CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DOS AQUÍFEROS DA BACIA DE TAUBATÉ

ALEXANDRE CAMPANE VIDAL¹ & CHANG HUNG KIANG²

ABSTRACT *HYDROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF AQUIFERS IN TAUBATÉ BASIN* The aquifer system of the Taubaté Basin represents an important source of groundwater in São Paulo State. The aquifer system is represented by Tertiary and Quaternary sediments of lacustrine and fluvial origin.

To define the spatial distribution of groundwater hydrochemical types, physical-chemical analyses of groundwater and statistical and geostatistical analyses were performed. The incorporation of updated informations about sedimentary facies and structural compartmentation were of great importance in the analyses of water chemistry data.

Four hydrochemical types have been defined. Hydrochemical type I corresponds to water stored in fluvial sandstones, showing low salinity, acid-base pH and classified as bicarbonated sodic and calcic. Hydrochemical type II is present in the fluvial sediments too, however, near the transition with lacustrine sediments, showing high pH and major influence of calcium and magnesium. Water of type III has a direct influence of lacustrine sediments, they are classified as bicarbonated sodic. Type IV are found only in lacustrine sediments, easily identified in the field by its high temperature and classified exclusively as bicarbonated sodic.

Keywords: Taubaté Basin, hydrogeochemistry, statistic.

RESUMO A Bacia de Taubaté se destaca pelo elevado potencial hídrico e marcante heterogeneidade química de suas águas subterrâneas. O sistema aquífero é constituído por sedimentos terciários e quaternários de origem fluvial e lacustre.

A definição e distribuição espacial dos tipos hidroquímicos basearam-se na análise físico-química das amostras de águas subterrâneas e na utilização de métodos estatísticos, como a estatística multivariada e a geoestatística. A incorporação de dados atualizados sobre a faciologia e compartimentação estrutural da bacia foram também de grande valia para a análise dos dados de análises químicas.

Com base nos resultados obtidos, foram definidos quatro tipos hidroquímicos distintos: o tipo I refere-se às águas presentes nos sedimentos fluviais, apresentando baixa salinidade, pH ácido-neutro e classificadas como bicarbonatadas sódicas e cálcicas; o tipo II está presente nos sedimentos fluviais próximos ao contato com os sedimentos lacustres, estas águas caracterizam-se pelo elevado pH e maior participação dos alcalinos terrosos; o tipo III representa águas com forte influência dos sedimentos lacustres e são classificadas como bicarbonatadas sódicas; por fim, o tipo IV, que se refere às águas amostradas exclusivamente em sedimentos lacustres, é facilmente identificado em campo pela elevada temperatura, sendo as águas classificadas como bicarbonatadas sódicas.

Palavras-chave: Bacia de Taubaté, hidrogeoquímica, estatística.

INTRODUÇÃO Este trabalho é parte integrante do projeto Caracterização Hidrogeoquímica da Bacia de Taubaté e objetiva o estudo da variação química das águas da bacia em todo o seu ciclo hidrológico. Os resultados apresentados se referentes a primeira fase de pesquisa, qual seja a definição e o mapeamento, em escala regional, dos tipos hidroquímicos presentes nas águas subterrâneas e a identificação preliminar dos possíveis fatores que controlam as diferenciações hidroquímicas.

A Bacia de Taubaté está localizada a sudeste do Estado de São Paulo, delimitada a noroeste pela Serra da Mantiqueira e a sudeste pelas serras Quebra Cangalha e Bocaina. Apresenta forma estreita e alongada, estendendo-se ao longo do vale do Rio Paraíba do Sul, desde Jacareí até o município de Cruzeiro, no principal eixo de ligação entre os grandes centros urbanos de São Paulo e Rio de Janeiro (Fig. 1).

A bacia foi escolhida para estudo pela marcante heterogeneidade e pela importância sócio-econômica de seus aquíferos. Exceto nos municípios de Taubaté e Aparecida do Norte, todos demais são parcial ou integralmente abastecidos por água subterrânea, destacando-se as cidades de Lorena e de São José dos Campos.

A heterogeneidade presente na bacia é reflexo da expressiva variação litológica resultante de pacote sedimentar depositado em diferentes ambientes deposicionais. A variedade litológica controla as diferenças das condições de fluxo e de composição química da água subterrânea entre as várias regiões.

Além disso, a pequena dimensão do arcabouço (300 km²), correspondente a um típico rifte intracontinental com limites bem definidos, também contribuíram para a escolha.

MÉTODOS DE ESTUDO A base de dados utilizada no presente estudo é formada por 67 amostras de águas subterrâneas, coletadas nos poços distribuídos na Bacia de Taubaté, e complementadas por 76 análises realizadas pelo DAEE (1977).

O pH de campo, a temperatura e a condutividade elétrica foram medidos na hora da coleta, sendo os frascos fechados e conservados em gelo até o laboratório. No dia da coleta, foram realizadas as análises de alcalinidade, utilizando-se o aparelho Orion 960 (*Autochemistry System*), com o eletrodo de pH. A alcalinidade foi medida pelo método de Barnes (1964), que consiste na determinação da alcalinidade total da amostra.

Para a análise dos cátions, as amostras foram filtradas em conjunto filtrante *milipore*, utilizando filtros de 0,45µm e, logo em seguida, acidificadas com 2 a 3 gotas de HNO₃ concentrado para 100 ml de amostra.

As análises físico-químicas foram realizadas no laboratório do IGCE/UNESP. Os íons cálcio, magnésio e sílica aquosa foram determinados empregando a técnica de espectrometria de emissão atômica por plasma de acoplamento indutivo (ICP-AES). O sódio e potássio foram determinados por espectrômetro de Ab-sorção Atômica (AA).

