

MAPA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Gerônimo Rocha¹, Amélia J. Fernandes², Malva A. Mancuso³, José E. Campos¹, Armando T. Takahashi⁴, Geraldo H. Oda², Mônica M. Perrotta⁴, Elizete D. Salvador⁴, José Luiz Albuquerque F^{2,3}, Antonio Gimenez F^{2,3}, Sérgio G. de Azevedo³, Marcelo Denser³, Lauro G. Pizzatto⁴, Nivaldo Paulon³

RESUMO

O Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, elaborado em conjunto pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), Instituto Geológico (IG-SMASP), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), e Serviço Geológico do Brasil (CPRM), é aqui apresentado. O trabalho teve por objetivo realizar o zoneamento dos aquíferos sedimentares em termos de vazões exploráveis, e dos aquíferos fraturados em termos de vazões prováveis. Os métodos utilizados variaram em função dos dados disponíveis e do tipo de aquífero. Dentre os aquíferos sedimentares, aqueles que permitem extrações maiores, em ordem decrescente, são Guarani, Taubaté e Bauru; os que apresentam menores potenciais são São Paulo, Tubarão e Litorâneo. Dos aquíferos fraturados, os de maior potencial são o Serra Geral e o pré-Cambriano Cárstico. O Aquífero Pré-Cambriano não cárstico, composto de rochas metamórficas e graníticas, foi subdividido em 3 classes de potencialidade distinta, cujos limites correspondem em parte aos dos terrenos pré-cambrianos e em parte a estruturas tectônicas rúpteis regionais.

PALAVRAS-CHAVE: mapa hidrogeológico, Estado de São Paulo, potencialidade

ABSTRACT

The Groundwater Map of São Paulo State, elaborated jointly by the Department for Water and Electric Energy of the State of São Paulo (DAEE), Geological Institute (IG-SMASP), Institute of Technological Research of the State of São Paulo (IPT), Brazil Geological Survey (CPRM), is here presented. This work aimed at indicating areas of different groundwater potentiality, in terms of exploitable discharges, for each aquifer of the State. In the case of the fractured aquifers, probable discharges are indicated. Among the sedimentary aquifers, the ones that permit larger abstractions are Guarani, Taubaté, and Bauru; the ones with the least potential are São Paulo, Tubarão and Litorâneo. Regarding the fractured aquifers, the largest potentials are represented by Serra Geral and the Carstic Precambrian. The noncarstic Precambrian Aquifer, which consists of varied metamorphic and igneous rocks, was divided into three classes of different potential, whose boundaries approximately correspond either to the ones of the Precambrian terrains or to regional brittle tectonic structures.

KEYWORDS: Hydrogeologic Map; São Paulo State; potentiality

¹Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE, ²Instituto Geológico - IG-SMASP, ³Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, ⁴Serviço Geológico do Brasil-CPRM

1 - INTRODUÇÃO

O Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (SÃO PAULO 2005) é uma síntese de informações hidrogeológicas, em sistema de informações georreferenciadas, com a finalidade de oferecer um panorama da localização, distribuição e potencialidades dos aquíferos no território. O mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, incluindo o levantamento e classificação das fontes potenciais de contaminação no Estado, já foi tema abordado anteriormente (HIRATA et al. 1997).

A escala adotada é a de 1:1.000.000, o que propicia uma visualização geral do potencial de águas subterrâneas no Estado e comparação entre seus distintos aquíferos. Portanto, o Mapa serve como uma referência inicial para a realização de trabalhos de maior detalhe, sendo uma das bases técnicas para o planejamento e gestão das bacias hidrográficas.

A confecção do Mapa segue a Legenda Internacional para Mapas Hidrogeológicos, da UNESCO (1970) e de STRUCKMEIER & MARGAT (1995), com simplificações e adaptações adequadas à escala adotada, sendo constituído por quatro bases temáticas, a saber:

- a) Base Plani-altimétrica. Compreende relevo, hidrografia, cidades e rodovias. O relevo é representado pelo modelo digital de elevação (MDE), produzido na Missão Topográfica por Radar Interferométrico (Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM; US Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, SD); os demais elementos foram extraídos da base digital ao milionésimo do IBGE.
- b) Base Aquíferos. Corresponde aos aquíferos, cujos limites foram extraídos das unidades geológicas maiores do Mapa Geológico do Estado em 1: 750.000 da CPRM (PERROTTA *et al.* 2005).
- c) Base Poços. É constituída de poços selecionados e poços representativos, pertencentes ao cadastro do DAEE e, subordinadamente, ao do IG. Os selecionados (3.539 poços) apresentam pelo menos algumas das seguintes características: informações completas e confiáveis, máxima penetração no aquífero, existência de ensaio de bombeamento com duração igual ou superior a 20 horas, e distribuição geográfica o mais homogênea possível. A base dos representativos (plotados no Mapa) compreende 195 poços.
- d) Base Potenciométrica. Abrange as equipotenciais da água subterrânea e direções de fluxo, na porção aflorante dos aquíferos sedimentares. No caso do Aquífero Guarani confinado, as equipotenciais estão representadas em mapa lateral.

A consulta aos estudos do DAEE (1974, 1975, 1976, 1977, 1979a, 1979b, 1981, 1982, 1999) foi uma constante durante a realização dos trabalhos, pois constituem uma referência para a hidrogeologia do Estado de São Paulo.

2 - MÉTODOS

A potencialidade de água subterrânea dos aquíferos sedimentares está representada no Mapa por faixas de vazão explorável, em m³/h. Define-se como vazão explorável, ou recomendada, aquela que pode ser extraída de forma sustentável por longos períodos e com rebaixamentos moderados da espessura saturada. Para os aquíferos fraturados, no entanto, são indicadas vazões prováveis, pois, apesar de resultarem de cálculos realizados com capacidade específica de poços que contaram com a realização de testes de bombeamento de, pelo menos, 20 horas, elas não se relacionam a rebaixamentos em um período de tempo prolongado. Este é um fator que deve ser analisado para cada poço existente, ou a ser construído, devido à heterogeneidade daqueles aquíferos.

O cálculo da vazão (Q) explorável para os aquíferos sedimentares foi realizado adaptando a equação de THEIS (1935), para cálculo de rebaixamento, com a aproximação proposta por COOPER & JACOB (1946). Neste cálculo considerou-se um período de 20 anos de bombeamento contínuo. O rebaixamento máximo do nível d'água subterrânea foi definido para cada aquífero de acordo com as suas características e disponibilidade de dados. Este método foi inicialmente aplicado por ROCHA *et al.* (1981), para avaliação da potencialidade do Aquífero Bauru, em São Paulo. A equação utilizada para o cálculo de vazão explorável foi a seguinte:

$$Q = \frac{s_c H_0 4\pi T}{\ln(2,25.Tt / r^2 S)}$$

onde,

Q = vazão explorável (m³/h)

s_c = rebaixamento corrigido conforme a aproximação de JACOB (1969 *apud* CUSTÓDIO & LLAMAS 1976) para as condições de aquífero livre (m): $s_c = s - s^2 / 2 H_0$

H_0 = espessura saturada do aquífero (m);

T = transmissividade (m²/h)

S = coeficiente de armazenamento (adimensional);

r = raio do poço (m);

t = tempo de bombeamento, fixado em 20 anos (175.200 h).

