 20 metros; o valor mínimo é 5,4 e o máximo, 68 metros. Já os poços que exploram apenas a rocha sã, ou tanto o manto de intemperismo quanto a rocha sã, têm profundidade média de 156 metros e mediana de 150 metros; o valor mínimo é de 12 e o máximo chega a 370 metros. O desvio padrão está em torno dos 64 metros, com coeficiente de variação de 40,8 %.

A vazão dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino apresenta distribuição exponencial (Figura 6.9), refletindo a grande quantidade de valores baixos e a pequena quantidade de valores altos, como é típico nos aquíferos fraturados. A vazão média é de  $7,6 \text{ m}^3/\text{h}$  e a vazão mediana, mais significativa do que a média neste tipo de distribuição, é de  $4,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . O valor mínimo encontrado é  $0,03 \text{ m}^3/\text{h}$  e o valor máximo considerado seguro, é  $96 \text{ m}^3/\text{h}$ . Quatro valores extremamente altos (iguais a 101,9; 130,6; 359,5 e  $1246,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ) foram considerados possíveis erros de medida ou erros de digitação e foram excluídos da análise estatística. O desvio padrão é de  $9,9 \text{ m}^3/\text{h}$ , com coeficiente de variação de 131%. O gráfico de frequência acumulada da vazão mostra que em quase 90% dos poços a vazão de estabilização é menor do que  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ .

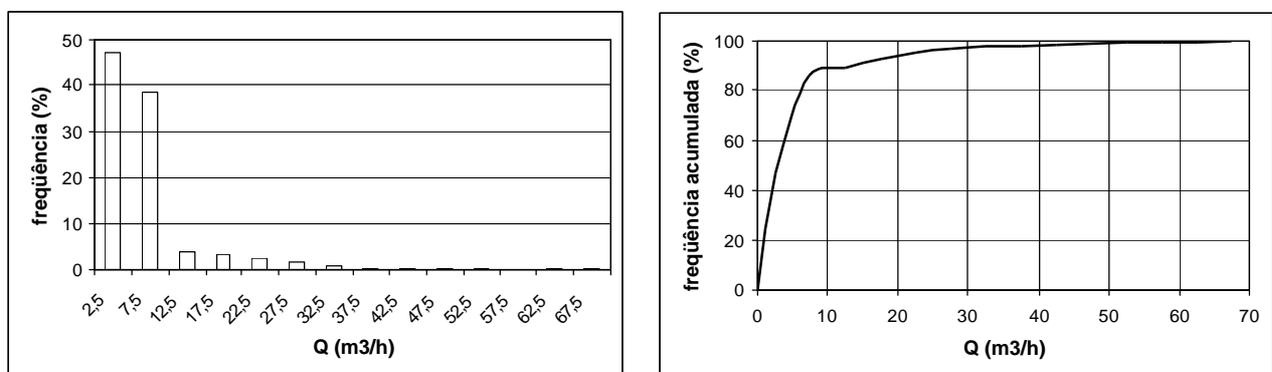


Figura 6.9: Diagramas de frequência e frequência acumulada da vazão dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

A capacidade específica, considerada o parâmetro mais representativo da produtividade do poço (Capítulo 5), apresenta distribuição log-normal (Figura 6.10). Esta distribuição também é consequência da existência de muitos valores baixos e de poucos valores altos. A capacidade específica média é de  $0,24 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , mas a mediana é de apenas  $0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . O valor mínimo é  $0,0002 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e o máximo considerado seguro é  $10,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Da mesma forma que a vazão, alguns valores muito altos de capacidade específica ( $13,5$ ;  $46,3$  e  $199,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ) foram descartados pela possibilidade de constituírem erros de medida. O desvio padrão é de  $0,64 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e o coeficiente de variação chega a 264%.

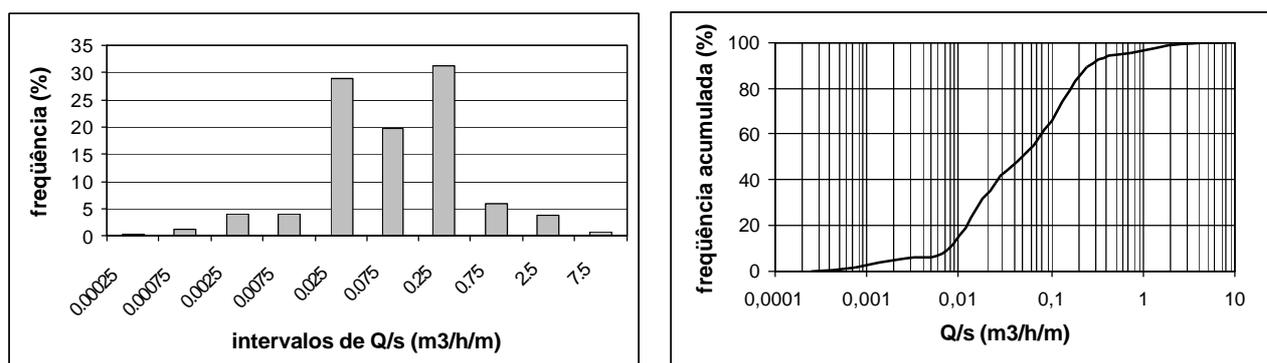


Figura 6.10: Diagramas de frequência e frequência acumulada da capacidade específica dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

As distribuições da profundidade dos níveis estático (NE) e dinâmico (ND) dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino são distintas, a primeira é exponencial e a segunda é do tipo log-normal (figuras 6.11 e 6.12). A profundidade média do NE é de 14 metros e a mediana é de 10 metros, com valor mínimo de 0,34 e máximo de 123 metros; o desvio padrão é de 13 metros e o coeficiente de variação, é de quase 94 %. Para o nível dinâmico, obteve-se profundidade média de aproximadamente 91 metros, mediana de 82 metros, desvio padrão de 50,3 metros e coeficiente de variação de aproximadamente 56 %.

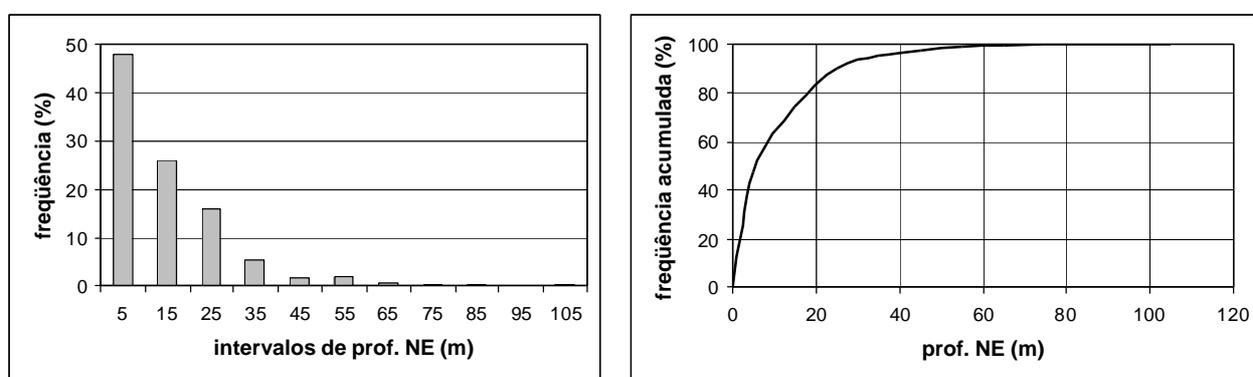


Figura 6.11: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade do nível estático (NE) dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

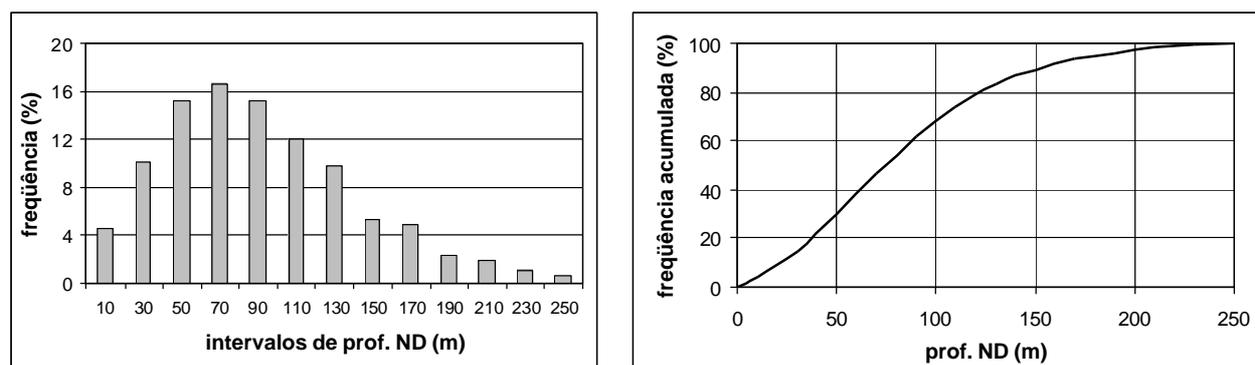


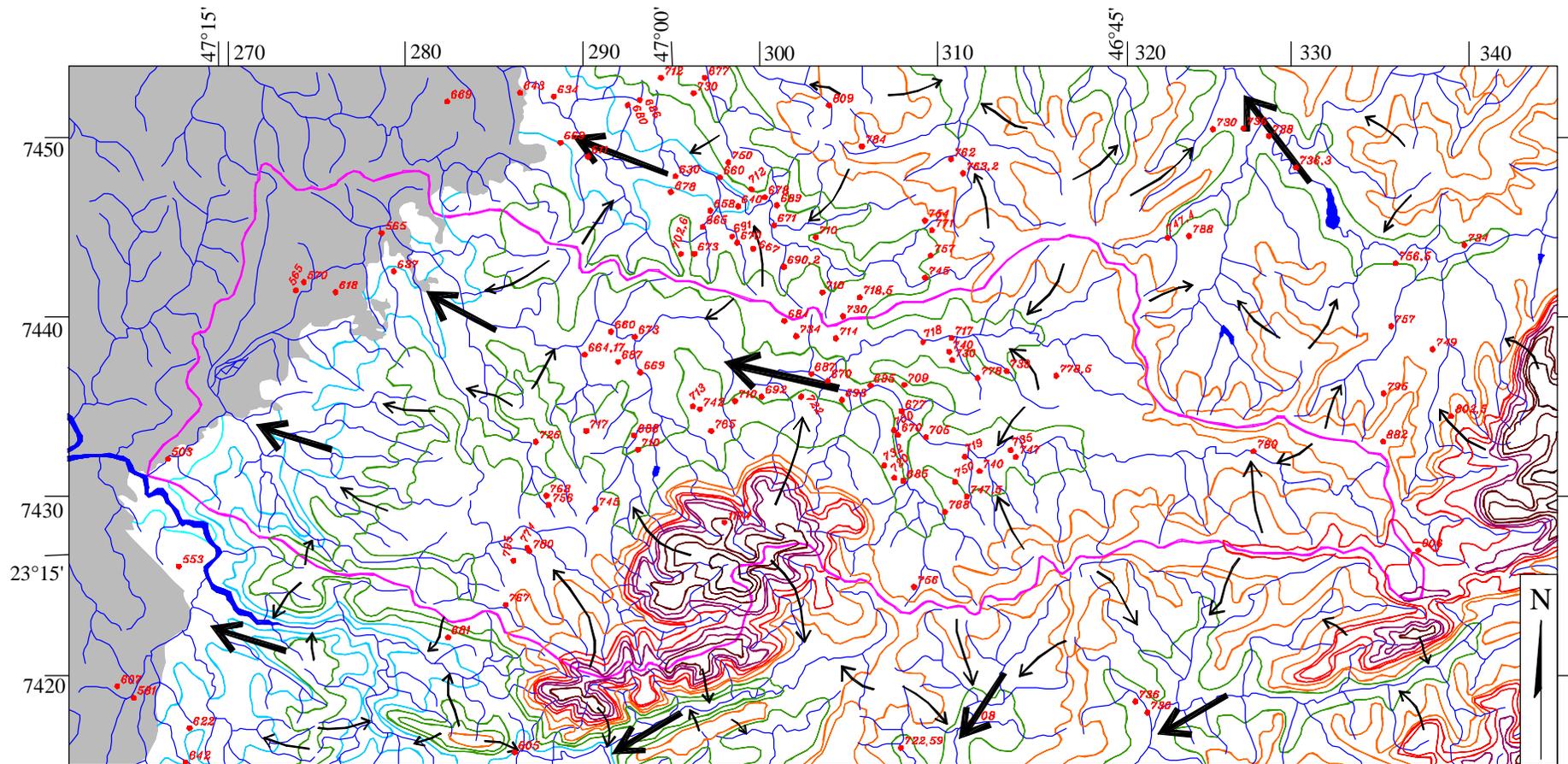
Figura 6.12: Diagramas de freqüência e freqüência acumulada da profundidade do nível dinâmico (ND) dos poços que explotam o Sistema Aquífero Cristalino.