Os ânions sulfato e cloreto foram determinados pelo laboratório

¹ Pós – Graduação em Geociências – UNESP, e-mail: acvidal@rc.unesp.br

² UNESP/IGCE/Departamento de Geologia Aplicada, Av. 24-A, nº1515 CEP 13506-900 Rio Claro, SP e-mail: chang@rc.unesp.br

Figura 1 - Mapa de localização da área, com as principais cidades. No mapa: JA - Jacareí, SJC - São José dos Campos, CP - Caçapava, TB - Taubaté, TR - Tremembé, PI - Pindamonhangaba, RO - Roseira, AP - Aparecida do Norte, GU - Guaratinguetá, LO - Lorena, CZ - Cruzeiro.

rio da SABESP de São José dos Campos. O sulfato foi analisado mediante eletrodos íon-específicos e o cloreto por titulação com nitrato de prata.

Os cálculos dos erros práticos e teóricos foram determinados pelo método de Logan (1965) e o erro máximo permitido foi de 10%. As concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e os erros práticos das amostras foram calculadas pelo programa *Solmineq88 pc/shell* versão 0.85 (Perkins *et al.* 1988).

O processamento estatístico foi realizado com o programa *Statistica for Windows 4.3*, o tratamento geoestatístico com o auxílio do programa *ISATIS 2.0* e a confecção dos mapas pelo programa *SURFER 6*.

Devido a escala regional de pesquisa, duas generalizações foram realizadas neste estudo. A primeira se refere a utilização apenas dos íons maiores detectados nas análises físico-químicas. Elementos como nitratos, íons menores e traços não foram empregados nesta etapa.

A segunda generalização ignora a variação de profundidade dos poços sobre a salinidade das águas. Sendo assim, os resultados apresentados em mapa correspondem à interpretação da composição química média das águas dos poços. O principal motivo para a adoção deste procedimento deve-se ao grande número de filtros dispostos ao longo dos poços, fazendo com que ocorra a mistura das águas dos diversos níveis sobre a água coletada na boca do poço. Outro fator que colaborou para esta decisão foi a pequena variação da profundidade dos poços, grandemente situados entre 100 e 200 m. Análise estatística preliminar não mostrou uma correlação significativa entre a profundidade e a salinidade, para a maioria dos poços. A única exceção foram alguns poços posicionados na região do município de Taubaté, que possuem altas salinidades e chegam a atingir 500 metros de profundidade.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO Geologia A Bacia de Taubaté é parte de um conjunto de bacias pertencentes ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil – RCSB – (Riccomini 1989), anteriormente denominado Sistema de Riftes da Serra do Mar (Almeida 1976). A bacia está posicionada sobre rochas proterozóicas, ígneas e metamórficas, do Cinturão de Dobramentos Ribeira

(Hasui & Poçano 1978).

A estrutura alongada da bacia deriva de discontinuidades antigas de direção geral ENE do embasamento, as quais favoreceram uma tectônica ressurgente. A tectônica implantada foi do tipo rifte, com a formação de semi-grabens, separados por zonas de transferência ou de acomodação, com depocentros invertidos e leques aluviais associados a estes falhamentos.

As zonas de transferências, representadas pela Falha de São José, e pelos altos de Caçapava e de Pindamonhangaba, subdividiram a bacia em quatro compartimentos (Fig. 2): o Compartimento Parateí, à oeste da Falha de São José com profundidades inferiores a 200m; o Compartimento Jacaré - São José dos Campos, inserido entre a Falha de São José e o Alto de Caçapava, com profundidade máxima de 300 m; o Compartimento Quiririm-Taubaté, posicionado entre os Altos de Caçapava e Pindamonhangaba, apresenta *semi-graben* bem desenvolvido com espessura máxima de 600 m, e o Compartimento Aparecida-Lorena, o maior da bacia, com espessura de sedimentos que atinge a 800 m (Fernandes 1993).

O preenchimento da bacia pode ser dividido em duas fases: a primeira, sintectônica, com a deposição dos sedimentos do Grupo Taubaté, e a segunda, posterior à tectônica diastrófica, com a deposição da Formação Pindamonhangaba e depósitos aluviais e coluviais quaternários (Riccomini 1989).

Depositado durante o Paleógeno (Eo-Terciário), o Grupo Taubaté é subdividido nas formações Resende, Tremembé e São Paulo. A Formação Resende é constituída por sistema de leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados. As fácies proximais são compostas por conglomerados polímiticos, interdigitados com arenitos e lamitos arenosos de leques aluviais, oriundos de corridas de lama. Nas porções distais predominam os sedimentos de planície aluvial, que correspondem a arenitos, intercalados com lamitos. Vários níveis de ressecção foram encontrados, evidenciados pela existência de crostas de calcários calcíticos (calcretes) associadas aos lamitos desta formação.

A Formação Tremembé, formada por depósitos lacustres do tipo *playa-lake*, interdigita-se lateral e verticalmente com os depósitos da Formação Resende, e constitui a unidade mais significativa da porção central da bacia. Segundo Riccomini (1989), a Formação Tremembé apresenta 5 fácies principais: 1) fácies argilito verde maciço; 2) dolomitos tabulares, restritos a porção central da bacia; 3) ritmitos formados pela alternância de folhelhos e margas; 4) arenitos com estratificação cruzada sigmoidal e granodecrescência de areia média até silte bem desenvolvida na borda norte da bacia; 5) arenitos grossos, arcoseanos, intercalados nos argilitos verdes maciços na porção central da Bacia de Taubaté.

A Formação São Paulo compreende um sistema fluvial meandrante, com as principais fácies compostas por arenitos grossos, conglomeráticos, com abundante estratificação cruzada, siltitos e argilitos laminados e arenitos médios e grossos gradando para sedimentos mais finos. Na Bacia de Taubaté, a ocorrência desta formação está restrita à porção sudoeste.

Sobreposto ao Grupo Taubaté, ocorrem os sedimentos da Formação Pindamonhangaba. Depositados no Neoterciário, esta formação corresponde aos depósitos de sistema fluvial meandrante, bem desenvolvidos na porção central da Bacia de Taubaté (região de Caçapava e Pindamonhangaba), em faixa situada ao sul do Rio Paraíba do Sul (Fig. 2).

Por fim, ocorrem os sedimentos aluviais e coluviais quaternários posicionados ao longo da drenagens principais dos rios da região.