Para a aplicação da equação foi adotada a hipótese simplificadora de que o aquífero é predominantemente livre e a circulação da água subterrânea obedece aos requisitos da Lei de Darcy. Este método de cálculo foi utilizado para os aquíferos Bauru, Guarani e Taubaté. No caso do Aquífero Guarani confinado, H_b corresponde à diferença entre a cota do nível potenciométrico e a cota do topo do aquífero. Para os aquíferos Tubarão, São Paulo e Litorâneo, devido à insuficiência de informações, as vazões foram calculadas com base na capacidade específica de poços e considerando um rebaixamento máximo definido em função das características de cada aquífero.

A partir dos resultados obtidos com a aplicação da equação foi realizado o zoneamento das vazões exploráveis, utilizando como pontos de controle as vazões resultantes de testes de bombeamento de longa duração.

O zoneamento de vazões prováveis nos aquíferos fraturados exigiu um procedimento distinto, devido às condições estruturais que regem a ocorrência e circulação da água nestes terrenos. Como parâmetro de avaliação da produção dos poços, considerou-se adequado utilizar a capacidade específica (vazão por metro rebaixado do nível d'água no poço, em $m^3/h/m$), pois esta, quando comparada à vazão, é mais diretamente relacionada ao potencial do aquífero. Nos estudos do DAEE (1981 e 1982), verifica-se boa correlação entre capacidade específica e transmissividade (obtida em testes de bombeamento) do aquífero fraturado local.

O método utilizado consistiu em verificar a variação da produtividade dos poços em relação a alguns fatores que, a princípio, exerceriam influência sobre a circulação e o armazenamento de água subterrânea em aquíferos fraturados. Devido à escala de trabalho e aos dados disponíveis, considerou-se adequado analisar a variação da produção dos poços em relação aos seguintes fatores: tipos de rocha, blocos geológicos, espessura de manto inconsolidado e fraturas. Para tal, foi utilizado o seguinte procedimento:

- a) divisão da área dos aquíferos fraturados em classes, segundo as subdivisões de cada fator considerado, e agrupamento dos poços conforme as classes estabelecidas.
- b) avaliação do comportamento da produtividade de cada conjunto de poços por meio da construção de curvas de distribuição acumulada das capacidades específicas, e
- c) comparação das curvas de distribuição acumulada para verificação da existência de diferenças significativas entre as classes.

Para a análise do fator “fraturas” foram elaborados mapas de lineamentos, cujo tratamento resultou em mapas de densidade de lineamentos e de intersecções de lineamentos, os quais, em geral, são correlacionáveis à densidade e à conectividade de fraturas, respectivamente. Após a identificação

de 4 classes de potencialidade, às quais correspondem 4 curvas distintas de distribuição acumulada, procedeu-se à conversão dos valores de capacidade específica de 20% e 80% de cada distribuição para valores de vazão. Isto por meio de análise de correlação, com grau de confiança de 95%, entre capacidade específica e vazão, utilizando dados de poços nos quais consta a realização de testes de bombeamento com duração maior ou igual a 20 horas.

A distribuição espacial das faixas de produtividade de poços segundo os aquíferos proporciona uma visualização geral das áreas de maior ou menor potencialidade. Os intervalos de vazão, apesar da coerência com valores pontuais dos poços selecionados, têm limites aproximados no Mapa.

3 - CONSTITUIÇÃO E OCORRÊNCIA DOS AQUÍFEROS

A figura 1 mostra a distribuição dos aquíferos paulistas e a figura 2, uma seção dos mesmos. A seção é iniciada no litoral, a sudeste (próximo a Bertioga), passa por São Paulo e bordeja o rio Tietê pela margem direita, até aproximadamente Botucatu, a partir de onde segue pela margem esquerda, até atingir os limites do Estado, a noroeste, no rio Paraná. Para elaboração desta seção foram consultados LEITE *et al.* (2004), LOPES *et al.* (2004), PERROTA *et al.* (2004) e SALVADOR *et al.* 2004.

O Grupo Passa Dois, que aflora na porção central da Depressão Periférica e abrange as formações Irati (folhelhos e calcários) e Corumbataí (siltitos, folhelhos, margas e calcários), do Permiano-Triássico, corresponde ao único aquícluído do Estado; todas as outras grandes unidades geológicas do Estado constituem aquíferos contínuos ou descontínuos.

O Mapa Geológico do Estado (PERROTA *et al.* 2005) foi a base geológica utilizada e, portanto, tanto a distribuição como a constituição dos aquíferos, quando outros trabalhos não forem citados, foram extraídos do mesmo.

Ordenados segundo a idade das rochas que os constituem, de modo decrescente, no Estado de São Paulo ocorrem os seguintes aquíferos:

Aquíferos pré-cambrianos (P€ e P€c)

Os aquíferos pré-cambrianos afloram em faixa aproximadamente NE e ocorrem desde as escarpas da Serra do Mar até a região limítrofe com a Depressão Periférica. As rochas pré-cambrianas foram subdivididas em dois aquíferos: pré-Cambriano (p€) e pré-Cambriano Cárstico (p€c). O primeiro corresponde a rochas metamórficas, de composição e graus metamórficos variados, e rochas ígneas, principalmente granitos foliados ou maciços. O segundo, p€c, consiste de mármores e metacalcários que afloram principalmente no sul do Estado.

Aqüífero Furnas (Df)

O Aqüífero Furnas tem exposição muito restrita no Estado de São Paulo, ocupando uma área de 530 km², na porção sudoeste. É constituído por arenitos quartzosos, esbranquiçados, de granulação média a grossa, com conglomerados basais, da Formação Furnas (Devoniano), unidade basal do Grupo Paraná, depositada sobre o embasamento pré-Cambriano.