### 6.3.1.1 Potenciometria do Sistema Aquífero Cristalino

Na confecção do mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Cristalino (Figura 6.13) foram utilizadas as cotas do NE dos poços revestidos até o topo da rocha sã, ou seja, daqueles que explotam apenas a rocha fraturada. Para minimizar possíveis efeitos de interferência ou de rebaixamento causado por superexplotação do aquífero (tema discutido no final deste capítulo), foram considerados apenas os poços construídos na década de 70.

O mapa potenciométrico aqui apresentado é regional, mostrando a tendência geral de escoamento da água subterrânea. Não foi possível, nesta escala de trabalho, observar o comportamento anisotrópico e heterogêneo do aquífero fraturado. Como proposto por Custodio e Llamas (1996) (Figura 5.7, Capítulo 5), considera-se a existência de uma superfície potenciométrica virtual do Sistema Aquífero Cristalino. As linhas de fluxo mostram descarga da água subterrânea a partir dos altos topográficos locais em direção aos canais de drenagem e, considerando-se a bacia do rio Jundiáí como um todo, há um fluxo regional para oeste, rumo à Bacia Sedimentar do Paraná.

Assim, os interflúvios da bacia do rio Jundiáí parecem controlar, além do escoamento superficial, também o escoamento da água subterrânea. Estes altos estruturais compõem as zonas de recarga do Sistema Aquífero Cristalino. Como área de recarga, destaca-se a região da Serra do Japi, que, mais do que um simples alto topográfico, é onde se concentra a maior parte da vegetação da bacia. O papel de algumas estruturas geológicas regionais na configuração do mapa potenciométrico é bastante claro, uma vez que controlam o escoamento da rede de drenagem superficial e, conseqüentemente, as zonas de descarga. Têm destaque a zona de cisalhamento Jundiuvira e as falhas de Itu, do Piraí, do Cururu e de Cachoeira, além do lineamento NW-SE da Serra do Jardim.



LEGENDA

Cota do NE (m):			
	1200		767 poço c/ medida da cota do NE (m)
	1150		linhas de fluxo
	1100		sentido do fluxo regional
	1050		Bacia hidrográfica do rio Jundiá
	1000		Bacia Sedimentar do Paraná
	950		
	900		
	850		rede de drenagem
	800		
	750		
	700		
	650		
	600		
	550		



Figura 6.13: Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Cristalino na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes com base em dados de poços tubulares profundos construídos na década de 70 (superfície potenciométrica virtual, conforme preceitos de Custodio e Llamas (1996)).

### 6.3.1.2 Variação da produtividade com a profundidade no Sistema Aquífero Cristalino

Para testar a variação da produtividade dos poços com o aumento da profundidade no Sistema Aquífero Cristalino, apresenta-se os gráficos da Figura 6.14, que relacionam os valores de capacidade específica e profundidade dos poços. Como constatado por outros autores em outros países (Davis e Turk, 1964; Banks, 1992), há diminuição da produtividade dos poços com o aumento da profundidade em terrenos de rochas cristalinas. Porém, a correlação da capacidade específica com o nível dinâmico dos poços é melhor do que com a profundidade, como pode ser constatado pelo valor do  $R^2$  em ambos os casos. Isto pode ser consequência do fato de a profundidade dos poços nem sempre estar associada a uma melhor produtividade, uma vez que depende mais da escolha do perfurador, das questões contratuais e das possibilidades de o cliente aceitar uma obra mais dispendiosa. O nível dinâmico, no entanto, será tanto mais profundo quanto menor for a capacidade do aquífero fornecer água naquele ponto. Isto pode ser mais um bom argumento para o uso da capacidade específica como parâmetro avaliador da produtividade, uma vez que não há dados de transmissividade.

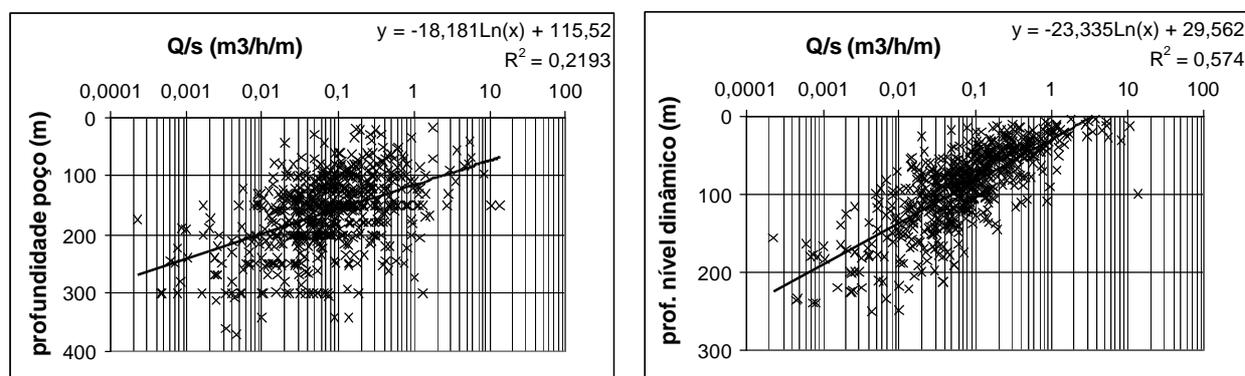


Figura 6.14: Gráficos de correlação da capacidade específica (Q/s) com a profundidade e com o nível dinâmico dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino na área de estudos.

### 6.3.1.3 Variação da produtividade com o litotipo no Sistema Aquífero Cristalino

Dos 899 poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino, 645 (quase 72%) trazem informações quanto ao litotipo explorado ou tal informação foi obtida a partir da localização dos poços no mapa geológico. Os poços foram separados em quatro grupos: os que exploram apenas gnaisses, apenas granitos, apenas xistos ou apenas metassedimentos. Os poços que exploram mais de um litotipo foram excluídos desta análise.

O gráfico da Figura 6.15 mostra que a distribuição dos valores de capacidade específica nos diferentes litotipos é ligeiramente distinta. A probabilidade de se obter poços com produtividade alta nos xistos é menor do que nos gnaisses e nos granitos. Nos metassedimentos, ao contrário, há maior probabilidade de se obter poços com produtividade elevada em comparação com todos os outros litotipos. Pertencentes ao Domínio São Roque, estes metassedimentos são comumente compostos por rochas carbonáticas e calciossilicáticas, nas quais processos de dissolução devem ser os fatores colaboradores para o aumento da produtividade dos poços.

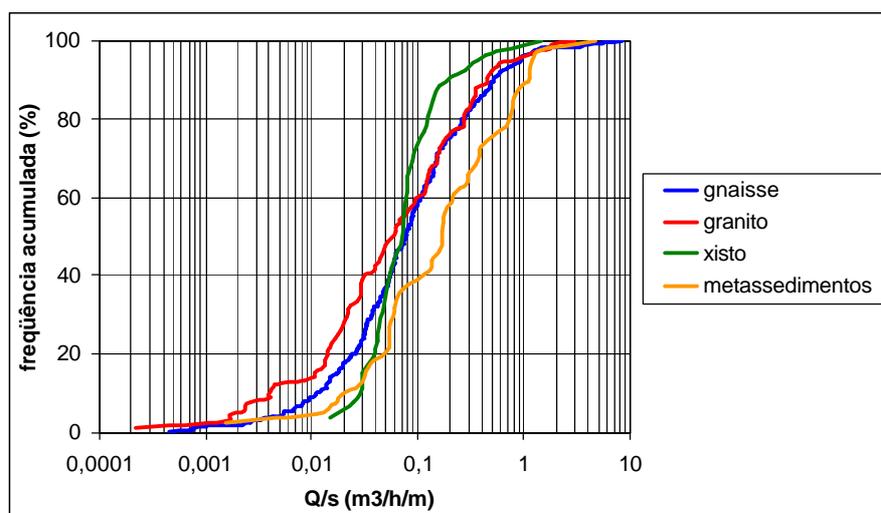


Figura 6.15: Gráfico de frequência acumulada da capacidade específica de poços que exploram os litotipos pertencentes ao Embasamento Pré-Cambriano.

#### 6.3.1.4 Variação da produtividade com a presença de coberturas sedimentares e do manto de alteração no Sistema Aquífero Cristalino

Embora grande parte da bacia do rio Jundiá esteja situada em terrenos cristalinos, a presença de coberturas sedimentares sobre estas rochas é bastante comum. Elas não são muito espessas, mas recobrem grandes áreas e a possibilidade de atuarem como zona de recarga sugere que, nos locais onde estão presentes, possivelmente os poços seriam mais produtivos. Para testar esta hipótese, foram selecionados os poços que exploram apenas a rocha fraturada e que possuem, na seção geológica, algum tipo de cobertura sedimentar. O gráfico de frequência acumulada (Figura 6.16) mostra que a distribuição da produtividade dos poços situados em locais com cobertura coluvial e com rochas sedimentares do Grupo Itararé é muito parecida com a dos poços sem indicação de cobertura sedimentar. Já os poços com cobertura aluvial mostram distribuição de valores consideravelmente mais elevados. Destaca-se que estes poços são revestidos até o topo da rocha sã e, portanto, está sendo testada a influência da cobertura na recarga e na produtividade do aquífero da rocha fraturada e não a produtividade do aquífero poroso constituído pela cobertura sedimentar.

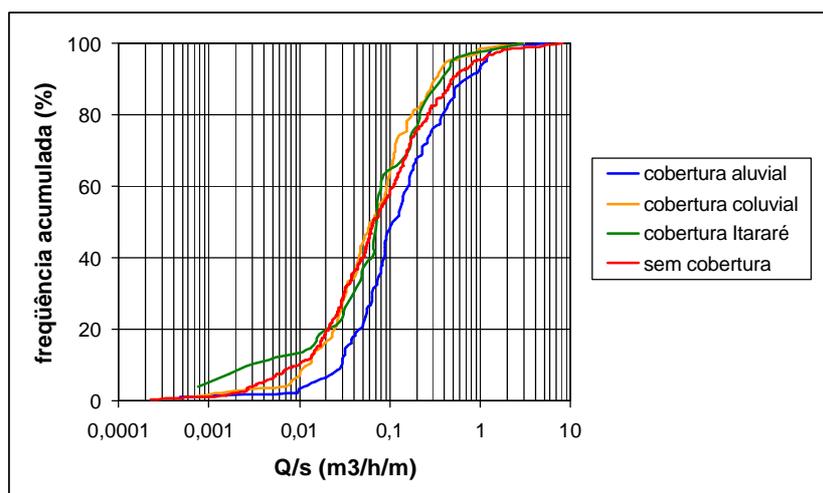


Figura 6.16: Diagrama de frequência acumulada da capacidade específica dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino com diferentes tipos de cobertura e sem cobertura sedimentar.

Outro dado interessante neste tipo de análise e que corrobora com o resultado apresentado acima, é a relação entre produtividade e profundidade do topo da rocha alterada. Em alguns poços, embora não esteja discriminado na seção geológica qual o tipo de cobertura sedimentar, há informação quanto à profundidade do topo da rocha alterada, que, no caso, não coincide com a superfície do terreno. O gráfico da Figura 6.17 mostra a variação da capacidade específica com a profundidade do topo da rocha alterada. Nota-se uma baixa correlação entre as variáveis, mostrando não haver influência da espessura de cobertura sedimentar diretamente na produtividade dos poços.