Figura 2 - Mapa esquemático geológico e estrutural da Bacia de Taubaté. 1) rochas do embasamento; 2) Formação Resende; 3) Formação Tremembé; 4) Formação São Paulo; 5) Formação Pindamonhangaba; 6) sedimentos quaternários (adaptado de Riccomini (1989) e Fernandes (1993)).

Hidrogeologia Com aproximadamente 700 poços catalogados, a Bacia de Taubaté é caracterizada pelo elevado potencial de exploração, principalmente na área do município de São José dos Campos, e pela elevada heterogeneidade de seus aquíferos (Campos 1993).

As regiões de São José dos Campos e Lorena (extremos Sul e Norte da bacia, respectivamente), são consideradas as mais promissoras para a exploração de água subterrânea, com vazões que variam de 10 a 200 m³/h, enquanto a região central da bacia, entre os municípios de Taubaté e Pindamonhangaba, apresenta características menos favoráveis à exploração, com vazões situadas entre 20 e 30 m³/h (DAEE 1977, Teissedre & Mariano 1978).

A maior parte dos aquíferos está sob condições freáticas (livres) ou pouco confinadas, com pressão acima da hidrostática somente em áreas limitadas (Frangipani & Panuti 1967, DAEE 1977). O fluxo de água subterrânea acompanha, grosso modo, as cotas topográficas em direção à drenagem principal, representado pelo Rio Paraíba do Sul.

Os aquíferos são caracterizados pela interdigitação de arenitos e lamitos, recebendo com isso a denominação de aquífero multicamada. Localmente, pode-se adotar o aquífero dividido em vários sub-aquíferos, segundo o número de camadas arenosas no perfil, entretanto, em razão da limitada continuidade das camadas confinantes, as características confinantes não se estendem regionalmente, estando, nesta escala, hidrologicamente interligados.

Do ponto de vista hidrogeoquímico, os poços inseridos nos sedimentos das formações Resende e São Paulo apresentam águas com baixa concentração de sais dissolvidos, alto teor de sílica, predomínio de cálcio e sódio entre os cátions e bicarbonato entre os ânions, enquanto que as águas da Formação Tremembé apresentam alto pH e elevada salinidade (DAEE 1977, Teissedre & Mariano 1978).

Para toda a bacia, o pH varia de 4,5 a 8,5. Os valores de resíduo seco apresentam variação de 20 a 683 mg/L (Fig. 3), sendo que a maioria dos dados não ultrapassa 300 mg/L de teor salino (DAEE

1977). As águas são classificadas como bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas cálcicas e, secundariamente, como cloro-sulfatadas sódio-cálcicas (Szikszay 1980). Observa-se na bacia a presença de anomalias hidroquímicas, com valores pontuais com excesso de fluoreto, sulfato, cloretos e de teor salino (DAEE 1977, Campos 1993).

Trabalhos recentes salientam que o aproveitamento desordenado dos aquíferos e a sua super-exploração, em algumas áreas, estão abatendo o nível estático e reduzindo as vazões específicas (Campos 1994, Franco Filho & Souza 1994).

No presente trabalho, considerou-se os diversos aquíferos, representados pelas camadas arenosas dos sedimentos siliciclásticos da Bacia de Taubaté, como pertencentes a uma grande unidade aquífera que denominamos de Aquífero Taubaté.

DETERMINAÇÃO DOS TIPOS HIDROQUÍMICOS A primeira etapa da caracterização hidroquímica foi a determinação dos tipos hidroquímicos presentes na água subterrânea da bacia. Na definição dos tipos, utilizou-se a concentração dos íons maiores. As concentrações foram representadas em diagramas para, a seguir, serem agrupadas de acordo com as semelhanças nas composições, em relação aos íons maiores.

A determinação dos tipos hidroquímicos, em diagramas tradicionais, mostrou alto grau de incerteza para estas águas, sem clara definição dos limites dos diferentes tipos. Estes diagramas agrupam, na forma gráfica, a composição química de diferentes águas, levando em consideração a relação entre os íons maiores. Com isso, foi possível agrupar no gráfico, as águas com semelhantes composições químicas. No caso do diagrama de Piper (1944), as concentrações são apresentadas como razões e, com isso, as diferenças quantitativas são mascaradas. Como exemplo, cátions de duas amostras podem apresentar semelhante proporção entre si, embora possuindo diferentes concentrações.

Por essa razão, optou-se pelo emprego da análise de agrupamento para a definição dos tipos hidroquímicos. A grande vantagem é que este método estatístico tem como principal objetivo identificar grupos homogêneos de uma população, levando em consideração o peso ou valor das amostras.

A análise de agrupamento é uma técnica estatística multivariada, que utiliza a similaridade entre os indivíduos para classificar

Figura 3 - Mapa de resíduo seco realizado pelo DAEE (1977), as concentrações estão representadas em mg/L.

riada, que utiliza a similaridade entre os indivíduos para classificar as amostras hierarquicamente em grupos, considerando todas as variáveis determinadas para cada indivíduo (Moura 1985, Davis 1986).

As variáveis utilizadas para a análise de agrupamento foram as concentrações de sódio, potássio, cálcio, magnésio, bicarbonato, cloreto e sílica aquosa (Anexo I). O sulfato foi descartado por apresentar poucos elementos acima do limite de detecção. O grau de similaridade foi determinada pelo coeficiente de distância euclidiana, usualmente utilizado quando se deseja estabelecer o grau de semelhança entre objetos (Moura 1985).

Os resultados são apresentados no dendograma figura 4, onde é possível identificar quatro agrupamentos denominados como tipos hidroquímicos I, II, III e IV. Os tipos I (CEPE a J07) e II (CP24 a CHLAT) agrupam a maioria dos dados, enquanto o tipo IV (T4 a P14) apresenta-se mais diferenciado devido o elevado valor do coeficiente de distância em relação às demais águas da bacia.

A análise de correlação dos tipos hidroquímicos com todas as variáveis contidas no banco de dados foi realizada e, dentre todas, a variável Sólidos Totais Dissolvidos (STD) mostrou a mais alta correlação. Esta relação pode ser visualizada em histogramas de STD construídos para cada tipo hidroquímico (Fig. 5).