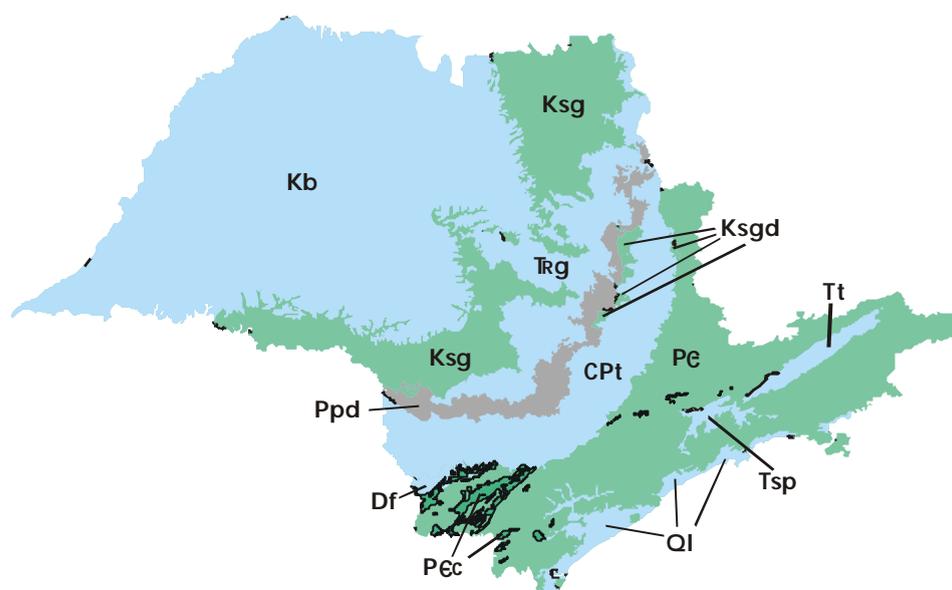


Figura 1. Localização dos aquíferos paulistas. Do mais antigo para o mais jovem: pré-Cambriano (P€), pré-Cambriano cárstico (Péc), Furnas (Df), Tubarão (Cpt), Guarani (TRg), Serra Geral (Ksg), Serra Geral Diabásio (Ksgd), Bauru (Kb), São Paulo (Tsp), Taubaté (Tt), Litorâneo (Ql).

Aqüífero Tubarão (Cpt)

O Aqüífero Tubarão repousa sobre as rochas pré-cambrianas e ocorre na porção leste da Depressão Periférica Paulista, onde está instalada a Região Metropolitana de Campinas e outras grandes cidades, tais como Sorocaba e Itu. Constitui-se dos Grupo Itararé e Formação Aquidauana, (Permo-Carbonífero), e Grupo Guatá (Permiano), este constituído pelas formações Tatuí (predominante), Rio Bonito e Palermo. Grande parte das unidades Itararé e Aquidauana foi depositada diretamente sobre o embasamento pré-Cambriano, sendo que a primeira é a unidade aquífera principal e compreende uma complexa associação de diamictitos, ritmitos, siltitos, argilitos, folhelhos, conglomerados e arenitos, que se sucedem tanto na vertical como na horizontal. A Formação Aquidauana, que está presente na porção nordeste do aquífero, consiste principalmente em arenitos, conglomerados, siltitos e folhelhos. A Formação Tatuí é constituída predominantemente de siltitos e subordinadamente de arenitos, calcários, folhelhos e sílex. As espessuras do Grupo Itararé e das

formações Aquidauna e Tatuí, nas suas porções aflorantes, podem alcançar 800, 300 e 70 m, respectivamente.

Aquífero Guarani (TRg)

O Aquífero Guarani aflora em faixa estreita e irregular (com área de 16.000 km²), na porção oeste da Depressão Periférica, e repousa sobre o Aquíclode Passa Dois. Para oeste é confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, numa extensão de cerca de 174.000 km², ocorrendo em profundidades que variam desde algumas dezenas de metros, junto à área de afloramento, a até mais de 1.900 m, no extremo oeste do Estado. As águas do Guarani abastecem cidades importantes tais como Ribeirão Preto, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília e Araçatuba. Este aquífero é composto por arenitos de granulação média a fina, localmente grossos e conglomeráticos, da Formação Pirambóia (Triássico), na base; e arenitos eólicos de granulação média a fina, avermelhados, bem selecionados, da Formação Botucatu (Jurássico-Cretáceo), no topo (CAETANO-CHANG & WU 1992, MILANI *et al.* 1994). A espessura do aquífero varia de aproximadamente 100 m, na área aflorante, até mais de 400 m, a oeste, ao longo da calha do rio Tietê.

Aquífero Serra Geral (Ksg)

O Aquífero Serra Geral, com porosidade dada por fraturas tectônicas e de resfriamento, aflora em área irregular, na porção central do Estado, e regiões mais rebaixadas junto às margens dos rios Grande, a norte, e do Paranapanema, a sul, sendo delimitado a leste pelo relevo de Cuestas Basálticas. Corresponde a basaltos da Formação Serra Geral, originados a partir de intensa atividade vulcânica no Eocretáceo. Suas espessuras variam desde poucos metros a até cerca de 300 m em sua área aflorante; em subsuperfície chegam a atingir quase 2000 m na região do Pontal do Paranapanema (MILANI 2004), no oeste paulista. Sobre os basaltos estão instalados importantes centros econômicos do interior do Estado, tais como Ribeirão Preto e São Carlos.

Aquífero Diabásio (Ksgd)

O Aquífero Diabásio apresenta ocorrência restrita dentro da Depressão Periférica, mas é de grande importância local. Constitui-se de soleiras e diques de diabásio, gerados durante o mesmo evento da Formação Serra Geral, em profundidades variáveis e intrudindo principalmente as rochas dos aquíferos Tubarão e Guarani e Aquíclode Passa Dois. Diques ocorrem em grande quantidade no extremo sul do Estado, onde apresentam direção preferencial N40-50W (ALMEIDA 1964) e penetram as rochas pré-cambrianas. Seu comportamento hidráulico ainda não é bem conhecido, no entanto, sabe-se que podem atuar como barreira ou como condutos de circulação mais rápida de água subterrânea.

Aqüífero Bauru (Kb)

O Aqüífero Bauru, importante fonte de abastecimento para toda a porção oeste do Estado, recobre os basaltos do Aqüífero Serra Geral, apresentando extensa área aflorante de 96.880 km². As formações geológicas do Grupo Bauru foram classificadas pelo DAEE (1979b) em duas unidades hidroestratigráficas: Bauru Médio/Superior e Bauru Inferior/Caiuá, aproximadamente grupos Bauru e Caiuá de FERNANDES & COIMBRA (1992). O primeiro é constituído de arenitos grosseiros imaturos, com abundantes nódulos e cimento calcíferos, e arenitos finos intercalados com lamitos e siltitos; e o segundo, de arenitos finos, maciços, com baixo teor de matriz, e arenitos finos a médios, com boa seleção. A espessura saturada média do aqüífero é da ordem de 75 m, podendo chegar a 300 m.

Aqüífero São Paulo (Tsp)

Este aqüífero, assim como o Aqüífero Taubaté, encontra-se encravado nas rochas Pré-Cambrianas do leste do Estado. Ocupa uma área de pouco mais de 1.000 km², distribuída irregularmente na porção central da bacia hidrográfica do alto curso do rio Tietê, coincidindo aproximadamente com a área ocupada pelo município de São Paulo e arredores, cuja população é da ordem de 13 milhões de habitantes. As rochas da Bacia de São Paulo pertencem às seguintes unidades: (1) Grupo Taubaté (Paleógeno) constituído, da base para o topo, pelas formações Resende (arenitos, conglomerados, diamictitos e lamitos), Tremembé (argilitos, folhelhos, margas e calcários dolomíticos) e São Paulo (arenitos, argilitos, siltitos e arenitos conglomeráticos); (2) Formação Itaquaquecetuba (arenitos grossos arcoseanos, lamitos e brechas) (Neógeno); e (3) coberturas aluvionares e coluvionares (Quaternário) (RICCOMINI & COIMBRA 1992). A espessura média do pacote sedimentar é da ordem de 100 m e, em algumas áreas, as espessuras totais dos sedimentos chegam a atingir mais de 250 m.