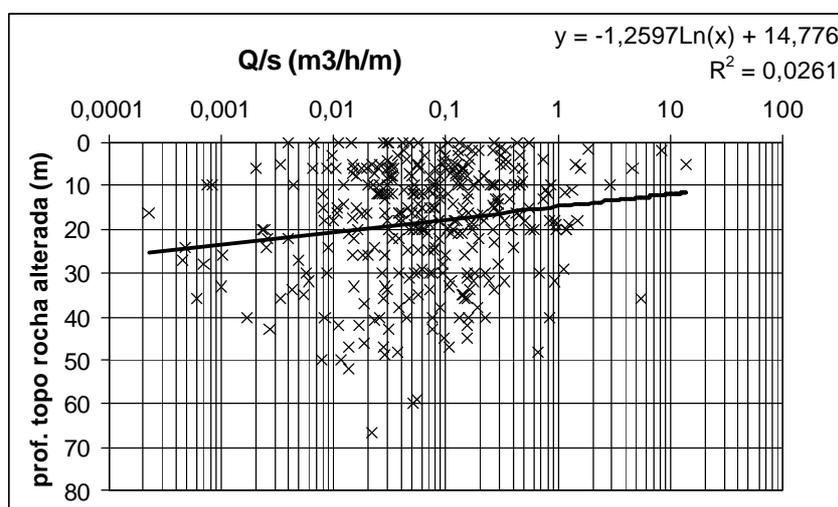


Figura 6.17: Gráfico de correlação entre a produtividade dos poços e a profundidade do topo da rocha alterada dos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

O manto de intemperismo formado a partir da alteração das rochas cristalinas, também tem sido apontado como importante fonte de recarga do Sistema Aquífero Cristalino. Para testar a influência deste fator, foram selecionados os poços com dados relativos à profundidade do topo da rocha sã e do revestimento (Figura 6.18). Normalmente, o revestimento é utilizado na seção do poço onde a rocha é alterada para evitar desmoronamento das paredes ou uma possível

contaminação pelas águas do freático. Assim, considera-se que a variável profundidade do revestimento reflita a profundidade do topo da rocha sã e, conseqüentemente, onde esta variável é maior, maior é a espessura do manto de intemperismo. Embora as variáveis topo da rocha sã e profundidade do revestimento tenham o mesmo significado, elas são apresentadas em gráficos distintos, pois nem todo poço que traz uma informação traz a outra, isto é, as amostras são diferentes. Porém, a correlação é baixa em ambos os casos.

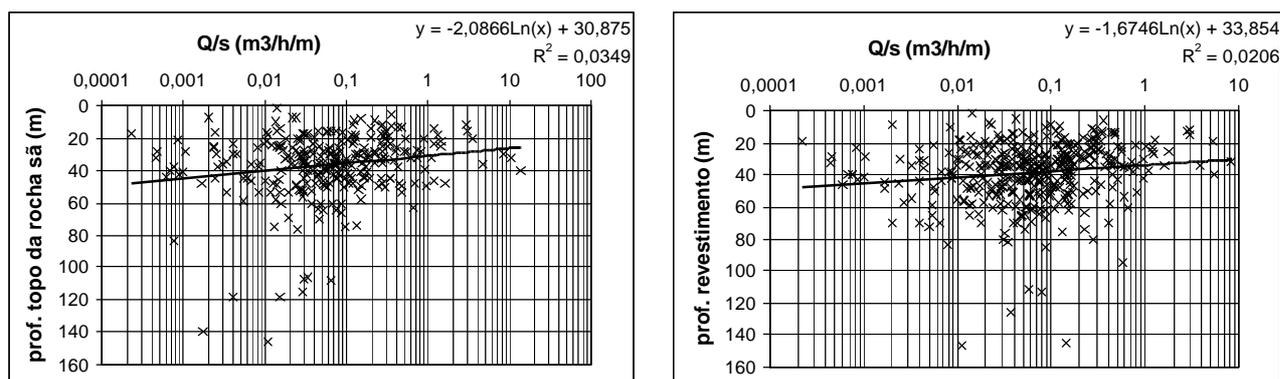


Figura 6.18: Gráficos de correlação da capacidade específica ( $Q/s$ ) com a profundidade do topo da rocha sã e do revestimento nos poços que exploram o Sistema Aquífero Cristalino.

Embora a espessura de cobertura sedimentar ou de manto de alteração não exerça influência direta na produtividade dos poços, isto não significa que estas camadas não contenham água em quantidades interessantes para a exploração. O manto de intemperismo tem sido indicado como uma zona potencialmente produtora de água e, de fato, apresenta tendências de produtividades melhores do que a encontrada na rocha fraturada. O gráfico da Figura 6.19 mostra que a distribuição da produtividade nos poços que exploram apenas a rocha fraturada ou tanto a rocha fraturada quanto o manto de alteração tende a ser menor do que a produtividade dos poços que exploram apenas o manto intemperizado.

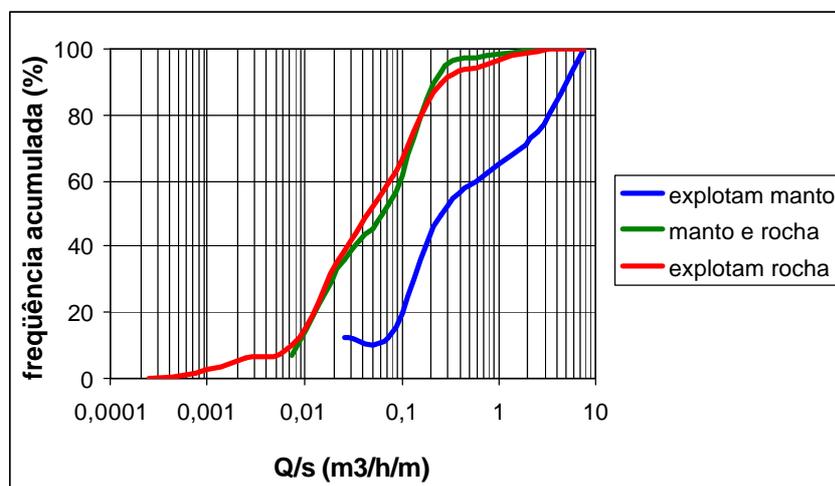


Figura 6.19: Diagrama de frequência acumulada da capacidade específica dos poços que exploram apenas o manto de intemperismo, o manto e a rocha sã e apenas a rocha sã no Sistema Aquífero Cristalino.

### 6.3.2 Sistema Aquífero Tubarão

Apenas uma pequena porção da área de estudos engloba o Sistema Aquífero Tubarão, onde estão cadastrados 67 poços tubulares profundos (apêndices B e C). Dentre estes, 36 (54%) trazem informações quanto ao perfil geológico; a maior parte não atinge o topo do Embasamento Pré-Cambriano, mas 17 deles chegam até o topo da rocha cristalina a profundidades que variam de 52 a 180 metros. Alguns perfis típicos destes poços são ilustrados na Figura 6.20.

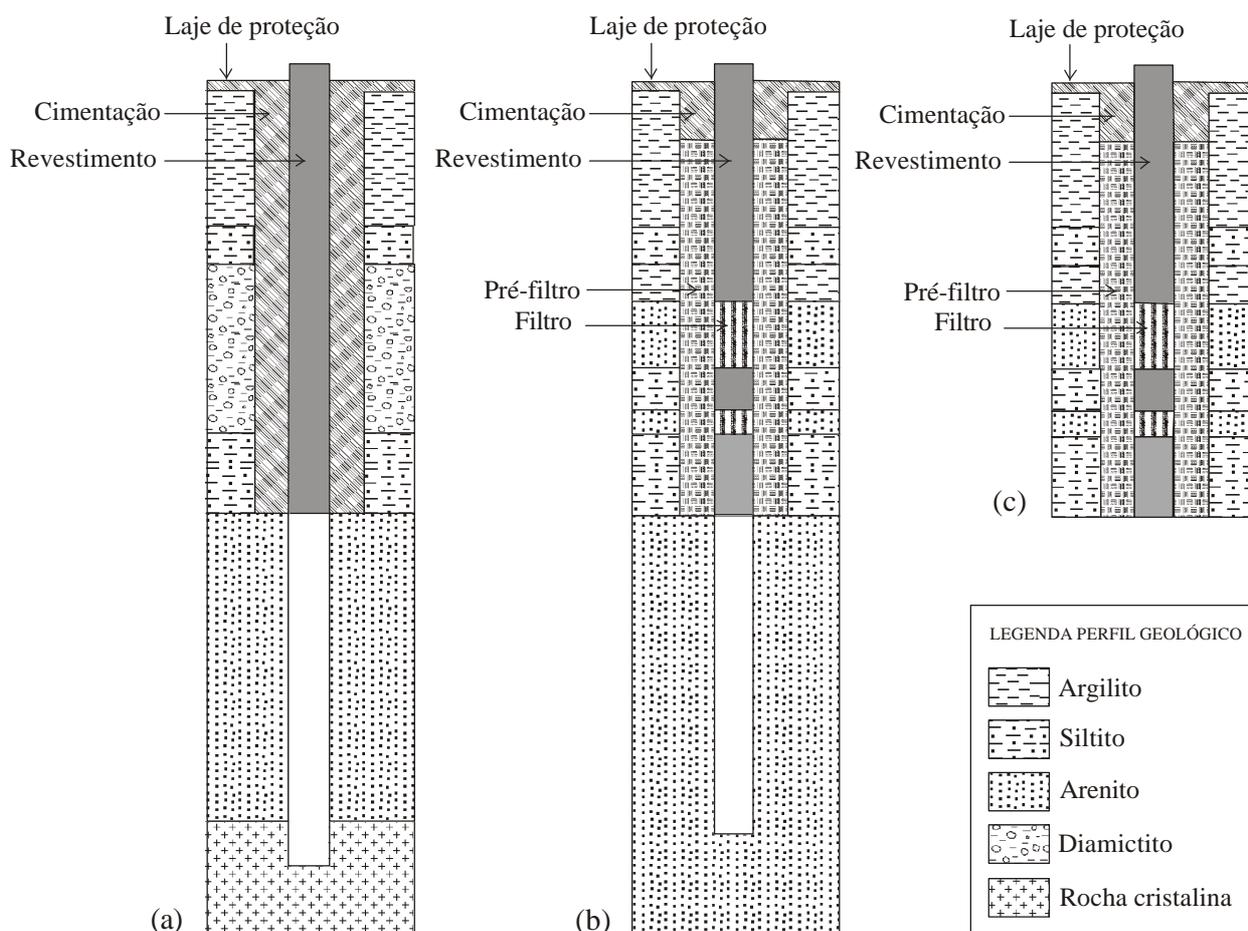


Figura 6.20: Perfis geológico-constructivos típicos dos poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Tubarão na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes (sem escalas).

A profundidade dos poços apresenta uma distribuição que tende a ser log-normal (Figura 6.21). A profundidade média é de aproximadamente 137 e a mediana 125 metros, o valor mínimo é 6 metros e o máximo 331 metros. O desvio padrão é de 76 metros e o coeficiente de variação, 55,5%.

A distribuição dos valores de vazão não mostra um padrão muito bem definido, mas pode-se dizer que tende a ser exponencial (Figura 6.22). O valor médio é de aproximadamente 8 m<sup>3</sup>/h e a mediana 5,5 m<sup>3</sup>/h, o valor mínimo registrado é de 0,6 m<sup>3</sup>/h e o máximo 33 m<sup>3</sup>/h. O desvio padrão fica em torno dos 8 m<sup>3</sup>/h e o coeficiente de variação é de 98%.

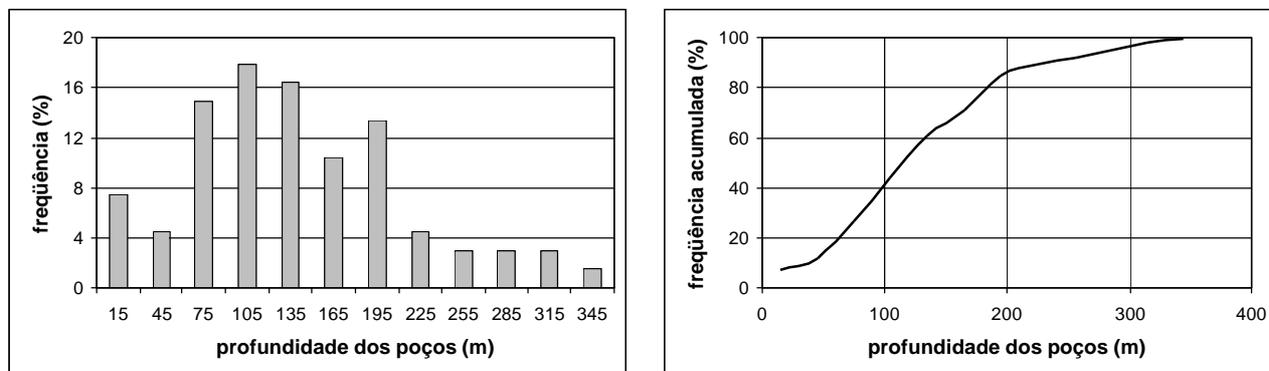


Figura 6.21: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

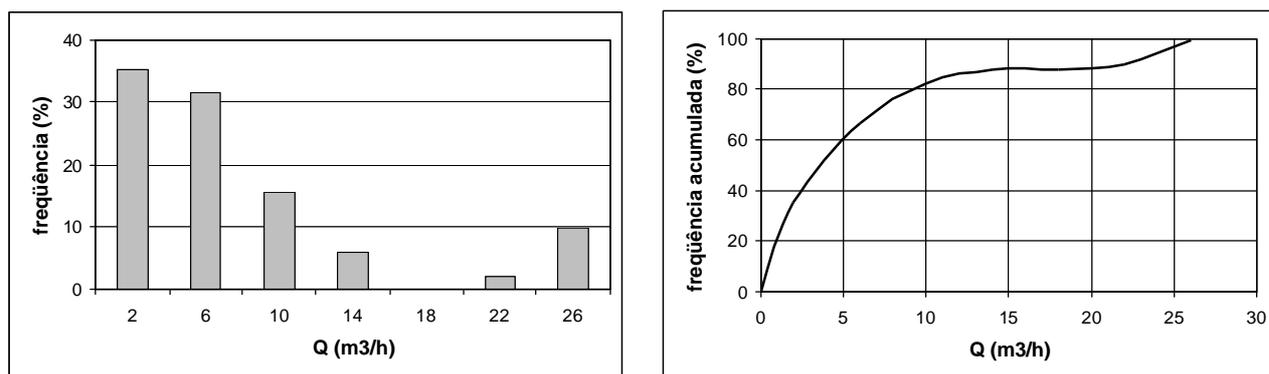


Figura 6.22: Diagramas de frequência e frequência acumulada da vazão dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão.