Nos histogramas se observa a estreita relação entre os tipos hidroquímicos e a salinidade. O aumento da concentração ocorre entre as águas do tipo I e do tipo IV. Em cada tipo hidroquímico há uma sobreposição mínima dos histogramas. No tipo IV não há sobreposição, o que confirma a clara distinção do mesmo em relação aos demais. Esta boa distribuição entre os agrupamentos pode ser observada também com as variáveis sódio e bicarbonato, não ocorrendo, entretanto, com relação ao cálcio. No entanto, este comportamento é mais marcante com relação ao STD.

A análise da contribuição dos íons maiores, no processo de

seleção dos tipos hidroquímicos, pode ser visualizada nos diagramas de classificação de águas. Neste caso, utilizou-se o diagrama de Piper (Fig. 6), no qual se observa a sobreposição dos campos de todos os tipos hidroquímicos, mostrando que sem o emprego da estatística multivariada seria difícil a separação entre os tipos, principalmente entre I e II.

Ao se utilizar o diagrama de Piper, juntamente com os resultados obtidos nos histogramas de salinidade, observa-se que, com o aumento da salinidade, há um aumento na participação dos ânions carbonato e bicarbonato e dos cátions sódio e potássio. Os cloretos têm maior participação nas águas do tipo I e o cálcio e magnésio predominam no tipo II. De forma mais detalhada, os tipos hidroquímicos são descritos a seguir.

Tipo I Tem salinidade entre 28 e 207 mg/L. A maior parte das águas são bicarbonatadas sódicas, algumas apresentando composições de bicarbonatadas cálcicas e cloro-sulfatadas sódicas. O aumento da salinidade é observado em direção às águas bicarbonatadas, com as águas mais salinas contendo de 80% a 90% de bicarbonato entre os ânions. O cloreto é o segundo ânion em importância, com participações mais significativas para as águas de baixa salinidade. O sulfato é o que apresenta as menores porcentagens. Entre os cátions, destacam-se as baixas proporções de magnésio, que não ultrapassa a 20% do total dos cátions. O sódio e o cálcio são os cátions predominantes.

Tipo II Está representado pelas águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas. A salinidade varia de 165 a 350mg/L. O bicarbonato predomina entre os ânions, em proporções superiores a 80% na maioria das águas. Em relação aos cátions, há maior influência dos alcalinos terrosos, o magnésio ocorre em 3 poços com concentração mais elevada deste elemento. O cálcio e o sódio dividem a

Dendograma para 64 casos

Distância euclidiana

Figura 4 - Dendograma referente as águas da Bacia de Taubaté.

Figura 5 - Histogramas de STD referentes aos quatro tipos hidroquímicos.

Figura 6 - Diagrama de Piper ilustrando a distribuição de cada tipo hidroquímico.

predominância catiônica nas águas desse tipo.

Tipo III Este tipo corresponde às águas bicarbonatadas sódicas. Os teores de magnésio e cálcio são baixos e o sódio é o cátion predominante. Os carbonatos e bicarbonatos perfazem mais de 90% entre os ânions. As salinidades variam entre 275 e 438mg/L.

Tipo IV As águas deste tipo, a exemplo das do tipo III, são classificadas exclusivamente como bicarbonatadas sódicas. No campo, são facilmente identificadas pela temperatura superior a 35°C).

As composições químicas são marcadas claramente pelo predomínio de sódio (> 90%) entre os cátions, o mesmo acontecendo com bicarbonato entre os ânions. A salinidade dessas águas é a mais elevada da bacia e se situa entre 712 e 842 mg/L.

A composição média para cada tipo hidroquímico está consta da Tabela 1. Observa-se que, além do STD, a concentração de sódio e bicarbonato tende a aumentar em direção ao tipo IV. Outras variáveis indicativas desta tendência são o pH e a temperatura.

As águas do tipo II destacam-se das demais por apresentarem concentrações mais elevadas de cálcio, magnésio e sulfato. Já as águas do tipo I são identificadas pelos baixos valores da maioria dos constituintes químicos e pelos altos valores de potássio e sílica aquosa.

Embora o cloreto apresente maior concentração no tipo II, sua distribuição é aleatória, sendo os valores médios controlados por concentrações anômalas. Descartando os valores anômalos, há uma tendência de aumento da sua concentração com a salinidade.

DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS HIDROQUÍMICOS A análise da distribuição espacial dos tipos hidroquímicos na bacia foi inicialmente realizada com a representação de cada ponto de coleta e seu respectivo tipo hidroquímico (Fig. 7). Algumas considerações podem ser observadas quando se compara este mapa com a disposição litológica e a compartimentação estrutural da bacia

Conforme a distribuição dos tipos hidroquímicos, as águas do tipo I ocorrem predominantemente na região de São José dos Campos e nas bordas da bacia, sempre associadas a sedimentos da Formação Resende. Secundariamente, estas ocorrem na porção nordeste da bacia, na região entre Guaratinguetá e Cachoeira Paulista. Entretanto, sua ocorrência não é comparável ao claro predomínio na região de São José dos Campos, cujos poços estão localizados tanto na área de recarga, como também nas cotas mais baixas, junto ao vale do Rio Paraíba do Sul.

As águas do tipo II se concentram na região do Alto de Caçapava e, de forma mais dispersa, na região entre os municípios de Guaratinguetá e de Lorena. Uma ocorrência isolada deste tipo situa-se no extremo sudoeste da bacia, no município de Jacaref. Na região do alto de Caçapava, onde este tipo é melhor definido em mapa, os poços estão situados na zona de transição entre os sis-

Tabela 1 - Valores médios dos íons, STD, pH e temperatura, de cada tipo hidroquímico. Valores dos íons em mg/L.

	N	Temp	pH	Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄ *	Cl	SiO ₂ (aq)	STD
Tipo I	33	22,8	6,24	6,57	3,56	4,45	0,66	31,2	5,27(7)	2,77	48,5	101,8
Tipo II	22	24,7	7,57	23,7	3,28	19,5	1,79	129,1	7,7(11)	3,24	44,5	233,3
Tipo III	5	25,3	8,21	71,4	1,36	6,78	0,59	230,7	-----	1,97	21,4	340,1
Tipo IV	4	40,7	8,26	177,4	3,19	2,62	0,61	570,9	3(1)	1,88	16,9	777,2

* - as concentrações de sulfato foram detectadas em alguns poços. Os números entre parênteses correspondem ao número de amostras acima do limite de detecção.