Aqüífero Taubaté (Tt)

O Aqüífero Taubaté ocupa o vale do rio Paraíba do Sul, na porção leste do Estado de São Paulo, em uma área de 2.340 km². A região é importante eixo econômico entre São Paulo e Rio de Janeiro, abrangendo cidades de médio a grande porte, como São José dos Campos, Jacareí, Taubaté e Aparecida. Abrange o Grupo Taubaté (descrito acima); arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos da Formação Pindamonhangaba (Mioceno); e depósitos aluviais e coluviais (Quaternário) (RICCOMINI 1989). O Aqüífero Taubaté é dividido em duas partes, devido à presença de argilitos e folhelhos da Formação Tremembé, que ocorrem na porção central da bacia. A espessura saturada do aqüífero varia de 200 a 300 m na área central da bacia, mas pode chegar a mais de 400 m.

Aqüífero Litorâneo (Ql)

De idade cenozóica, o Aqüífero Litorâneo distribui-se irregularmente ao longo da costa, segmentado pelas rochas do embasamento pré-Cambriano, desde a região de Cananéia, a sul, onde

chega a 70 km de largura, até a região de Caraguatatuba e Ubatuba, a norte, onde ocorre como pequenos bolsões isolados. Os depósitos destas planícies correspondem a: arenitos, siltitos e conglomerados da Formação Pariquera Açu (Mioceno), areias com camadas de argila da Formação Cananéia (Pleistoceno), e areias e argilas continentais (Quaternário) (SUGUIO & MARTIN 1978). A espessura varia desde poucos metros até mais de 167 m (DAEE 1979).

4 - POTENCIALIDADE

A potencialidade dos aquíferos foi investigada através dos dados da Base Poços. A tabela 1 mostra a quantidade de poços selecionados e representativos por aquífero. Em vista dos comportamentos hidráulicos distintos, a potencialidade dos aquíferos sedimentares e a dos fraturados é descrita separadamente, a seguir.

Tabela 1. Quantidade de poços utilizados na elaboração do Mapa

Aquífero	Poços selecionados	Poços Representativos
Bauru	676	69
Guarani	111	34
Tubarão	853	09
São Paulo	172	06
Taubaté	134	04
Litorâneo	60	04
Furnas	01	01
Serra Geral (basalto)	285	24
Serra Geral (diabásio)	49	-
Pré-Cambriano	1202	44
TOTAL	3543	195

4.1 - Aquíferos sedimentares

A tabela 2 mostra as características gerais dos aquíferos sedimentares e as suas faixas de vazões exploráveis. Estas foram calculadas, para os aquíferos Bauru, Guarani e Taubaté, conforme descrição encontrada no item “Métodos”, sendo que foi utilizado um rebaixamento de 50%, 12% e 50% da espessura saturada, respectivamente.

No caso do Aquífero Bauru, os parâmetros utilizados no cálculo da vazão explorável (figura 3) foram primeiramente espacializados em mapas temáticos vetoriais e, posteriormente, discretizados em raster (células de 1km). Neste sentido, foram inicialmente elaborados os seguintes mapas temáticos: transmissividade (dados pontuais), potenciometria (dados pontuais e curvas), base

do aquífero (dados pontuais) e coeficiente de armazenamento (valor por área). O procedimento utilizou o módulo de “Função da Análise Espacial” do software ArcView (ESRI 2002) para a aplicação da equação utilizada no cálculo da vazão, que resultou no zoneamento das vazões exploráveis do Aquífero Bauru. As zonas de potencial explorável mais elevado encontram-se a oeste, nas áreas de domínio do Bauru Inferior/Caiuá, onde ocorrem espessuras saturadas da ordem de 100 a 200 m e transmissividades de até 300 m²/d. O mesmo procedimento foi adotado para o Aquífero Taubaté.

Tabela 2. Características gerais e faixas de vazões exploráveis indicadas para os aquíferos sedimentares, em m³/h. Para cada faixa é indicado o valor máximo de vazão, em m³/h.

		10	20	40	80	120	250	360
Bauru	Contínuo, extensão regional, livre a semi-confinado, com transmissividade moderada a baixa	■	■	■	■			
Guarani	Contínuo, extensão regional, parcialmente livre a predominantemente confinado, com elevada transmissividade	Livre		■	■			
		Confinado				■	■	■
Tubarão	Descontínuo, extensão regional, em horizontes e corpos localizados, semi-confinado ou confinado, com baixa transmissividade	■	■	■				
Furnas	Contínuo, regional, extensão limitada, livre a semi-confinado, com transmissividade moderada a baixa	■						
Taubaté	Descontínuo, extensão regional limitada, tipo multicamada, semi-confinado ou confinado, com transmissividade baixa a elevada			■	■	■		
São Paulo	Descontínuo, extensão regional limitada, tipo multicamada, semi-confinado ou confinado, com transmissividade baixa a elevada	■	■	■				
Litorâneo	Extensão limitada, livre, com transmissividade moderada a elevada	■	■					

Para o Aquífero Guarani (figura 4), a condutividade hidráulica (K) como um todo, foi obtida pelo cálculo da média ponderada dos valores de K das Formações Pirambóia (2,5 m/dia) e Botucatu (3,5 m/dia) (DAEE 1974). O fator de ponderação correspondeu à somatória das espessuras de cada formação. Os valores médios de K obtidos são 2,6 m/dia para a área confinada e 3,0 m/dia para a área livre. Adotando o mesmo procedimento, foi calculada a média ponderada do coeficiente de armazenamento (S) para a porção livre do Aquífero Guarani, obtendo-se, nesta área, um valor médio de 0,17. Na porção confinada optou-se pelo valor de 10⁻³, de acordo com DAEE (1974), pois este possibilitou a obtenção de faixas de vazão mais compatíveis com a maioria dos poços perfurados. A transmissividade (T), obtida com base no mapa de espessura do aquífero e nos valores de K, é de aproximadamente 260 m²/dia na área aflorante, aumentando progressivamente para oeste até atingir valores superiores a 1.200 m²/dia ao longo do vale do rio Tietê, na área confinada. Nesta área os níveis potenciométricos do Aquífero Guarani encontram-se em cotas superiores às do contato com a Formação Serra Geral.

O cálculo de vazão explorável para o Aquífero Tubarão tomou como base a análise dos dados de capacidade específica dos poços selecionados. São recomendados profundidade máxima de 150

m, para a abertura de novos poços, e rebaixamento máximo da ordem de 30 m (aproximadamente 20% da espessura saturada mediana). É também proposto um espaçamento mínimo de 500 m entre poços (ou 4 poços/km²), visando evitar a ocorrência de rebaixamentos elevadas da superfície potenciométrica, como os já observados em algumas cidades, decorrentes da elevada concentração de poços.