A capacidade específica apresenta distribuição que tende a ser do tipo normal (Figura 6.23). O valor médio é de 0,32 m<sup>3</sup>/h/m e a mediana é de 0,09 m<sup>3</sup>/h/m, com mínimo de 0,007 e máximo de 4,8 m<sup>3</sup>/h/m. O desvio padrão é de 0,77 m<sup>3</sup>/h/m, com coeficiente de variação de aproximadamente 237%.

Da mesma forma que no Sistema Aquífero Cristalino, a distribuição dos valores do nível estático e do nível dinâmico no Sistema Aquífero Tubarão tendem a ser do tipo exponencial e log-normal, respectivamente (figuras 6.24 e 6.25). Porém, como no Tubarão o tamanho da amostra é menor, há algumas anomalias, mas que não chegam a mascarar totalmente a tendência da distribuição.

O nível estático médio é de aproximadamente 23 metros de profundidade e o mediano é de 18 metros; o valor mínimo está próximo a zero e o máximo é de 84,7 metros, com desvio padrão de 19 metros e coeficiente de variação de 85%. O nível dinâmico tem valor médio em torno dos 82 metros e mediano em 72 metros; o valor mínimo é de aproximadamente 6 metros e o máximo de 184 metros, com desvio padrão de 48 metros e coeficiente de variação de 59 %.

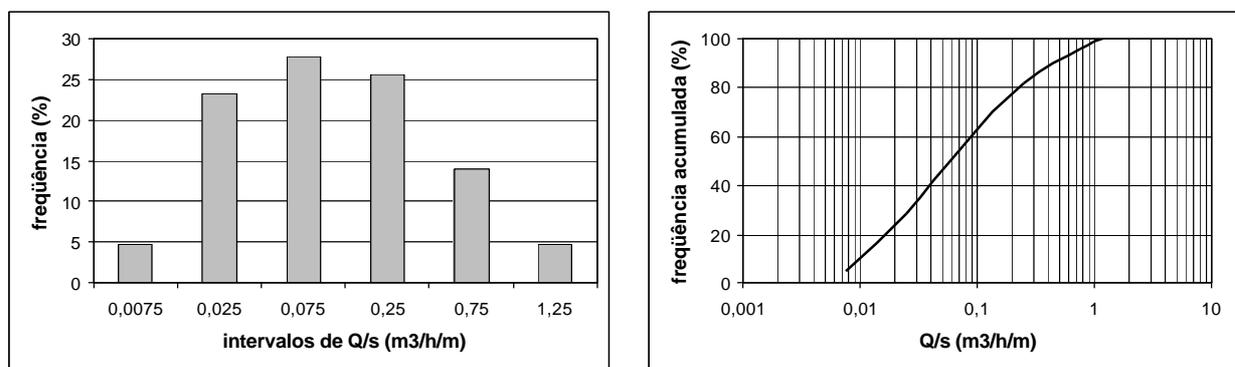


Figura 6.23: Diagramas de frequência e frequência acumulada da capacidade específica dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão.

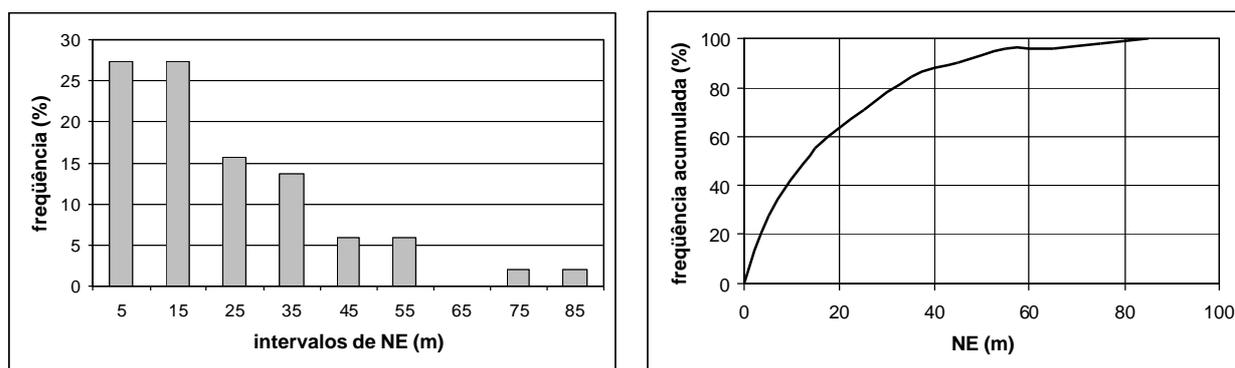


Figura 6.24: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade do nível estático (NE) dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão.

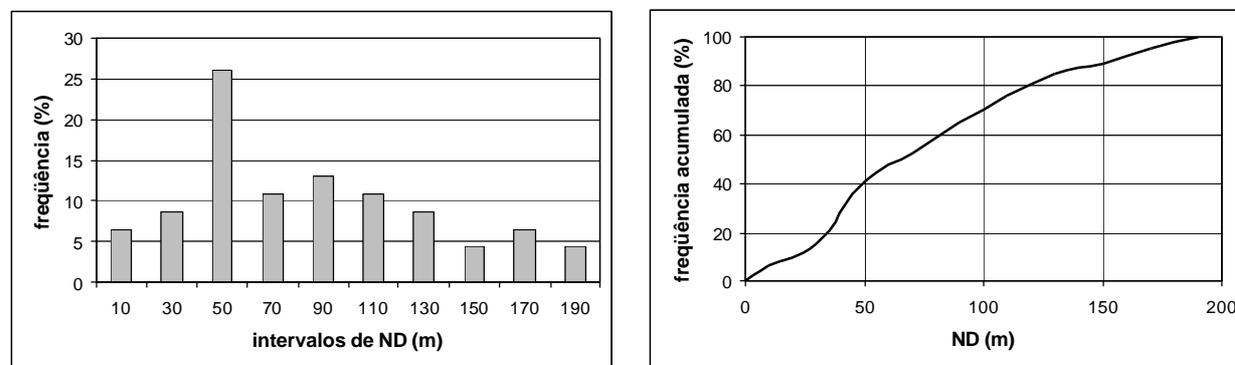


Figura 6.25: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade do nível dinâmico (ND) dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão.

### 6.3.2.1 Potenciometria do Sistema Aquífero Tubarão

Para a construção do mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Tubarão (Figura 6.26) que ocorre no lado oeste da área de estudos foram consideradas as cotas do NE dos poços com filtro nas camadas do Grupo Itararé. Os poços mistos, que explotam ambos os Sistemas Aquíferos, não foram considerados.

Na porção superior do mapa, há um divisor que direciona o fluxo para o rio Capivari e, no restante da área, o fluxo se dá em direção aos rios Jundiá e Tietê. De forma similar ao Sistema Aquífero Cristalino, o fluxo regional da água subterrânea se direciona para noroeste.

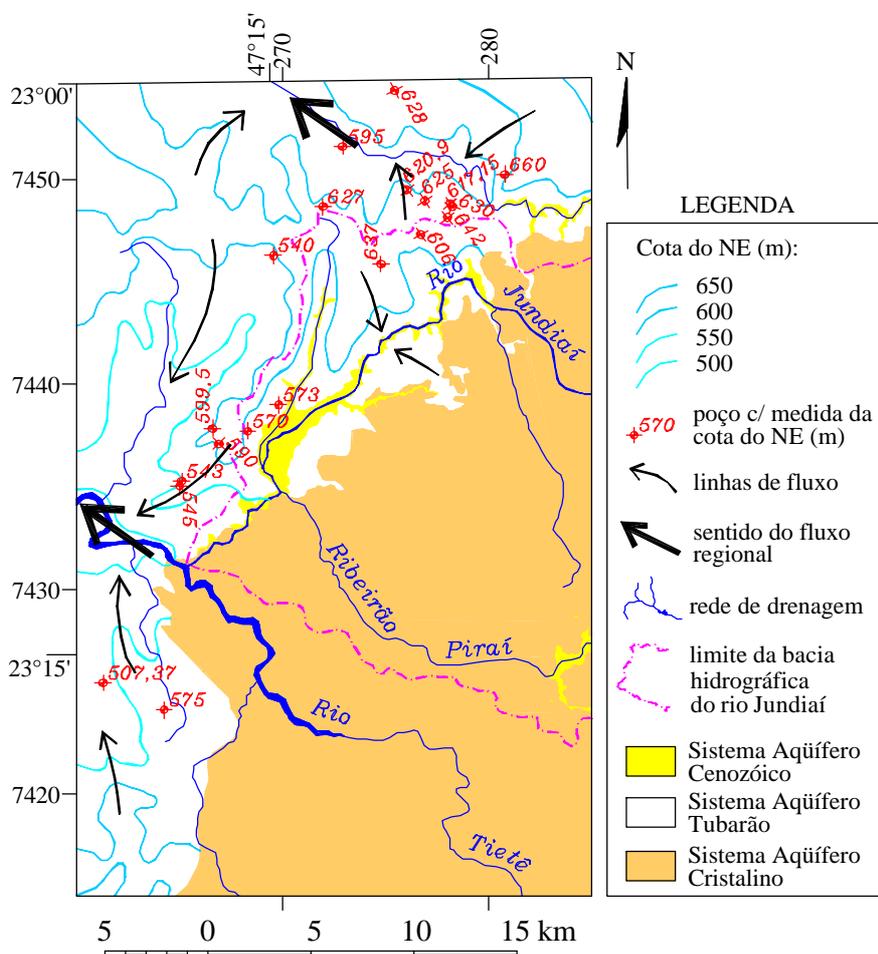


Figura 6.26: Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Tubarão na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

### 6.3.2.2 Geometria do Sistema Aquífero Tubarão

Com base no perfil geológico dos poços que atravessam o Grupo Itararé e chegam ao topo do Embasamento Cristalino, foi possível montar o mapa do topo do Embasamento e o mapa de isoespessura do Sistema Aquífero Tubarão (Figura 6.27). Na interpolação dos dados foi utilizado o método da Mínima Curvatura.