Figura 7 - Distribuição dos poços com os tipos hidroquímicos correspondentes.

temas fluvial e lacustre.

O tipo III não apresenta uma área de concentração para se configurar um claro zoneamento, com apenas cinco poços definidos nas regiões central e nordeste da bacia. Apesar disso, este tipo provavelmente corresponde a uma transição entre águas dos tipos I e II e as do tipo IV. Os poços localizam-se, exceto um situado no município de Cachoeira Paulista, próximos ou inseridos em áreas com sedimentos lacustres.

O tipo IV, apesar do pequeno número de amostras, apresenta uma definição clara quanto a sua área de ocorrência, neste caso, nas regiões de Taubaté, Pindamonhangaba e Tremembé. Estes poços estão localizados na porção lacustre da Bacia de Taubaté, mais especificamente nos sedimentos da Formação Tremembé.

MAPA DE SALINIDADE A análise mais abrangente sobre a distribuição dos tipos hidroquímicos pode ser realizada com a caracterização da variável STD (sólidos totais dissolvidos), a qual possui relação direta com os tipos hidroquímicos. Desta forma, pela distribuição de STD na bacia foi possível estabelecer, de forma

indireta, a distribuição dos tipos hidroquímicos.

Para ampliar o número de dados, foram utilizados resultados de análises físico-químicas realizadas pelo DAEE (1977). A incorporação destas análises resultou no adensamento da malha e inclusão de dados em áreas pouco amostradas no presente estudo.

As amostras selecionadas do DAEE, passaram pelos mesmos critérios de seleção: análises físico-química completas; erros analíticos inferiores a 10% e poços contendo os principais dados, como localização, profundidade, cota, nível estático, etc.

Os valores de STD foram calculados para os dados do DAEE e, em seguida, comparados com os obtidos neste trabalho. Os valores médios de STD, de algumas áreas, apontaram diferenças inferiores a 10 % entre os dois arquivos. Além disso, alguns poços foram amostrados nas duas campanhas e as análises realizadas em ambos os casos apresentaram baixíssimas diferenças (< 5%), validando a utilização destes dados.

O conjunto de dados foi analisado com o auxílio de métodos geoestatísticos, resultando em mapa de STD gerado por krigagem (Vidal & Chang 2000, Vidal & Chang, em preparação). As áreas em

branco, no mapa, correspondem às regiões onde não há número de dados suficientes, apresentando alto erro de estimativa (Fig. 8).

A seguir, utilizando os intervalos de STD, elaborou-se um mapa da distribuição dos tipos hidroquímicos das águas subterrâneas da Bacia de Taubaté (Fig. 9). Os valores de STD definidos

para cada tipo hidroquímico foram: 0–175mg/L (Tipo I); 176–269mg/L (Tipo II); 270–539mg/L (Tipo III) e >540mg/L (Tipo IV).

A região de São José dos Campos constitui-se na maior extensão de águas com baixas salinidades, entre 0 e 200 mg/L, em que predomina o tipo I. Portanto, uma região homogênea do ponto

Figura 8 - Mapa de STD para a Bacia de Taubaté. As áreas em branco correspondem às regiões onde não há número de dados suficiente, estas áreas apresentaram um alto erro de estimativa.

Figura 9 - Distribuição dos tipos hidroquímicos na Bacia de Taubaté.

vista hidroquímico. A unidade litoestratigráfica predominante é a Formação Resende

A região do alto de Caçapava é outra região bem definida, com águas apresentando salinidades situadas entre 200 e 300 mg/L, onde predomina o tipo II. O grande número de poços com águas de mesmo tipo caracteriza esta região como hidroquímico-camente bem delimitada.

A partir do Alto de Caçapava, em direção ao centro da bacia, observa-se a brusca mudança para águas mais salinas, área em que predominam os sedimentos lacustres e as águas do tipo IV. As bordas da bacia, nesta região, ainda apresentam águas de baixa salinidade, representadas pelos tipos I e II.

Na região entre o alto de Pindamonhangaba e o município de Guaratingetá, ocorre uma grande área com poucos poços perfurados, prejudicando, desta forma, a estimativa da distribuição de salinidade nesta região. A presença de poços com águas dos tipos II e III na borda da bacia (município de Roseira) e de sedimentos pelíticos em afloramentos sugerem, que a região apresenta condições aquíferas semelhantes às presentes nos depósitos lacustres.

A partir de Guaratingetá, voltam a predominar os sedimentos da Formação Resende. Apesar disto, as salinidades são mais elevadas se comparadas às águas da região de São José dos Campos. A região de Lorena, situada no centro deste compartimento, apresenta número elevado de poços com águas do tipo II e III.

DISCUSSÕES De forma geral, a distribuição da salinidade representada no mapa de STD (Fig. 8) é semelhante à delimitada no mapa de resíduo seco do DAEE (Fig. 3), a principal diferença está no traçado das curvas. No mapa do DAEE as curvas de iso-salinidade acompanham a topografia, ressaltando unicamente a influência do comportamento livre dos aquíferos.

Já no presente trabalho, observa-se claramente que a distribuição da salinidade e, conseqüentemente, dos tipos hidroquímicos, é grandemente influenciada pela compartimentação tectônica da bacia. Além do controle tectônico, foi possível verificar a relação direta entre as diferentes litologias e os tipos hidroquímicos, pela comparação dos mapas geológico e hidroquímico. Esta relação é mais evidente quando se utiliza o mapa do IPT (1981), que não inclui os depósitos da Formação Pindamonhangaba e do Quaternário, e que enfatiza os depósitos mais antigos. A distribuição litológica no mapa do IPT (1981) reflete melhor a composição litológica dos aquíferos amostrados pelos poços estudados. A Formação Pindamonhangaba tem grande extensão em área, encobre os sedimentos do Grupo Taubaté, mas sua espessura máxima é de 30m (Riccomini *et al.* 1991). Desta forma, muitos filtros estão na realidade posicionados em profundidades maiores e, portanto, ancorados nas unidades mais antigas.