Para toda a área de exposição do Aquífero Furnas, foi identificada apenas uma faixa de vazão explorável, de até 10 m³/h, calculada a partir das características litológicas da formação, já que se dispunha de dados de um único poço, cuja capacidade específica é de 0,035 m³/h/m.

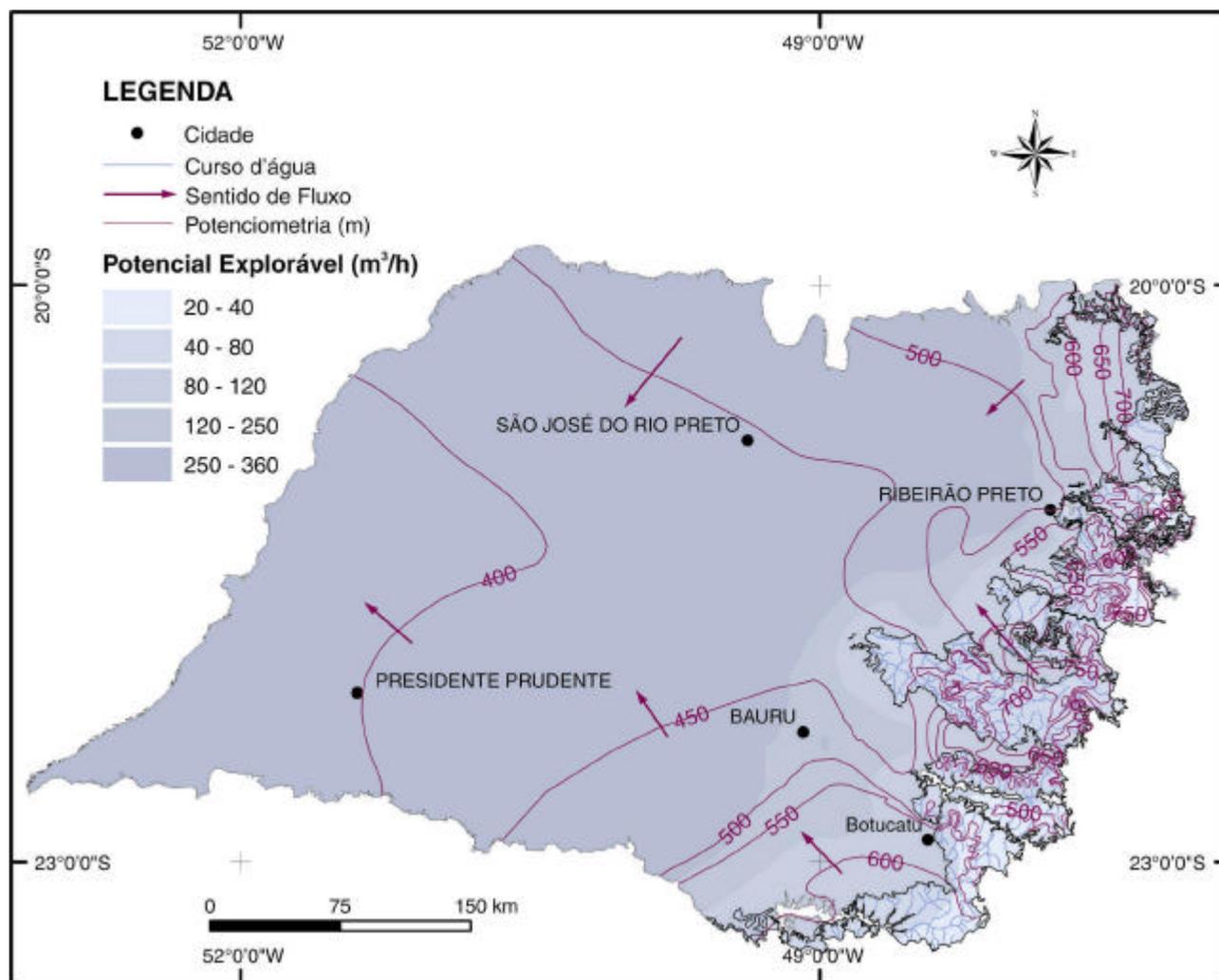


Figura 4. Mapa de potencialidade Aquífero Guarani com indicação das vazões exploráveis.

Para o Aquífero São Paulo (figura 5), a elaboração do mapa de vazões exploráveis, seguiu os seguintes passos: a) organização da base de poços que captam exclusivamente o aquífero de interesse; b) confecção do mapa de superfície potenciométrica (modificado de DAEE 1975); c) confecção do mapa de contorno estrutural do topo do embasamento pré-Cambriano (modificado de TAKIYA *et al.* 1989); d) elaboração do mapa de espessura saturada a partir destes dois últimos mapas; e) zoneamento da capacidade específica dos poços selecionados (os dados de

transmissividade e coeficiente de armazenamento não foram suficientes para a regionalização); f) zoneamento da vazão explorável do Aquífero São Paulo, como resultado do produto da capacidade específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) pela espessura saturada (m). As áreas com maiores potenciais de vazão, geralmente correspondem a locais de embaciamentos restritos, espessura saturada elevada e presença das areias basais pertencentes à Formação Resende, conforme também observado por HIRATA & FERREIRA (2001). Já em áreas com expressiva presença da Formação São Paulo, as vazões apresentam-se, em média, inferiores.

Curvas de distribuição acumulada construídas para os poços do Aquífero Bauru, mostraram que os poços a menos de 1.000 m de distância de lineamentos (70 poços) são mais produtivos que aqueles a maiores distâncias (452 poços), apresentando, respectivamente, as medianas de $0,53 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $0,37 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. A mesma influência positiva de lineamentos foi observada para o Aquífero Tubarão na região de Campinas, pois, considerando apenas os poços com capacidade específica maior que $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, totalizando 21 poços, 18 estão próximos a lineamentos e apenas 3 estão longe destas feições (FERNANDES 1997 e FERNANDES & RUDOLPH 2001).