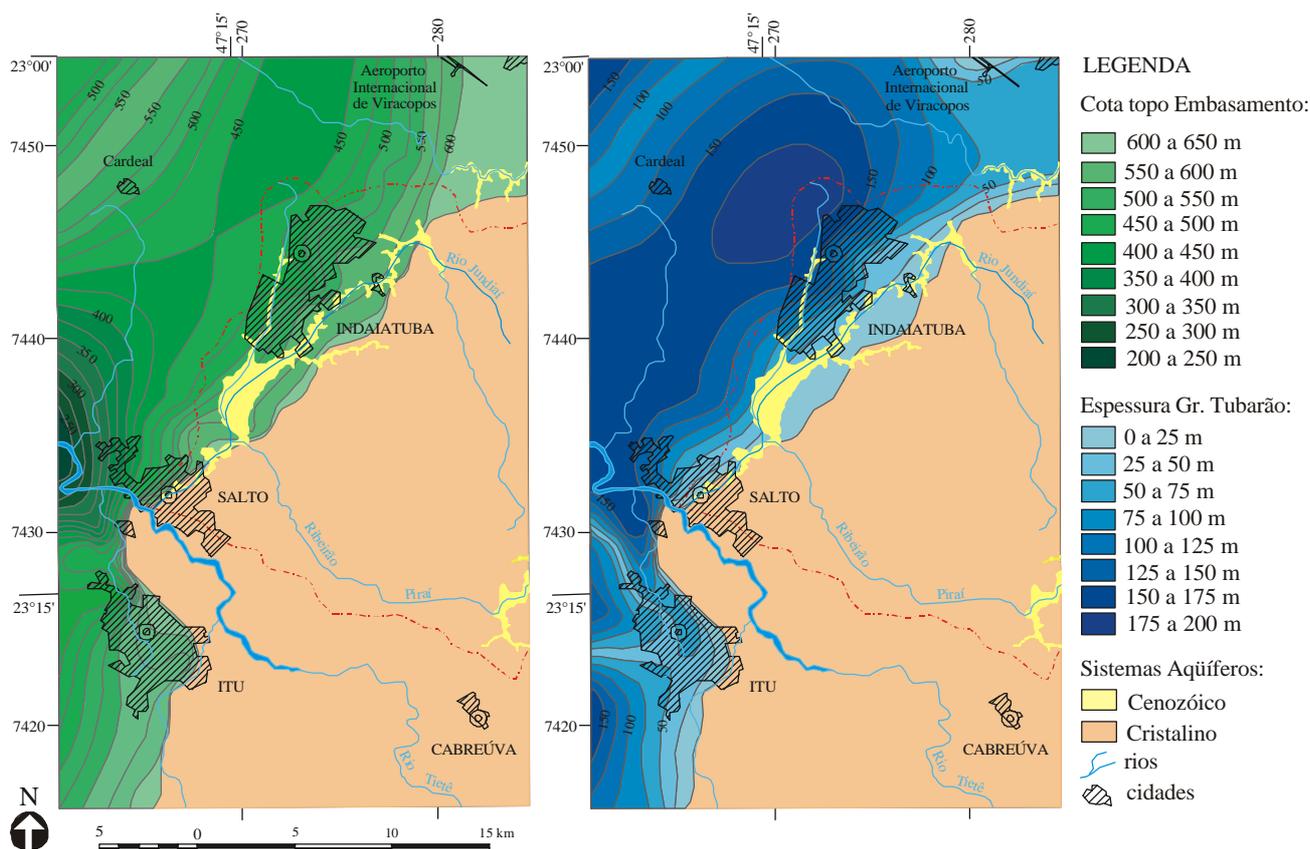


Figura 6.27: Geometria do Sistema Aquífero Tubarão na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes: (a) cota do topo do Embasamento Cristalino e (b) isoespessura do Grupo Tubarão.

A distribuição espacial dos poços é bastante irregular, já que as perfurações normalmente se concentram nos centros urbanos. A existência de áreas sem informação de subsuperfície dificulta a interpolação dos dados. Assim, a interpretação destes mapas deve ser feita de forma relativa, ou seja, os números apresentados nas escalas de cores (à direita, na Figura 6.27) representam uma tendência de valores. Entretanto, é possível perceber uma depressão no substrato, alongada na direção NNE-SSW e paralela aos limites entre a Bacia do Paraná e o Embasamento Cristalino. A espessura do Grupo Itararé diminui em direção ao Embasamento, ao longo de uma superfície com mergulho de aproximadamente 2° para NW, na região de Indaiatuba, e para W nas proximidades de Ituí. Em uma faixa que passa pelo lado oeste de Indaiatuba e vai até o rio Tietê, ocorrem as maiores espessuras do Sistema Aquífero Tubarão.

### 6.3.2.3 Variação da produtividade com a profundidade no Sistema Aquífero Tubarão

Os poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão mostram diminuição da produtividade com o aumento da profundidade. Mas, assim como no Sistema Aquífero Cristalino, a correlação entre a produtividade e o nível dinâmico dos poços é maior do que entre a produtividade e a profundidade dos mesmos (Figura 6.28).

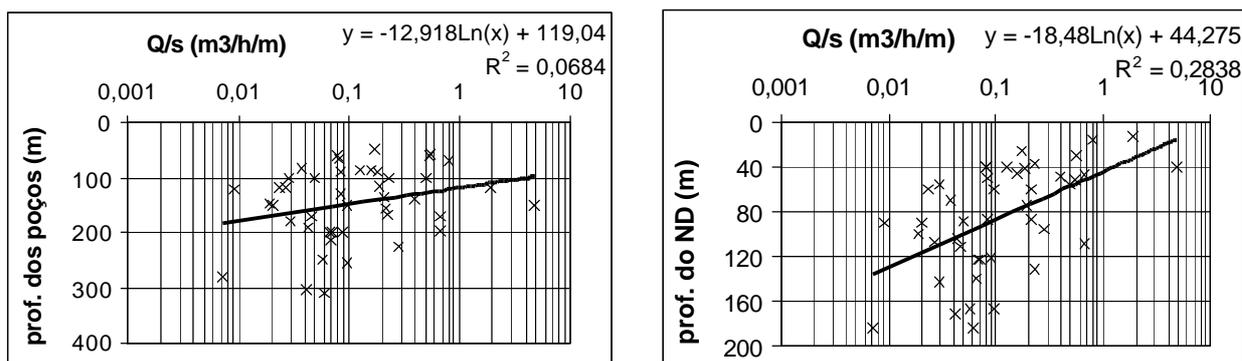


Figura 6.28: Gráficos de correlação da capacidade específica (Q/s) com a profundidade e com o nível dinâmico dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão na área de estudos.

### 6.3.2.4 Variação da produtividade com o litotipo no Sistema Aquífero Tubarão

Os gráficos da Figura 6.29 mostram a correlação entre a produtividade dos poços e a porcentagem dos diferentes litotipos presentes na seção geológica dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão. A correlação positiva é alta para as porcentagens de arenito, mostrando forte controle litológico na produtividade dos poços.

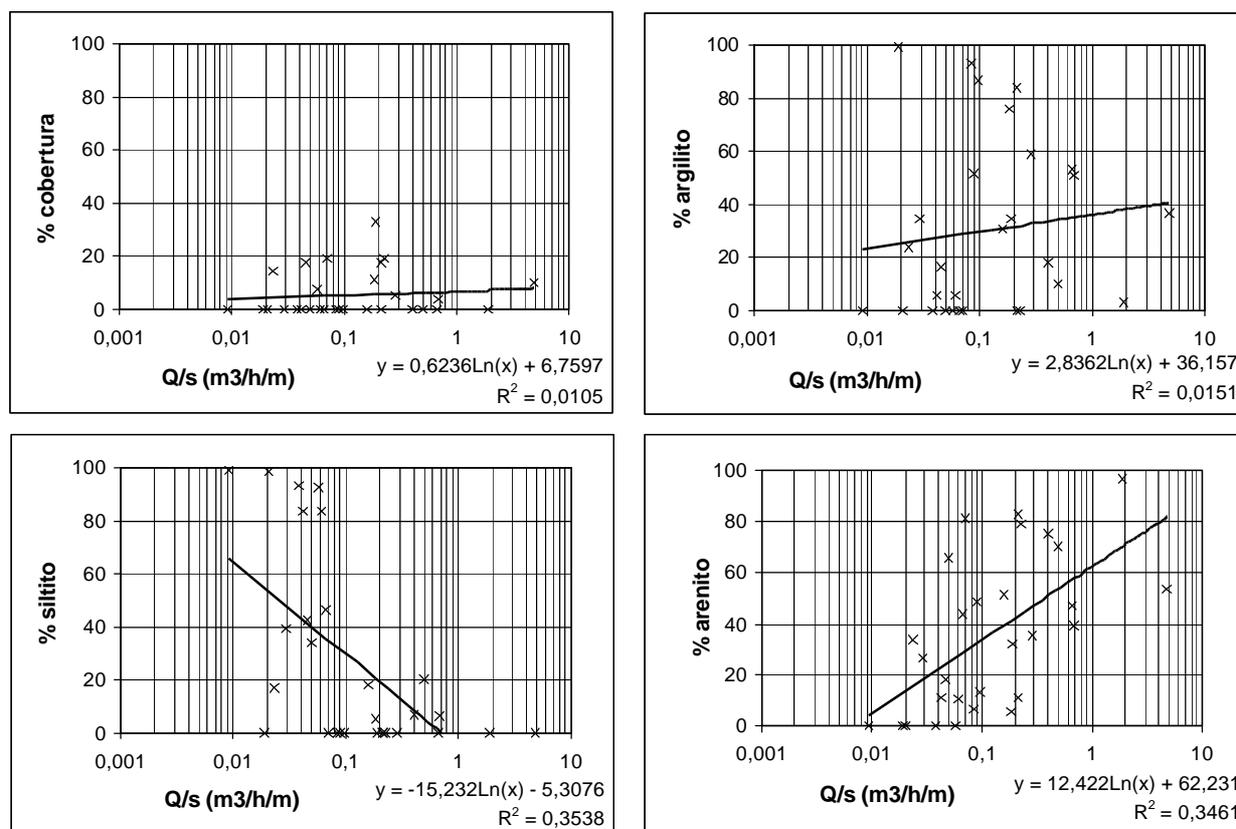


Figura 6.29: Gráfico de correlação entre a capacidade específica e a porcentagem de cobertura, argilito, siltito e arenito na seção geológica dos poços que exploram o Sistema Aquífero Tubarão na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

Além do controle litológico, há também indícios de controle estrutural na percolação da água subterrânea do Sistema Aquífero Tubarão. Próximo ao Aeroporto Internacional de Viracopos, em um corte da rodovia Santos Dumont (SP-79) (Foto 6.1), foram encontradas nascentes em juntas no arenito do Grupo Itararé. De fato, nesta área, situada nos limites da Bacia do Paraná, o papel das juntas e falhas adquire grande importância no arcabouço litológico. Abaixo do pacote de arenito ocorrem diamictitos com matriz argilosa (encobertos por vegetação, na foto) e, no contato entre ambos, também se formam nascentes, mostrando desta vez o controle do contraste litológico na percolação da água.



Fotos 6.1: Afloramento na Rodovia Santos Dumont, próximo ao Aeroporto Internacional de Viracopos. Existem (a) nascentes nas juntas de uma camada de arenito do Grupo Itararé e (b) nascentes no contato entre a camada de arenito e diamictito com matriz argilosa (encobertas pela vegetação).

### 6.3.3 Poços Mistos

A separação dos poços considerados mistos, ou seja, dos poços que exploram tanto o Sistema Aquífero Cristalino quanto o Sistema Aquífero Tubarão, é dificultada por não constar as profundidades de entrada d'água nos bancos de dados consultados. Contudo, ainda foi possível identificar 40 poços mistos (apêndices B e C), seja por informação presente nos bancos de dados, seja pela análise dos perfis geológico-construtivos. Estes poços possuem uma ou mais

seções com filtro no Grupo Itararé e também grande parte da seção penetrando no Embasamento Cristalino. A Figura 6.30 mostra dois perfis típicos dos poços mistos.