Dentre as zonas hidroquímicas aqui delimitadas, a de maior destaque é a região de São José dos Campos, inserida no Compartimento Jacaré-São José dos Campos. Todas as análises revelaram águas do tipo I, exceto em alguns poços localizados na região de Jacaré. A grande extensão desta região hidroquímica se deve à uniformidade litológica da Formação Resende, essencialmente siliciclástica. As águas subterrâneas associadas ao arcabouço predominantemente arenoso e permeável, resultam em baixo tempo de residência e alta capacidade de lixiviação, produzindo águas de baixa salinidade, pH ácido-neutro e elevada concentração de sílica aquosa, devido à dissolução e substituição de silicatos.

Outra zona hidroquímica claramente definida é a região do Alto de Caçapava, caracterizada por grande número de poços com águas do tipo II. Tal zoneamento, provavelmente, se deve a exis-

tência significativa de fases carbonáticas, resultando em pH alcalino, altas concentrações de bicarbonatos e de alcalinos terrosos. A região está situada na zona de transição entre os sedimentos lacustres e fluvio-aluviais.

As fases carbonáticas estão presentes em ambos sistemas deposicionais. No caso dos sedimentos de leques aluviais há a existência de calcretes calcíticas, relacionadas às porções distais, associadas aos lamitos. Já no ambiente lacustre, os sedimentos carbonáticos, de composição dolomítica, estão associados às argilas esmectitas verdes (Riccomini 1989). A provável ocorrência de cimentação carbonática é salientada por Goenopawiro (1997), ao observar a existência de arenitos em superfície desprovidos de argila, indicando que estes sedimentos foram, em parte, cimentados por calcita, o que é sugerido pelo arcabouço frouxo e pela ausência de sobrecrecimentos de quartzo e feldspato.

A terceira zona hidroquímica corresponde à área situada entre os municípios de Taubaté, Pindamonhangaba e Tremembé, onde predominam depósitos lacustres. Nela estão inseridos dois poços com 500m de profundidade, junto a outros com profundidades entre 100 e 300m. As águas desta região são do tipo IV, com elevada salinidade, pH alcalino e grande discrepância entre as concentrações de sódio e cálcio.

A diferença entre sódio e cálcio deve-se à troca iônica pois, de acordo com a estrutura das argilas, a capacidade desta troca é maior para os íons bivalentes do que para monovalentes (Stumm 1995). O processo é acentuado quando as argilas da rocha são esmectitas, as quais apresentam elevada capacidade de troca iônica (Drever 1982). Na Bacia de Taubaté, os argilominerais mais abundantes nos sedimentos lacustres da Formação Tremembé e nas fácies distais da Formação Resende pertencem ao grupo das esmectitas (Riccomini *et al.* 1996, Sant'Anna 1999).

Além da troca iônica, ocorre também um acentuado aumento no teor de bicarbonato, sugerindo a existência de fácies carbonáticas no interior do compartimento. A continuidade das fácies carbonáticas (caliche) foi delimitada utilizando poços perfurados pelo Conselho Nacional do Petróleo (Riccomini 1989) e alguns autores apontam estes níveis como marcos estratigráficos na bacia (Freitas & Appi 1987).

Com relação à região nordeste da bacia, não se observa um claro zoneamento para as águas subterrâneas. Apesar dos trabalhos hidrogeológicos prévios apontarem os dois extremos da bacia, São José dos Campos e Lorena, constituídos por sedimentos fluviais com semelhantes características hidrogeológicas, a constituição hidroquímica das águas mostra substancial diferença entre as duas áreas. Na área de Lorena, observa-se a presença de águas do tipo I nas bordas deste compartimento e a ocorrência dos tipos II e III, em direção ao centro da bacia, próximo às margens do Rio Paraíba do Sul, contrastando com a predominância do tipo I em São José dos Campos.

A diferenciação hidroquímica entre os extremos da bacia, São José dos Campos e Lorena, pode estar sendo controlada pela composição mineralógica das rochas. A distribuição litológica aponta uma pequena ocorrência de sedimentos lacustres ao norte do município de Guaratingetá. Esta pequena ocorrência é encoberta por sedimentos quaternários, mascarando a real extensão dos sedimentos lacustres. Devido a existência de poços com águas do tipo III na região de Lorena, é muito provável que os sedimentos lacustres se prolongam até a região central deste compartimento. Esta porção da bacia é heterogênea e, apesar de apresentar um número grande de poços, há a necessidade de adensamento da malha de amostragem e de detalhamento geológico.

Outro ponto a ser destacado diz respeito à distribuição de anomalias pontuais em toda a bacia. Segundo Campos (1994), a presença dessas anomalias é associada à proximidade de zonas sismogênicas, anomalias geotermiais e tendências estruturais regionais. Na realidade, somente dois poços analisados neste trabalho aparentam ser anomalias pontuais: um poço do tipo II localizado em Jacareí, próximo a Falha de S. J. dos Campos e outro, do tipo III, na borda da bacia, no município de Cachoeira Paulista. Estes poços devem estar bombeando águas com maior tempo de residência, interceptados pelas falhas. Já as águas quentes resultam provavelmente das características petrofísicas das rochas depositadas em ambiente lacustre.

A condutividade térmica de rochas pelíticas pouco compactadas é reduzida, suficiente para impor gradiente geotérmico de 40° C/km. Assim, poços que atingiram profundidades superiores a 300m podem armazenar águas com temperaturas superiores a 35°C, se a temperatura média na superfície for de 23°C.

De maneira geral, os resultados mostram um claro controle do arcabouço e litoestratigráfico na composição das águas subterrâneas da bacia de Taubaté. No entanto, faz-se necessário um detalhamento da distribuição litoestratigráfica em sub-superfície, só assim será possível estabelecer de forma mais acurada as condições de equilíbrio da água subterrânea, da área de recarga até as áreas de descarga do aquífero Taubaté.