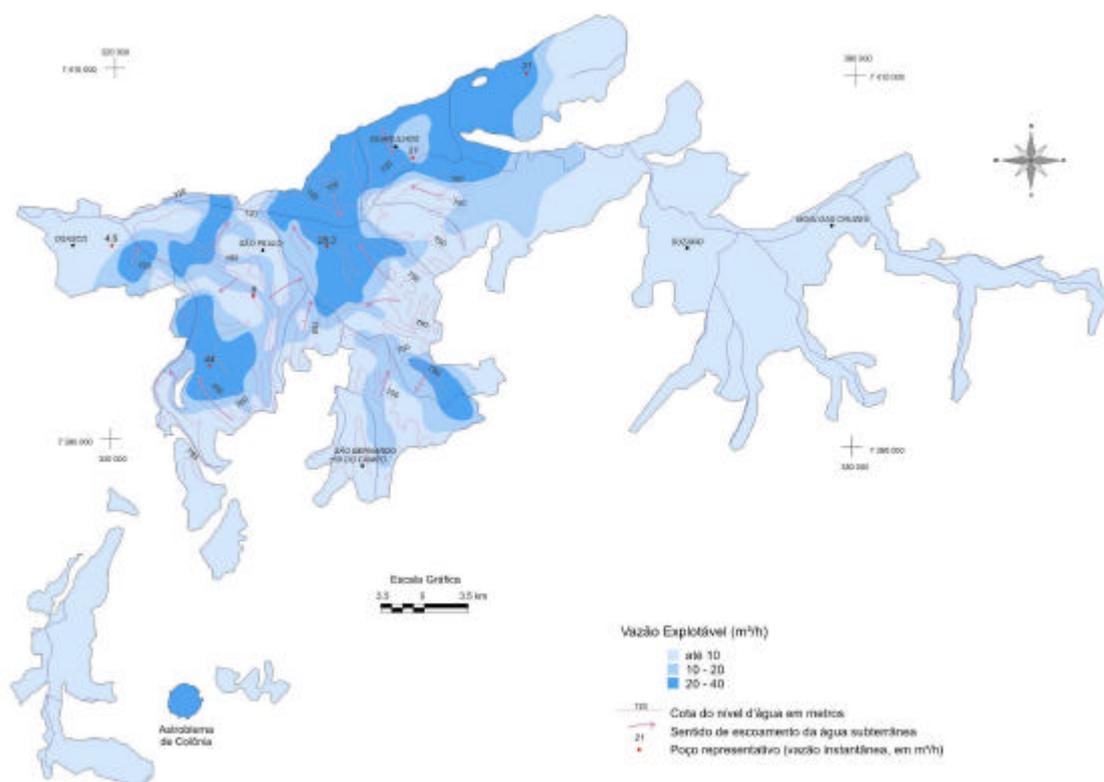


Figura 3. Mapa de potencialidade do Aquífero São Paulo com indicação das vazões exploráveis.

4.2 - Aquíferos fraturados

Com o objetivo de identificar áreas com potencialidades distintas de produção para os aquíferos fraturados, foi realizada uma avaliação que consistiu em verificar como a produtividade

dos poços varia com relação a alguns fatores considerados significativos, enumerados na tabela 3. O parâmetro de produção dos poços utilizado na avaliação foi a capacidade específica (em $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$), pois indica mais diretamente o potencial do aquífero, quando comparada à vazão. Nos estudos do DAEE (1981, 1982) foi verificada boa correlação entre capacidade específica e transmissividade (obtida em testes de bombeamento) do aquífero fraturado local. Os fatores, e suas respectivas classes, analisados para a avaliação da variação da capacidade específica dos poços em aquíferos fraturados e identificação de áreas com potencial distinto para a produção de água subterrânea, estão discriminados na tabela 3.

Tabela 3. Fatores considerados na avaliação da variação da produção dos poços e subdivisão destes fatores em classes.

FATOR ANALISADO	CLASSES
Tipo de rocha	<ul style="list-style-type: none"> - Granito - Rochas metamórficas de alto e médio grau - Rochas metamórficas de baixo grau - Rochas carbonáticas - Basalto - Diabásio
Espessura de material inconsolidado	<ul style="list-style-type: none"> - Espesso (> 30 m) - De espessura intermediária (entre 5 e 30 m) - Pouco espesso ou ausente (< 5 m)
Lineamentos (fraturas)	<ul style="list-style-type: none"> - 5 classes de densidade de lineamentos por direção (em metros) por células quadradas de 5 km de lado - 5 classes de densidade de intersecção de lineamentos (combinações possíveis entre as diversas direções) em número de intersecções por km^2
Blocos geológicos	Os limites dos <i>blocos</i> correspondem em parte aos dos terrenos pré-cambrianos e em parte a estruturas tectônicas rúpteis

Com relação ao fator *tipo de rocha*, as curvas de distribuição acumulada de capacidade específica dos diabásios, gnaisses e rochas metamórficas de baixo grau sobrepõem-se ou aproximam-se, indicando comportamento hidráulico semelhante para estes grupos de rochas. Os granitos apresentam produção menor, como evidenciado pela sua curva e mediana de 0,06, quando comparados aos gnaisses com mediana de 0,09. No entanto, diferenças de produção ficam melhor caracterizadas com relação aos blocos geológicos, como será descrito adiante. Já os basaltos e as rochas carbonáticas apresentam comportamento semelhante entre si, com valores de capacidade específica mais elevados, evidenciando potencial de produção superior aos demais tipos de rocha.

A *espessura de manto inconsolidado* foi analisada somente para as rochas pré-cambrianas do Estado e, na escala de análise, as curvas de distribuição acumulada de capacidade específica mostram que este fator não exerce influência sobre a variação da produção de poços.

Com o objetivo de avaliar o fator *fraturas*, que são os caminhos preferenciais de circulação e armazenamento de água em aquíferos fraturados, foi elaborado um mapa de lineamentos. Estas feições foram traçadas sobre imagens LANDSAT TM-5, cenas 219-76, 219-77, 218-76, 219-75 e 220-77 (aquíferos p? e p? c) e sobre modelo digital de elevação (MDE) produzido na Missão Topográfica por Radar Interferométrico (*Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM*) (para os aquíferos Serra Geral, Ksg, e pré-cambrianos).

Foram observadas 5 direções principais de lineamentos com pequenas diferenças entre basaltos e rochas pré-cambrianas: N10W-N5E, N85E-N85W, N40-60W, N55-65E, N35-40E.

Foram elaborados também mapas de densidade de lineamentos para cada uma das cinco direções identificadas, além de mapas de densidade de intersecções, considerando todas as possíveis combinações de direções de lineamentos. Correlações positivas com a capacidade específica de poços foram obtidas apenas para a densidade de lineamentos EW e para a densidade de intersecções entre as direções EW e NS. Este resultado, no entanto, é conclusivo apenas para a região localizada entre São Paulo e Campinas, onde existe uma maior densidade de poços. Para as demais áreas o resultado não foi validado por escassez de dados.

Finalmente, um último fator de análise foi o de *blocos geológicos* que indicou mais claramente, para as rochas pré-cambrianas não carbonáticas (granitos e rochas metamórficas), a existência de regiões com potenciais distintos de produção. Os limites dos *blocos geológicos* correspondem em parte aos dos terrenos pré-cambrianos e em parte a estruturas tectônicas rúpteis, provavelmente cenozóicas. Os resultados obtidos são bastante conclusivos para a porção central do Aquífero pré-Cambriano (região Lindóia/Campinas/Grande São Paulo), onde há maior quantidade de poços; para as demais regiões do Estado, onde a densidade de poços é muito baixa, os resultados são apenas indicativos. A análise efetuada resultou na identificação e delimitação de 4 classes de potenciais hidrogeológicos distintos na área de ocorrência dos aquíferos fraturados do Estado de São Paulo, que são apresentadas na figura 6 Os basaltos e as rochas carbonáticas pré-cambrianas estão representados em curvas distintas, porém, devido ao comportamento hidráulico semelhante, estes dois tipos de rocha foram agrupados na quarta classe de potencialidade de produção. Da mesma forma, o Aquífero Ksgd (diabásio) e parte do Aquífero pré-Cambriano (p?) foram agrupados na segunda classe de produção.