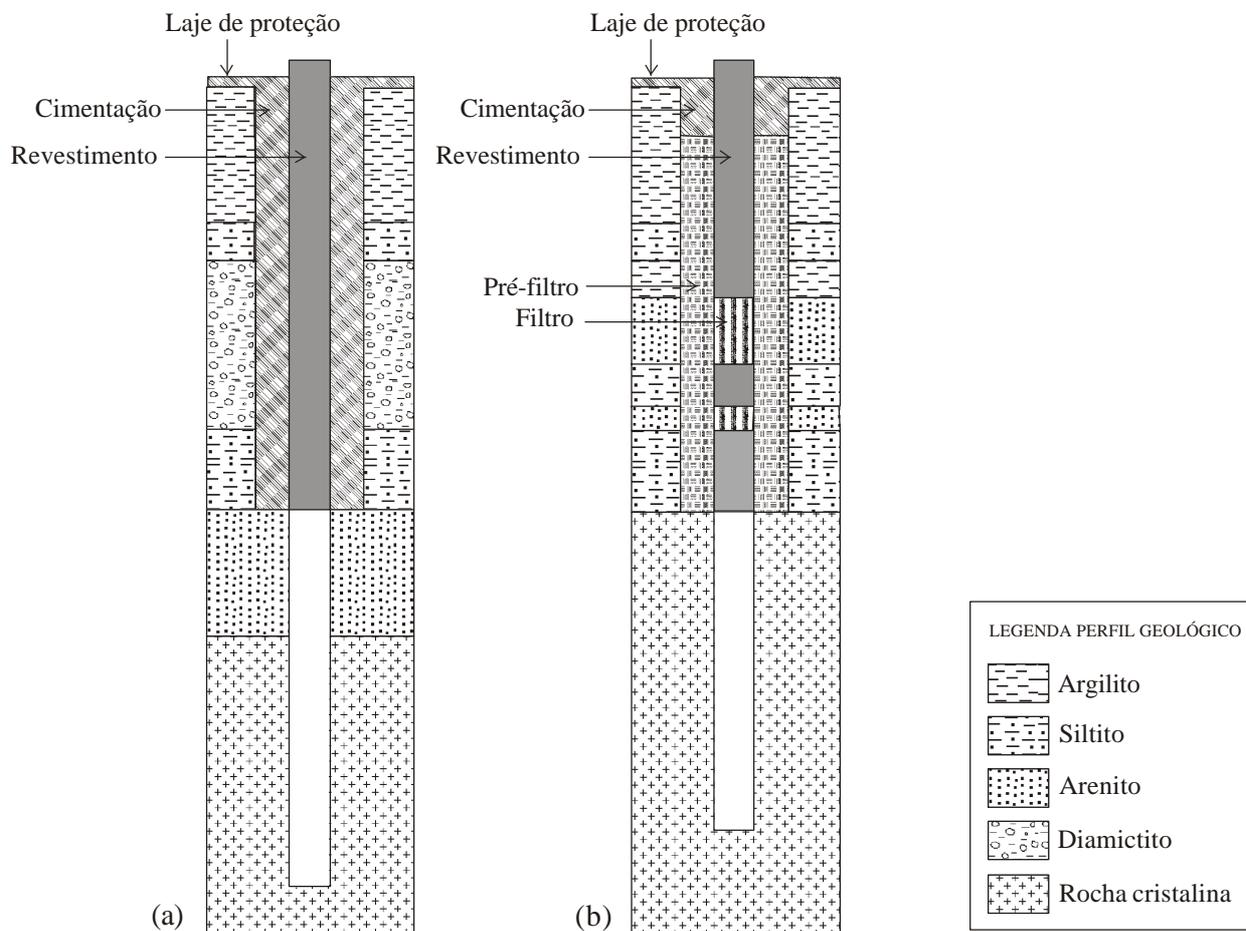


Figura 6.30: Perfis geológico-construtivos típicos dos poços tubulares profundos que exploram os Sistemas Aquíferos Tubarão e Cristalino (poços mistos) na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

Os dados de profundidade dos poços não apresentam um tipo de distribuição definido (Figura 6.31), talvez pelo pequeno tamanho da amostra. A profundidade média é de 172 metros e a mediana é de 170 metros. O valor mínimo encontrado é 43 metros e o máximo 267 metros. O desvio padrão é 59,5 metros, com coeficiente de variação de 34,5%.

A vazão, assim como nos casos anteriores, apresenta distribuição exponencial (Figura 6.32). O valor médio é de aproximadamente  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  e a mediana é de  $3,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ; o desvio padrão é de  $7,6 \text{ m}^3/\text{h}$  e o coeficiente de variação é de aproximadamente 120%. Os valores mínimo e máximo são, respectivamente,  $0,5$  e  $42 \text{ m}^3/\text{h}$ .

A distribuição dos valores de capacidade específica também não está muito bem definida, podendo ser normal ou log-normal (Figura 6.33). Mas, com base nos casos apresentados anteriormente, é possível que a distribuição do Q/s nos poços mistos também seja do tipo log-

normal. O valor médio é  $0,11 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e a mediana fica em torno dos  $0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , o valor mínimo é de aproximadamente  $0,009 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e o máximo,  $0,68 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . O desvio padrão é  $0,16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e o coeficiente de variação é 146%.

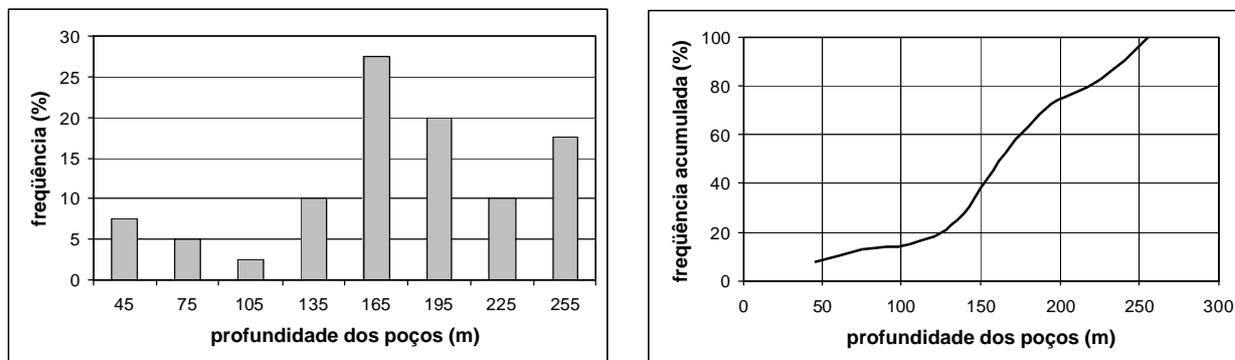


Figura 6.31: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade dos poços mistos na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

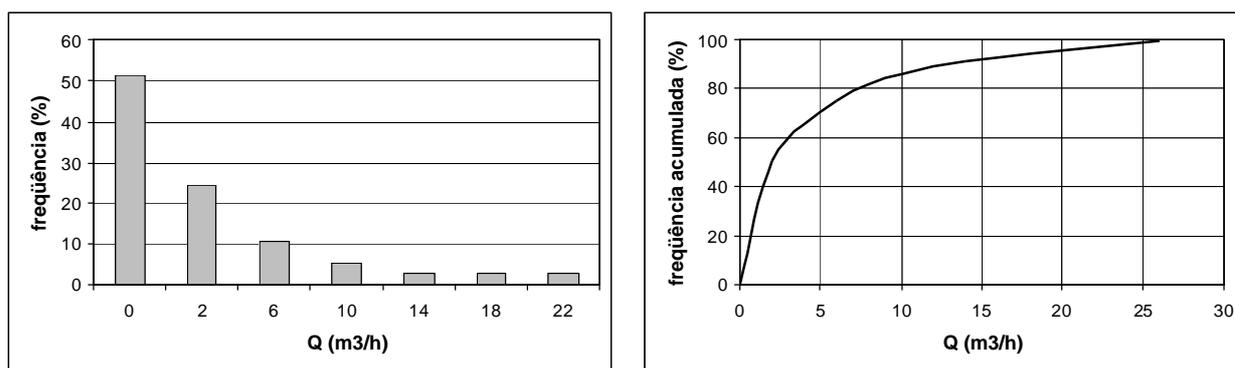


Figura 6.32: Diagramas de frequência e frequência acumulada da vazão dos poços mistos na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

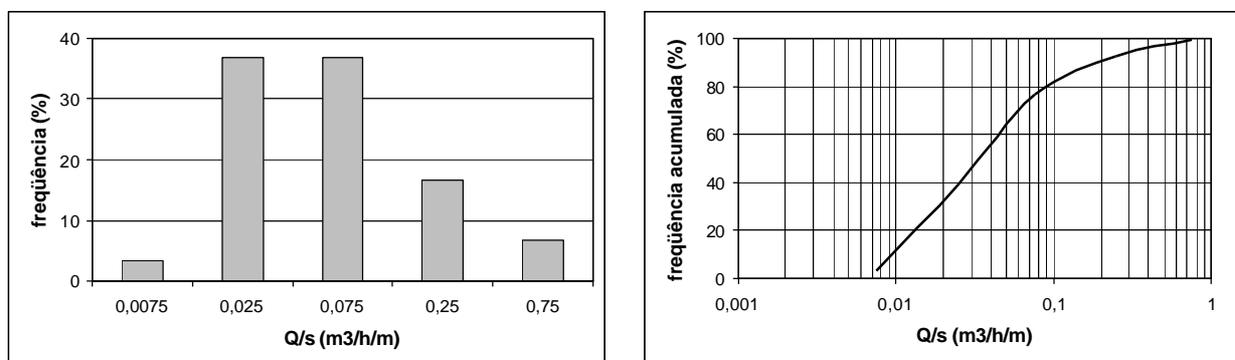


Figura 6.33: Diagramas de frequência e frequência acumulada da capacidade específica dos poços mistos.

Nos poços mistos, o nível estático apresenta distribuição log-normal (Figura 6.34) e o nível dinâmico não apresenta distribuição bem definida (Figura 6.35). O nível estático médio é de 21,6 metros e o mediano é de 19,5 metros (valor mínimo de 2,6 e máximo de 50 metros) com desvio padrão de 12,3 metros e coeficiente de variação de 57%. Já o nível dinâmico médio é de 103 metros e o mediano 98,5 metros (valores mínimo e máximo de 36 e 202 metros, respectivamente); desvio padrão de 43,13 metros e coeficiente de variação de 42%.

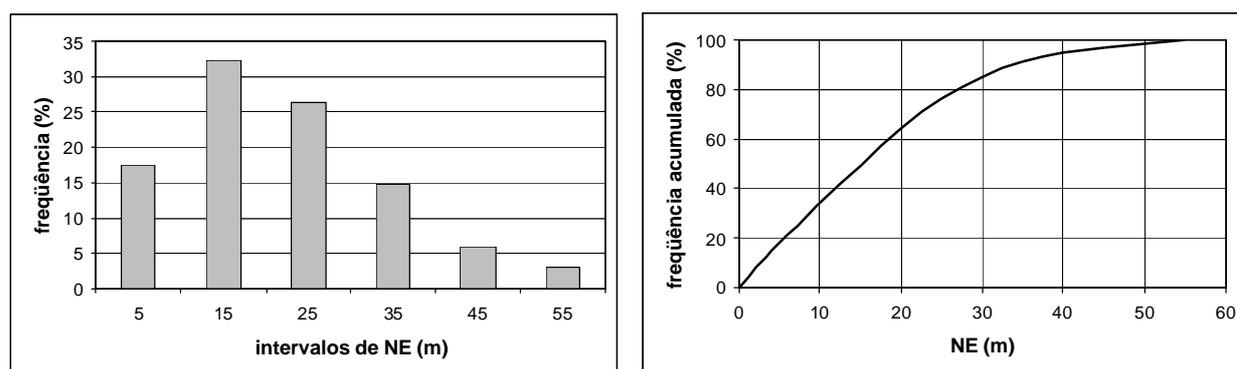


Figura 6.34: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade do nível estático (NE) dos poços mistos.

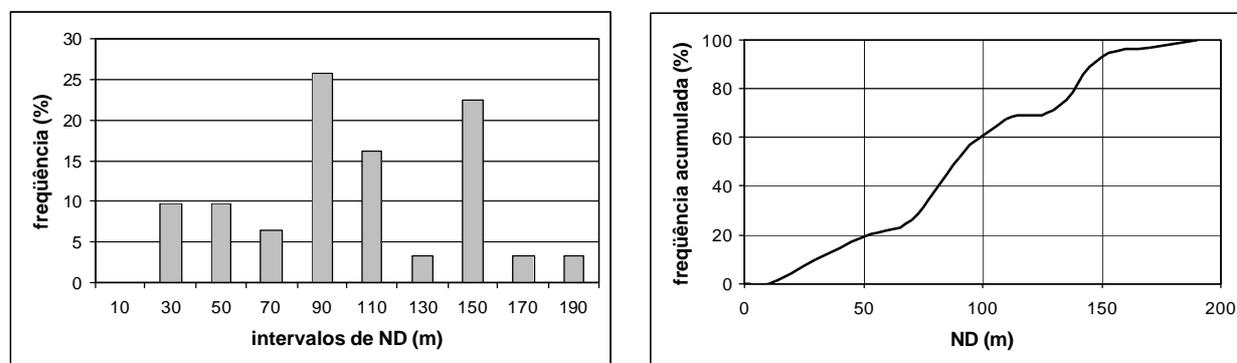


Figura 6.35: Diagramas de frequência e frequência acumulada da profundidade do nível dinâmico (ND) dos poços mistos.

### 6.3.3.1 Variação da produtividade com a profundidade nos poços mistos

Nos poços mistos também há diminuição da produtividade com o aumento da profundidade dos poços (Figura 6.36). Porém, neste caso, a correlação é um pouco maior entre a produtividade e a profundidade dos poços do que entre a produtividade e o nível dinâmico.