CONCLUSÕES Este trabalho utilizou a análise multivariada de agrupamento para a determinação dos tipos hidroquímicos. Através desta técnica, quatro tipos hidroquímicos foram identificados

e que resultam em um zoneamento hidroquímico da Bacia de Taubaté.

O tipo I refere-se às águas associadas aos sedimentos fluviais da Formação Resende, presentes nas bordas da bacia e principalmente na região de São José dos Campos. As águas deste grupo caracterizam-se pela baixa concentração salina e pH ácido-neutro, e se classificam como águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas.

As águas do tipo II ocorrem associadas aos sedimentos fluviais, porém mais distantes das áreas de recarga, principalmente na região de Caçapava. Interação com carbonatos, exibindo teores elevados de Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} e HCO_3^- , podendo ser classificadas como águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas.

O tipo III representa águas com forte influência dos sedimentos lacustres, estando localizadas nas regiões de Taubaté e Lorena. São classificadas como águas bicarbonatadas sódicas, apresentando pH alcalino.

O tipo IV corresponde às águas amostradas exclusivamente em sedimentos lacustres, facilmente identificadas no campo pela elevada temperatura, sendo classificadas como bicarbonatadas sódicas. Estas águas apresentam altas concentrações salinas, pH alcalino e baixa concentração de Ca^{+2} e Mg^{+2} .

Agradecimentos À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio à pesquisa (processo nº96/2877-0), a SABESP pelo apoio na coleta e análise de ânions e aos revisores da RBG pelas sugestões ao original.

Referências

- Almeida F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 48 (suplemento): 15-26.
- Barnes I. 1964. Field measurement of alkalinity and ph. Washington, U. S. Geological Survey Water-Supply, paper 1535-H, p.17.
- Campos H.C.N.S. 1993. *Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo*. São Paulo. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 177p.
- Campos H.C.N.S. 1994. Anomalias hidrogeoquímicas e o contexto estrutural da Bacia de Taubaté (SP). In : Cong. Bras. Ág. Subt., Recife 1994. *Anais...* Recife, ABAS, pp.: 420-424.
- Davis J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. 2ed. New York. Wiley. 550p.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1977. Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 3 (São José dos Campos e Faixa Litorânea), SP. São Paulo, DAEE. 175p.
- Drever I.D. 1982. *The Geochemistry of natural waters*. London, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 387p.
- Fernandes F.L. 1993. *Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP*. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de Mestrado, 147p.
- Franco Filho F.W.B. & Souza J.C.S. 1994. Exploração de água subterrânea em São José dos Campos - Efeitos observados ao longo do tempo. In : Cong. Bras. Ág. Subt., Recife 1994. *Anais...* Recife, ABAS, 113-123p.
- Frangipani A. & Pannuti E.L. 1965. Estudos Hidrológicos na Bacia de Taubaté, entre Jacareí e Quiririm. *Bol. do IGG*, nº 42, São Paulo, 126p.
- Freitas E.L. & Appi C.J. (1987) Evento de ressecção (caliche): um marco estratigráfico do Terciário das bacias de Taubaté e Resende. In: SBG, Simp. Reg. de Geologia, 6, Rio Claro. *Atas...* v. 1, p. 323-337.
- Goenopawiro K. 1997. *Diagênese dos arenitos terciários da Bacia de Taubaté-SP*. Inst. de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, Tese de Mestrado, 149p.
- Hasui Y. & Poçano W.L. 1978. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: SBG, Cong. Bras. de Geologia, 30, Recife, v. 1, 368-381.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 1981. Mapa geológico do estado de São Paulo; escala 1:500.000. Secretaria da Indústria, Ciência e Tecnologia. São Paulo, SP. 2v.
- Logan J. 1965. *Interpretação de análises químicas de água*. Recife, PE. U. S. Agency for International Development. 75p.
- Moura C.A.V. 1985. Aplicação de tratamento estatístico multivariante em dados geoquímicos de solo no mapeamento geológico na província de Carajás (Alvo2-Corpo4). *Rev. Bras. Geoc.*, 15:241-248.
- Perkins E.H., Gunter W.D., Nesbitt W. 1988. Solmineq.88 PC/SHELL, User manual. version: 0.85, Alberta Research Council-OSHR. Edmonton, Canada.
- Piper A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Am. Geophys. Union Trans.* 25: 914-923.
- Riccomini C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 256p.
- Riccomini C., Coimbra A.M., Suguio K., Mihály P., Maturana E.C. 1991. Nova unidade litoestratigráfica cenozóica da Bacia de Taubaté, SP: Formação Pindamonhangaba. *Bol. IG-USP, Publ. Esp.*, 9:141-149.
- Riccomini C., Coimbra A.M., Sant'anna L.G., Brant Neto M.,

- Valarelli J.V. 1996 Argilominerais do paleolago Tremembé e sistemas deposicionais relacionados (Paleógeno, Rift Continental do Sudeste do Brasil). *Rev. Bras. Geoc.*, **26**:167-180.
- Sant'anna L.G. 1999. *Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo Tese de Doutorado, 293p.
- Stum W. 1995. *Chemistry of the solid water interface: Processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems*. New York: John Wiley & Sons. Inc. 428p.
- Szikszay M. 1980. Avaliação da qualidade das águas subterrâneas: uma metodologia aplicada nas regiões do Vale do Paraíba e Ribeirão Preto – Estado de São Paulo. *Rev. Ag. Subt. ABAS*, **2**:26-32.
- Teissedre J.M. & Mariano I.B. 1978. Possibilidades hidrológicas da Bacia de Taubaté. *SBG*. **6**: 3003-3011.
- Vidal A.C. & Chang H.K. 2000. Aplicação da Geoestatística no mapeamento da salinidade da Bacia de Taubaté. VIII Simp. de Quantificação em Geociências, *Bol. de Resumos Expandidos*, UNESP, Rio Claro, p.227-229.