A partir das distribuições acumuladas das 4 classes identificadas, foram identificados os valores de capacidades específicas em 20%, 50% e 80% da distribuição e convertidos para valores de vazão por meio de análise de correlação entre Q e Q/s, com grau de confiança de 95%. Nesta análise utilizaram-se dados de poços com teste de bombeamento de duração igual ou superior a 20 horas, pois, nestes casos, as vazões praticadas seriam as mais indicadas para cada poço.

Desta forma, no Mapa final obtido distinguem-se áreas com vazões prováveis, nos intervalos de 20 a 80% da distribuição, entre 1 e 6 m³/h (classe 1), 1 e 12 m³/h (classe 2), 3 e 23 m³/h (classe 3) e 7 e 100 m³/h (classe 4). As rochas onde ocorrem estas faixas de vazão são mencionadas na tabela 4, onde são citadas também as medianas (valores centrais ou de 50%). Apesar de não ter sido possível calcular os valores de vazão para o Ksgd (diabásio) e P€̄, considerou-se que, devido à semelhança de suas curvas de distribuição acumulada com as da classe 2 do Aquífero p€̄ e do Aquífero Ksg, respectivamente, poderiam ser-lhes atribuídas as mesmas faixas de vazão destas classes.

Tabela 4. Valores de 20%, 50% e 80% para as curvas de distribuição acumulada obtidas em cada aquífero fraturado e os respectivos valores de vazão obtidos por análise de correlação entre Q e Q/s, com grau de confiança de 95%.

Aquífero	Grupos de Rochas	Classes	Capacidade específica (Q/s), (m ³ /h/m)			Vazão (Q) calculada por correlação (m ³ /h)			Número de Poços
			20%	50%	80%	20%	50%	80%	
P€̄	Rochas metamórficas e granitos	1	0,01	0,04	0,14	1	2	6	199
		2	0,02	0,08	0,33	1	4	12	544
		3	0,05	0,18	0,67	3	7	23	236
Ksgd	Diabásios	2	0,01	0,13	0,48	Não calculada*			49
Ksg	Basaltos	4	0,16	0,62	2,89	7	23	100	285
P€̄	Rochas Carbonáticas	4	0,12	1,25	7	Não calculada*			12

* Valores não calculados devido à insuficiência de dados.

5 - CONCLUSÕES

No mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo estão representadas áreas com potencialidades distintas tanto para os aquíferos sedimentares como para os fraturados. Para estas áreas, no caso dos aquíferos sedimentares, são indicadas faixas de vazão explorável, definidas como aquelas que podem ser extraídas de forma sustentável por longos períodos, e com rebaixamentos moderados da espessura saturada. Para os aquíferos fraturados, no entanto, são indicadas vazões prováveis, pois, apesar de resultarem de cálculos realizados com capacidade específica de poços que contaram com a realização de testes de bombeamento de, pelo menos, 20 horas, elas não se relacionam a rebaixamentos em um período de tempo prolongado. Este é um fator que deve ser analisado para cada poço existente, ou a ser construído, devido à heterogeneidade daqueles aquíferos.

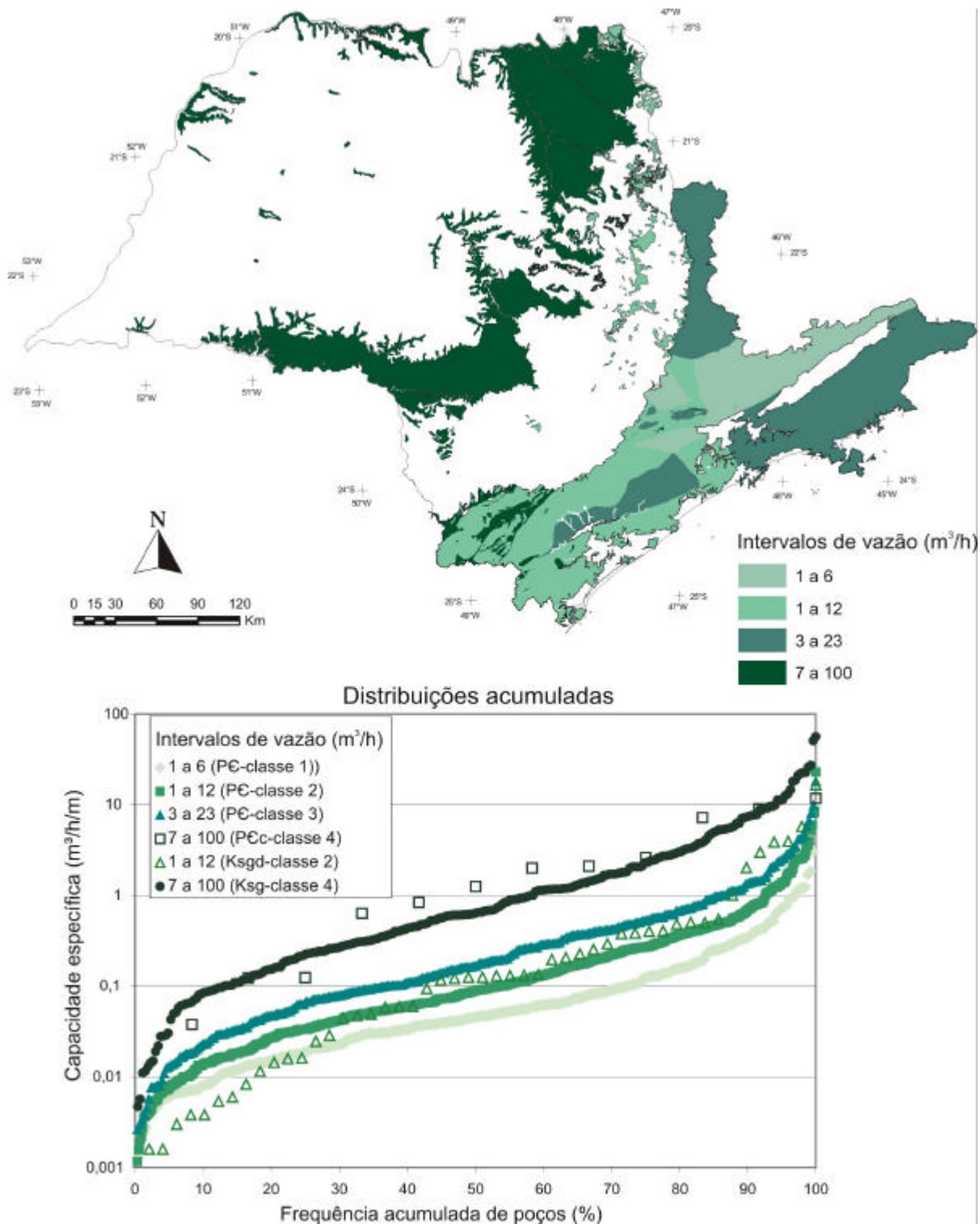


Figura 6. Mapa de distribuição das classes de potencial distinto para os aquíferos fraturados e gráfico com as respectivas distribuições acumuladas.