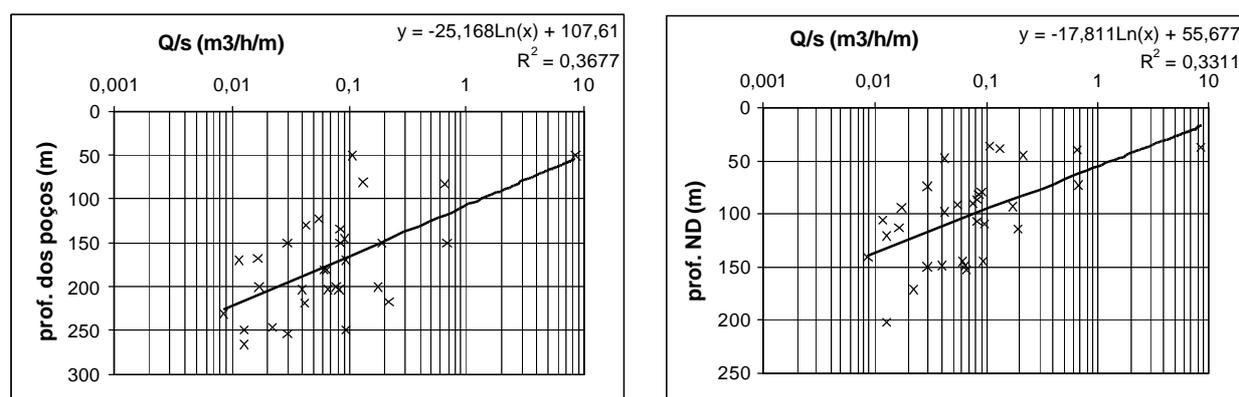


Figura 6.36: Gráficos de correlação da capacidade específica (Q/s) com a profundidade e com o nível dinâmico dos poços mistos situados na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

### 6.3.3.2 Variação da produtividade com o litotipo nos poços mistos

Da mesma forma que no Sistema Aquífero Tubarão, foi feita uma estimativa da porcentagem de cobertura, argilito, siltito, arenito e, neste caso, também de rochas cristalinas nas seções geológicas dos poços mistos para averiguar se há relação entre a produtividade dos poços e a predominância de algum litotipo no perfil geológico (Figura 6.37).

Os resultados são distintos entre ambos os casos. No caso dos poços mistos, o aumento na porcentagem de arenito não implica em aumento da produtividade dos poços, tampouco o aumento da porcentagem de rocha cristalina no perfil. No entanto, há aumento da produtividade concomitantemente ao aumento da proporção de siltito no perfil geológico.

### 6.3.4 Sistema Aquífero Cenozóico

No banco de dados compilado constam apenas cinco poços que exploram o Sistema Aquífero Cenozóico (apêndices B e C). Os dados construtivos destes poços e o perfil geológico não são fornecidos pelos bancos de dados consultados; apenas sabe-se que extraem água dos depósitos aluviais, possivelmente de camadas de areia e/ou cascalho. O tamanho da amostra não permite estudar o tipo de distribuição e, portanto, são apresentados apenas alguns parâmetros estatísticos básicos (Quadro 6.1).

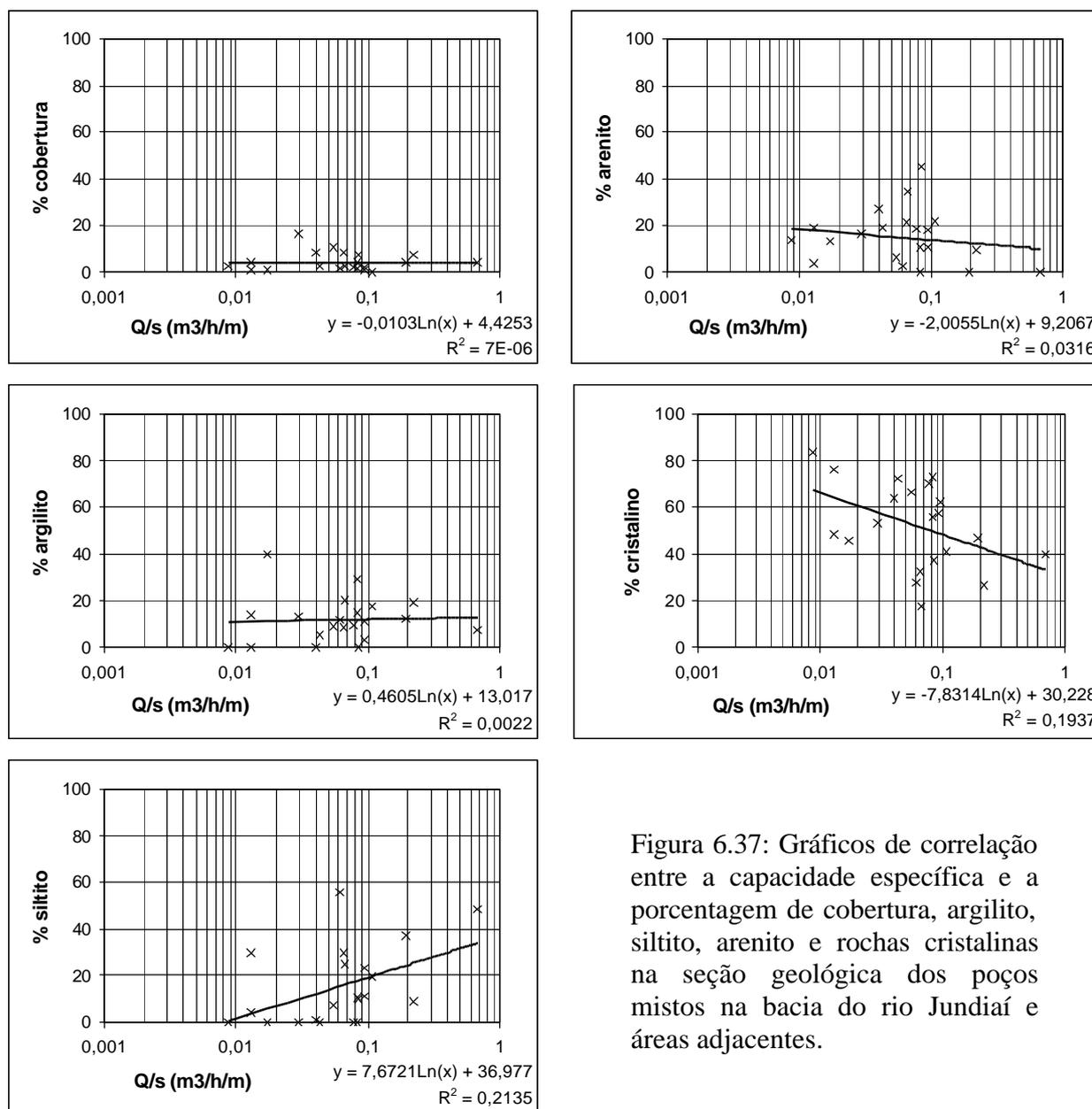


Figura 6.37: Gráficos de correlação entre a capacidade específica e a porcentagem de cobertura, argilito, siltito, arenito e rochas cristalinas na seção geológica dos poços mistos na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes.

	PROF. (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m <sup>3</sup> /h/m)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)
média =	25,90	5,92	16,18	9,50	2,06
mediana =	29,50	4,83	17,10	9,55	0,44
moda =	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
desv. pad. =	11,98	3,50	2,60	4,66	2,89
coef. var. =	46,26	59,05	16,10	49,08	140,57

Quadro 6.1: Parâmetros estatísticos dos poços que explotam o Sistema Aquífero Cenozóico na bacia do rio Jundiá.

## 6.4 VARIAÇÃO DO NÍVEL ESTÁTICO, NÍVEL DINÂMICO E DA PRODUTIVIDADE DOS AQÜÍFEROS AO LONGO DO TEMPO

A existência de dados de poços tubulares profundos que datam de 1948 até 2002 permite avaliar a variação temporal de alguns parâmetros hidrogeológicos ao longo do século XX. São considerados três intervalos de tempo, definidos a partir da distribuição das datas de construção dos poços apresentada na Figura 6.2. São eles: antes de 1970, de 1970 a 1989 e de 1990 a 2002.

As medidas de nível estático, nível dinâmico e vazão correspondem aos dados do teste de bombeamento executado logo após a construção do poço. Do total de poços cadastrados, 695 (66,5%) apresentam tais parâmetros e, destes, 539 (51,6%) trazem a data de construção. Parte dos resultados descritos a seguir é também apresentada por Neves et al. (2004).

### 6.4.1 Variação do Nível Estático

O gráfico da Figura 6.38a mostra a variação da mediana da profundidade do NE nos intervalos de tempo. Há uma diferença significativa entre os valores anteriores a 1970 e os valores dos dois períodos seguintes. A mediana da profundidade do NE no período “antes de 1970” é de 5,0 metros, no período “1970-1989” é de 11,5 metros e no período “1990-2002” é de 14,0 metros. Isto é corroborado pelos diagramas de freqüência acumulada (Figura 6.38b), onde se observa uma tendência de aumento da profundidade mediana do NE, bastante acentuada entre o primeiro período e os dois posteriores.

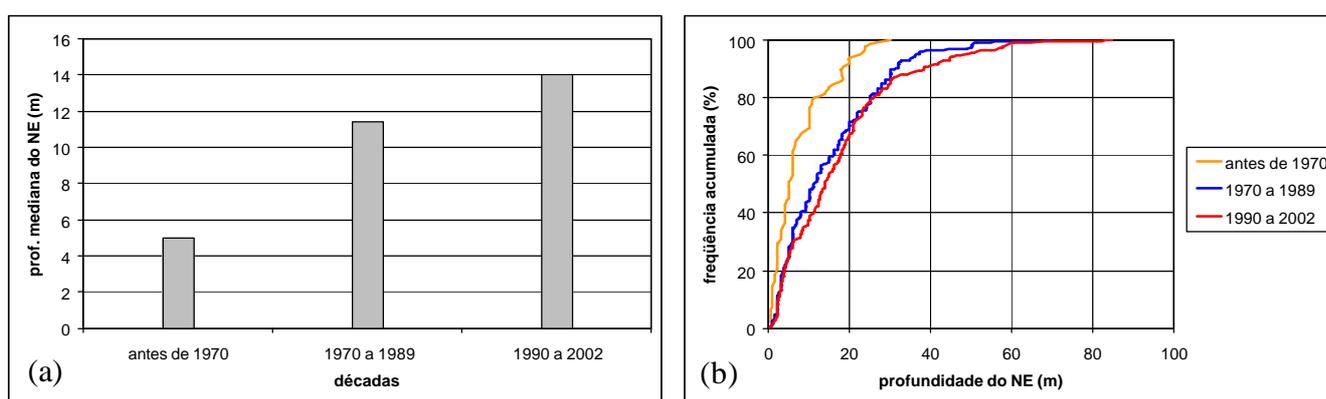


Figura 6.38: (a) Variação da profundidade mediana do NE ao longo dos intervalos de tempo e (b) diagramas de freqüência acumulada.

A distribuição irregular de poços dificulta o uso de modelos geoestatísticos mais refinados para analisar a variação espacial dos parâmetros estudados. Mas é possível a

comparação entre superfícies de tendência (Landim, 1998) para verificar as diferenças entre as tendências de distribuição dos dados ao longo do tempo. A Figura 6.39 mostra as superfícies de tendência de grau 1 do NE para cada período.