Manuscrito A-1265
Recebido em 02 de novembro de 2001
Revisão dos autores em 30 de junho de 2002
Revisão aceita em 05 de julho de 2002

ANEXO I

Poço	pH Lab	Na	K	Ca	Mg	Fe	HCO ₃	SO ₄	Cl	F	SiO ₂ (aq)
Cepe	5,33	7,82	0,7	0,22	0,18	0,04	5,5		6,44	0,2	6,24
cp24	8,03	31	2	15	0,41		138,2		0,19	0,42	46,92
cp13	7,58	26	3,2	21	1,5	0,019	135,6		3,69	0,32	45,46
cp3	7,32	22	3,3	23	1,5		127,1		12,19		48,63
cp20	8,03	43	1,9	11	0,63		151,2		4,59	1,02	35,1
sj9	6,56	18	5,8	23	2,05		58,36		39,6		60,24
sj71	6,98	12,17	4,7	11	0,69		74,98		0,37		52,9
sj40	6,52	5	3,5	3,1	0,41		24,75		1,23		53,17
sj36	5,77	2,67	2,6	0,99	0,26		9,8		3,65		24,41
sj35	5,96	2,7	2,7	0,47	0,2		8,09		3,64		30,12
sj120	6,77	10	3,6	3,6	0,56		43,83		0,45		75,79
sj103	6,63	3,36	3,88	2,86	0,33		23,74		0,43		47,49
sl49	6,49	12,61	3,91	7,38	1,36		62,26		2,45		73,96
sj112	5,68	1,63	3,54	0,77	0,42		9,81		4,21		40,83
sj67	6,02	2,09	3,4	1,21	0,39		14,3		0,53		42,18
sj50	5,77	0,76	2,54	0,39	0,18		7,17		3,74		24,94
Euc	6,05	0,36	2,68	0,53	0,2		8,29		0,25		21,28
sj114	6,68	13,94	4,63	8,25	0,98		68,72		8,45		82,09
sj61	6,27	1,53	2,78	0,68	0,21		10,05		0,53		38,62
sj139	6,55	5,03	3,35	3,79	0,58		31,01		0,42		52
sj128	7,16	14,06	2,72	6,04	0,59	0,019	60,93		0,41	0,3	46,95
sj49	5,95	2,53	3,46	2,8	0,74	0,017	19,76		0,35		29,17
sj33	6,02	4,3	3,2	3,2	0,5		17,17		0,35		54
sj77	5,32	1,74	1,99	0,21	0,31		4,85		3,74		15,91
sj44	6,69	6,02	3,37	6,5	0,6		39,58		1,58		69,52
l05	8,53	105,35	0,7	3,77	0,1		300		2,56	1,5	18,56
l11	6,7	7,72	2,89	12,58	1,17		60,25	2,2	0,31		63,78
l04	6,15	7,78	2,78	8,52	1,26	0,015	40,03	2	0,73		70,54
lexplo	6,99	23,62	2,23	9,82	0,68		96,82	6	0,3		71,88
l07	7,86	37,64	0,97	5,19	0,46		125,8		0,53	0,7	25,57
l10	8,08	36,45	1,19	10,79	0,61	0,01	141,6		0,31	0,2	29,55
l06	8,5	85,9	0,65	5,4	0,15		270,4		1,76	1	19,36
cp23	7,77	29,3	2,41	17,53	1,04		130,9	4	0,13	0,2	40,37
cp22	7,43	12,62	3,61	31,25	1,24		123,5	4	0,33	0,2	59,55
cp21a	6,76	14,16	3,49	18,32	0,62		86,9		0,58	0,15	73
cp02	6,98	17,48	5,33	54,23	2,86		165,4	3,4	26,49		74,58
cp18	7,81	27,64	3,34	27,47	1,01		145,5	30	4,36	0,2	39,29
cp19	7,41	16,02	3,6	29,97	2,33		132,9		6,27		49,5
cp01	5,44	3,38	4,74	0,98	0,72	0,021	5,34	2,2	3,18		19,03
cp02v	5,67	1,74	2,97	1,9	0,46		12,07		0,34		22,03
cp21	7,96	36,9	2,1	15,91	0,93		145	23,8	2,48	0,8	37,95
ch02	8,3	55,8	0,77	3,52	0,27	0,07	178,3		1,57	1,5	27,41
chean	7,3	8,46	6,06	20,15	4,92	0,369	102,5	3	0,45		59,51
Chfat	7,81	24,95	2,79	5,34	0,96		94,5	3	1,29	0,3	26,07
Chf	6,6	7,21	3,56	3,9	0,8	0,041	33,2	6	0,36		70,79
Chin	5,88	3,48	3,58	1,49	0,62		17,88		0,36		38,85
r02	8,43	47	2,7	14,85	0,83	0,013	175,2		2,28	0,9	27,7
r04	7,72	6,31	4,71	34,01	7,32		163,5		1,03		27,93
r05	7,35	2,88	5,25	29,69	6,05		132,5	2,1	0,8	0,15	30,39
T04	8,17	196,1	3,77	2,68	0,74	0,026	612,9		1,21	3	16,43
T05	8,24	157,4	3,64	2,77	0,65	0,047	569,4		3,83	3	19,62
T06	7,93	25,28	3,1	9,59	1,89	0,011	122,8		0,25		30,79
T07	7,32	58,75	2,02	6,35	1,64	0,037	230		1,71		14,49
Pi11	8,29	178,4	2,61	2,62	0,52	0,036	579,8	3	1,33	2	18,05
Pi14	8,34	163,1	2,76	2,43	0,56	0,039	521,6		1,16	1,5	13,7
j13	6,15	10,14	5,98	4,36	1,06		36,92		0,59		46,05
j15	7,37	15,26	4,18	6,62	1,05		73		0,32		76,67
j07	6,49	12,86	4,58	5,81	0,96	0,027	53,42	59	0,2		84,67
j100	7,45	12,72	6,45	17,76	0,84	0,02	91,54		0,32		52,93
j200	5,61	7,61	4,86	2,19	0,63	0,049	16,28		1,81		34,77
G05	6,27	4,58	5,38	5,02	0,71	0,033	31,4	5,2	0,27		66,41
G08	7,18	32,3	2,72	10,53	0,76	0,031	137,7	2,3	2,21		42,07
G04	7,81	34,66	2,56	12,06	0,81	0,016	149,8	4	2,67		34,46