Os métodos utilizados para efetuar o zoneamento citado variaram em função dos dados disponíveis e do tipo de aquífero. Dentre os aquíferos sedimentares, aqueles que permitem extrações maiores, em ordem decrescente, são Guarani, Taubaté e Bauru; os que apresentam menores potenciais são São Paulo, Tubarão e Litorâneo. Com relação aos aquíferos fraturados, os de maior potencial correspondem ao Serra Geral e pré-Cambriano Cárstico. O Aquífero Pré-

Cambriano não cárstico, composto de rochas metamórficas e de rochas graníticas, foi subdividido em 3 classes de potencialidade distinta, cujos limites correspondem em parte aos dos terrenos pré-cambrianos e em parte a estruturas tectônicas rúpteis provavelmente cenozóicas.

O Mapa, em escala 1:1.000.000, propicia uma visualização geral do potencial de águas subterrâneas no Estado e comparação entre seus distintos aquíferos, servindo tanto como uma referência inicial para a realização de trabalhos de maior detalhe, como uma das bases técnicas para o planejamento e gestão das bacias hidrográficas.

6 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos à colaboração de várias pessoas, citadas abaixo, de acordo com as suas instituições:

DAEE : Alexandre Liazi, Armando Narumiya , Maria Dulce de Souza

IG: Anna Artemísia Barracco de Azevedo, Luciana Martin Rodrigues Ferreira, Mara Akie Iritani, Alexandre Henrique da Silva

IPT: Omar Yazbek Bitar, Mário Otávio Costa, Ana Maria de Azevedo Dantas Marins, Waldyr Dantas Cortez, Fausto Luis Stefani

CPRM: Marcos Dutra, Maria Kazue Urukawa, Rafael de Barros Barbim, Marina Graças Perin,

USP: Ricardo César Aoki Hirata

7 - BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, F. F. M. de. Geologia do Estado: Grupo São Bento. *Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*, São Paulo, v. 41, p. 85-101, 1964.

CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. Bacia do Paraná: Formações Pirambóia e Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Roteiro de excursão...* São Paulo: SBG, 1992. 19 p.

COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well filed story. *Transactions Am. Geophysical*, v. 27, p. 526-534, 1946.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrologia subterrânea*. Barcelona: Ed. Omega, 1976. Tomo I, Seção 8, p. 644.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 1 - Grande São Paulo*. São Paulo: DAEE, 1975. 3 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 2 – Santos*. São Paulo: DAEE, 1979a. 2 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 3 - São José dos Campos*. São Paulo: DAEE, 1977. v. 1 e 3.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 4 - Sorocaba*. São Paulo: DAEE, 1982. 2 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 5 - Campinas*. São Paulo: DAEE, 1981. 2 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de águas subterrâneas - Região Administrativa 6 - Ribeirão Preto*. São Paulo: DAEE, 1974. 4 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 7, 8, 9 - Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba*. São Paulo: DAEE, 1976. v. 1 e 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília*. São Paulo: DAEE, 1979b. v.1 e 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Regionalização hidrológica*

- do Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE, 1999. 1 CD-ROM.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. A cobertura cretácea suprabasáltica no Estado do Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos...* São Paulo: SBG, 1992. v. 2, p. 506-508.
- FERNANDES, A. J.; RUDOLPH, D. The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 9, p.151-167, 2001.
- FERNANDES, A. J. *Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia de meios fraturados*. 1997. 244 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- HIRATA, R.C.A.; BASTOS, C.R.A., ROCHA, G.A. *Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. IG/CETESB/DAEE, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (Série Documentos). 1997. 2 vol.
- HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, SP, n. 31, v. 1, p. 43-50, 2001.
- LEITE, C. A. S. *et al.* Folha SF.23 - Rio de Janeiro. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (Ed.). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Brasília: CPRM, 2004. (Programa Geologia do Brasil). 1 CD-ROM.
- LOPES, R. C. *et al.* Folha SF.22 - Paranapanema. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (Ed.). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Brasília: CPRM, 2004. (Programa Geologia do Brasil). 1 CD-ROM.
- SÃO PAULO. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo em 1:1.000.000. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE, Instituto Geológico -IG-SMASP, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT, Serviço Geológico do Brasil-CPRM. 2005. Nota Explicativa e Mapa.
- MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Org.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-280.
- PERROTTA, M. M. *et al.* Folha SG.22 - Curitiba. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (Ed.). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Brasília: CPRM, 2004. (Programa Geologia do Brasil). 1 CD-ROM.
- PERROTTA, M. M. *et al.* *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000*. São Paulo: CPRM, 2005. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M. Geologia da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: FERREIRA, A. A.; ALONSO, U. R.; LUZ, P. L. (Ed.). *Solos da Cidade de São Paulo*. São Paulo: ABMS/ABEF, 1992. p. 37-94.
- RICCOMINI, C. *O Rift continental do Sudeste do Brasil*. 1989. 256 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- ROCHA, G. A. *et al.* Tentativa de zoneamento das características hidráulicas e hidroquímicas do aquífero Bauru. O grupo Bauru no Estado de São Paulo. In: ENCONTRO DE GEOLOGIA & HIDROGEOLOGIA, 1., 1982, São Paulo. *Publicação Especial...* São Paulo: SBG/ABAS, 1982.
- SALVADOR, E. D. *et al.* Folha SG.23 - Iguape. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (Ed.). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Brasília: CPRM, 2004. (Programa Geologia do Brasil). 1 CD-ROM.
- STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*. International Association of Hydrogeologists. Hannover: Heise, 1995. (International Contributions to Hydrogeology, v. 17).
- SUGUIO, K.; MARTIN, L. *Mapas geológicos das planícies costeiras quaternárias do Estado de São Paulo e sul do Rio de Janeiro (1:100.000), Folhas de Cananéia, Iguape, Itanhaém, Santos, Bertioga, Caraguatatuba, Ubatuba e Parati*. São Paulo: DAEE/ SOMA, 1978.

- TAKIYA, H. *et al.* Arcabouço estrutural da Bacia de São Paulo. In: WORKSHOP SOBRE A GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO, 1989, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IG-USP/ SBG-NSP, 1989. p.16-26.
- THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophys. Union*, 16th Ann. Meeting, part 2, 1935.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. *International legend for hydrogeological maps*. England: UNESCO/ IASH/ IAH/ Institute of Geological Sciences, 1970.
- WAHBA, G. Spline models for observational data, SIAM. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics*, Philadelphia, v. 59, 1990.