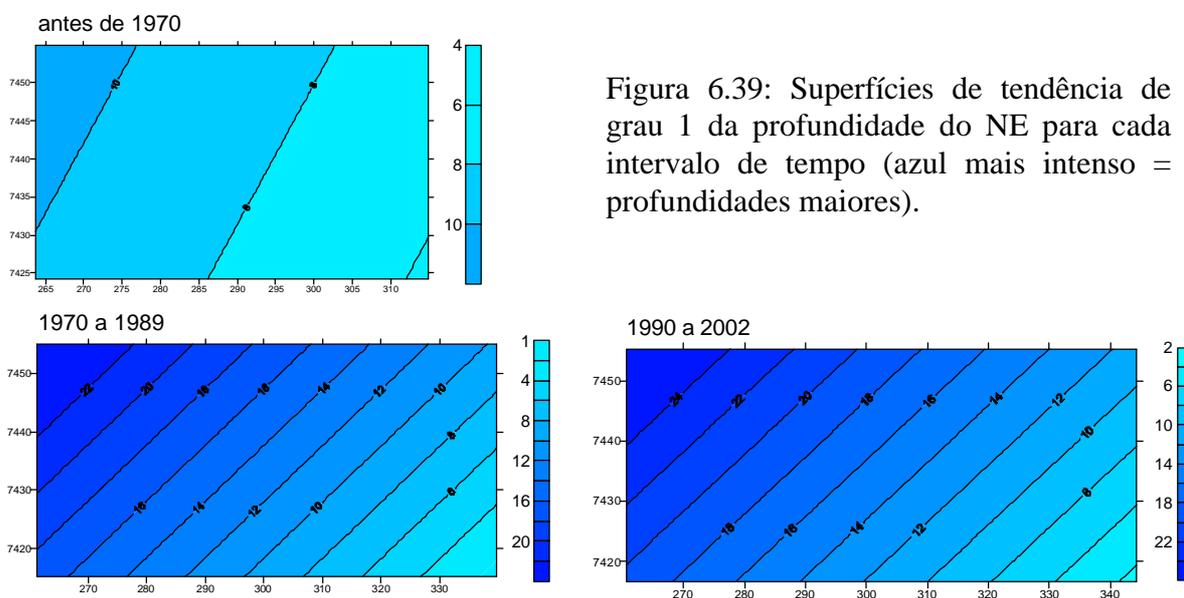


Figura 6.39: Superfícies de tendência de grau 1 da profundidade do NE para cada intervalo de tempo (azul mais intenso = profundidades maiores).

A superfície de tendência do período “antes de 1970” mostra um mergulho suave e variação de apenas 4 a 10 metros de profundidade. No intervalo “1970-1989”, o mergulho da superfície aumenta consideravelmente para NW e a profundidade chega a pouco mais de 22 metros. Esta tendência se acentua no período “1990-2002”, quando a profundidade máxima é maior que 24 metros.

#### 6.4.2 Variação do Nível Dinâmico

Os gráficos da profundidade mediana do ND ao longo do período estudado (Figura 6.40) mostram variações bastante acentuadas. A mediana da profundidade varia de 53,5 metros no período “antes de 1970”, para 79,0 metros no período “1970-1989” e chega a 127,3 metros em “1990-2002”.

As superfícies de tendência de grau 1 do ND são apresentadas na Figura 6.41. Corroborando os resultados anteriores, observa-se uma queda acentuada nos níveis dinâmicos de um período a outro. Porém, o aumento da profundidade do ND é de uma ordem de grandeza muito maior do que o do NE. A superfície de tendência de grau 1 para o período “antes de 1970” varia de 32 a 62 metros; no período de “1970-1989” varia de 71 a 86 metros e no período “1990-2002” aumenta drasticamente para 116 a 132 metros de profundidade.

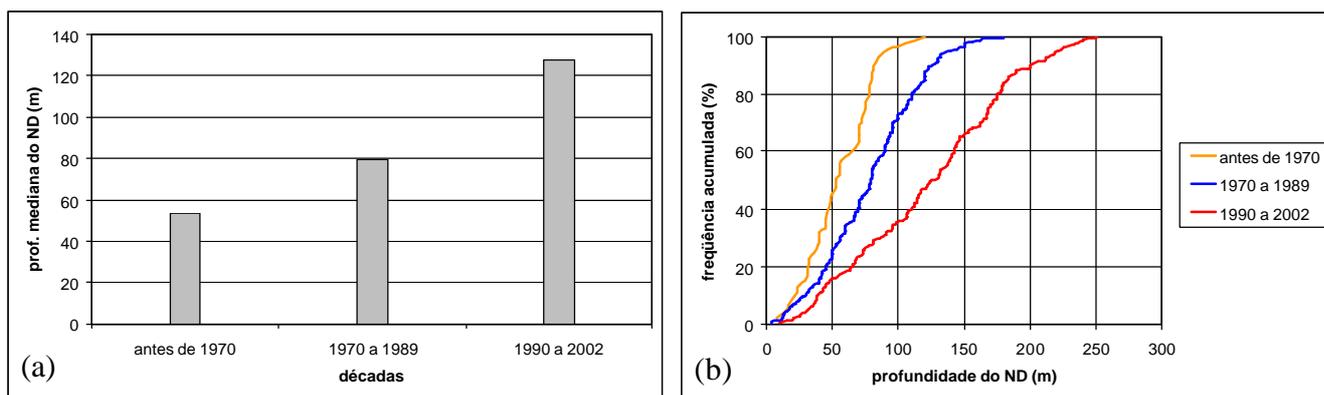


Figura 6.40: (a) Variação da profundidade mediana do ND e (b) diagramas de frequência acumulada.

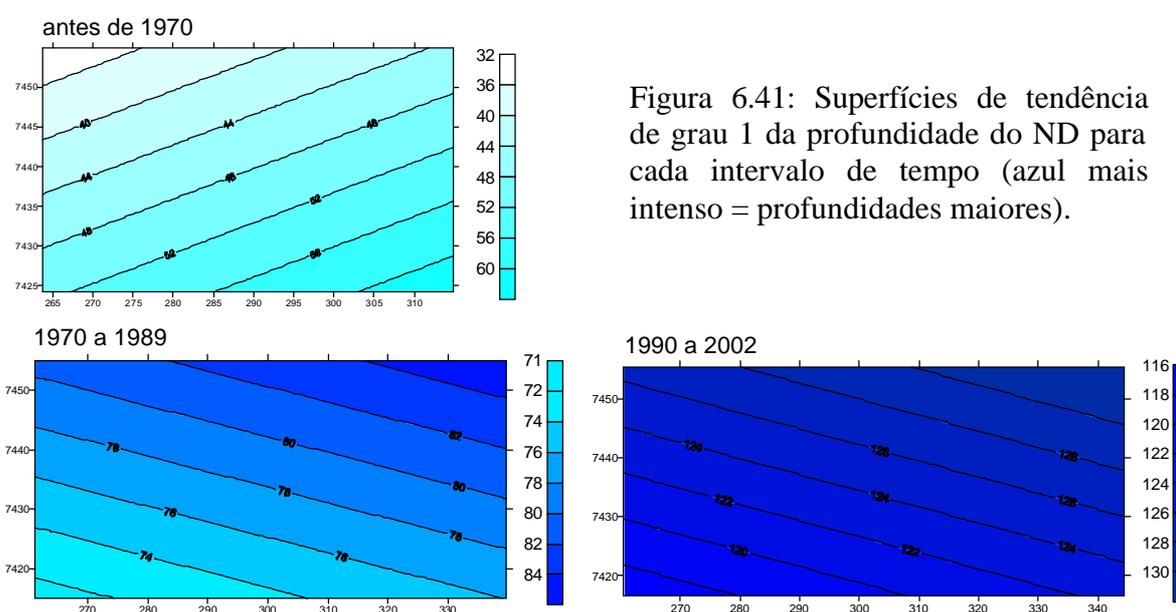


Figura 6.41: Superfícies de tendência de grau 1 da profundidade do ND para cada intervalo de tempo (azul mais intenso = profundidades maiores).

### 6.4.3 Variação da Vazão

Estão disponíveis 620 medidas da vazão executada nos testes de bombeamento com anotação da data de construção do poço. Os gráficos da Figura 6.42 mostram que a vazão permanece praticamente constante. Levando-se em consideração o tipo de distribuição de dados, a pequena queda observada no gráfico da Figura 6.42a não tem significado estatístico. Isto implica que as vazões utilizadas nos testes de bombeamento são da mesma ordem de grandeza ao longo de todo o período estudado. Considera-se desnecessária a aplicação das superfícies de tendência neste caso, já que as diferenças observadas nos gráficos acima são insignificantes do ponto de vista estatístico.

Apesar de estar ligada ao potencial do aquífero, a vazão é uma variável muito influenciada pelas necessidades do usuário, pois a demanda é que dimensiona a bomba utilizada.

Muitas vezes, existe um bom potencial de produtividade do aquífero e uma bomba pouco potente, sendo que o inverso também ocorre. Por este motivo, é recomendável utilizar o conceito de capacidade específica para avaliar as variações na produtividade.

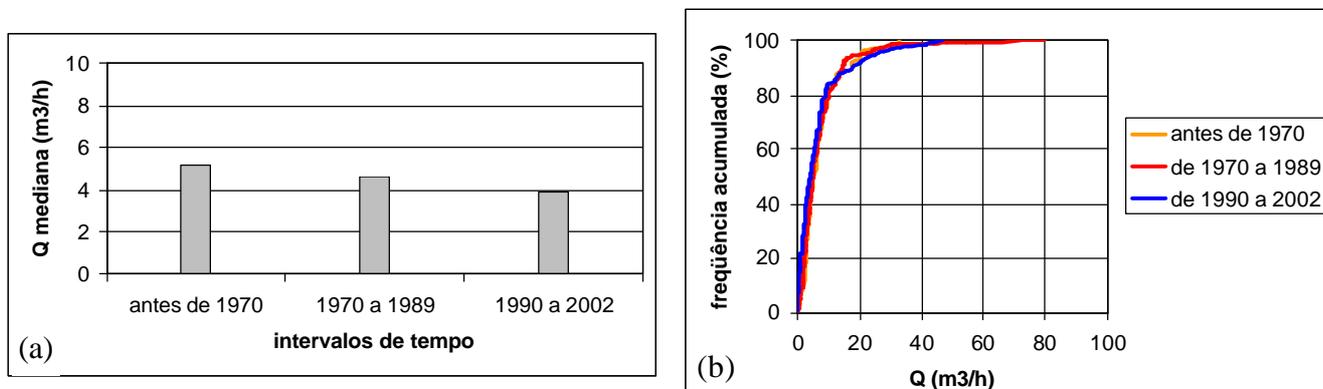


Figura 6.42: (a) Variação das vazões medianas utilizadas nos testes de bombeamento ao longo dos intervalos de tempo e (b) diagramas de frequência acumulada.

#### 6.4.4 Variação da Capacidade Específica

Os gráficos de variação da  $Q/s$  ao longo do tempo (Figura 6.43) mostram queda acentuada na produtividade mediana dos poços entre os períodos estudados. A capacidade específica mediana obtida no período “antes de 1970” é de  $0,11 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , no período “1970-1989” cai para  $0,08 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e no intervalo “1990-2002” chega a  $0,04 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Isto já era de se esperar, uma vez que a capacidade específica é calculada a partir da relação entre a vazão extraída do poço e o rebaixamento provocado. Uma vez que ocorre um pequeno aumento da profundidade mediana do NE e um aumento acentuado na profundidade mediana do ND ao longo de cada período, obviamente a capacidade específica mediana também sofrerá uma queda. Destaca-se que a vazão, como mostrado no item anterior, se mantém praticamente constante.

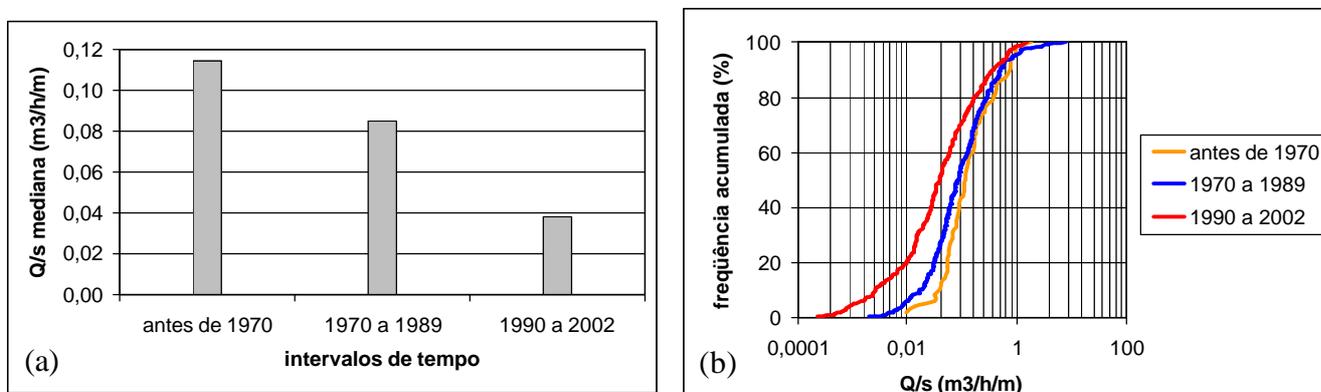


Figura 6.43: (a) Variação da capacidade específica mediana nos três períodos estudados e (b) diagramas de frequência acumulada para os mesmos períodos.