

MAPA HIDROGEOQUÍMICO DO AQUÍFERO GUARANI – REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO (SP): RESULTADOS PRELIMINARES

Heraldo Campos¹; Rafael Chaves Guanabara² & Edson Wendland³

Resumo - O município de Ribeirão Preto, localizado na porção Nordeste do Estado de São Paulo, é 100% abastecido pelas águas do Aquífero Guarani. Nesta região vem ocorrendo o uso intensivo de água subterrânea e uma numerosa quantidade de poços em atividade (400 poços) já evidenciam problemas de interferência entre eles. Ao mesmo tempo, percebe-se o aumento do risco de contaminação das águas subterrâneas por incremento de fontes instaladas sobre as partes aflorantes do aquífero (principalmente as relacionadas ao uso de agrotóxicos na agricultura), que são de alta vulnerabilidade. Neste trabalho será apresentada a caracterização hidrogeoquímica do Aquífero Guarani e a sua representação cartográfica, apresentada em um mapa principal, complementado por mapas laterais e perfis, preenchendo uma lacuna existente na região de Ribeirão Preto no tocante à sistematização de dados de qualidade química de águas subterrâneas. A etapa inicial do projeto compreendeu o levantamento e a análise da documentação bibliográfica e cartográfica existente sobre o tema da pesquisa. Durante a coleta de dados reuniram-se as principais informações sobre as características geológicas, hidráulicas e hidroquímicas do Aquífero Guarani, levando-se em consideração as diferentes escalas de estudos (Cone Sul, Estado de São Paulo e região de Ribeirão Preto).

Abstract - The municipality of Ribeirão Preto, located in the northeastern state of São Paulo, is 100% supplied by the waters of the Guarani Aquifer. In this region there has been intensive use of groundwater and a large number of active wells (400 wells) have indicated the problems of interference between them. At the same time, we see the increased risk of contamination of groundwater by increasing the fonts installed on the parts of the aquifer outcrop (primarily related to the use of pesticides in agriculture), which are highly vulnerable. The present work presents a hydrogeochemical characterization of the Guarani Aquifer, and their cartographic representation, presented in a main map, complete with maps and side profiles, filling a gap in the region of Ribeirão Preto in regarding the systematization of data quality of groundwater chemistry. The initial stage of the project included the survey and analysis of documentation and mapping existing literature on the subject of research. During the collection of data gathered key information about the geological, hydraulic and hydrochemical the Guarani Aquifer, taking account of its occurrence and the different scales of study (Cone Sul, São Paulo State and Ribeirão Preto region).

Palavras-Chave – Hidrogeoquímico – Aquífero Guarani - Ribeirão Preto

¹Pós-Doutorando (CNPq), EESC/USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos (SP), heraldocampos@yahoo.com

²Mestrando (CNPq), EESC/USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos (SP), rafael_chaves@ymail.com

³Professor Associado, EESC/USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos (SP), ew@sc.usp.br

1 - INTRODUÇÃO

Regionalmente, o Aquífero Guarani está intercalado entre as camadas permianas do Grupo Passa Dois e os derrames basálticos cretácicos da Formação Serra Geral. É constituído de arenitos eólicos e fluviais bem selecionados, com espessura média de 300 metros, atingindo profundidades de até 1.500 m. Trata-se de um aquífero livre apenas nas bordas da Bacia do Paraná e confinado em 90% de sua extensão. Graças as suas excelentes características hidrogeológicas constitui-se na principal reserva de água subterrânea da maior província hidrogeológica brasileira, a Paraná.

O Brasil, por ter 70% da área do Aquífero Guarani em seu território, vem acumulando ao longo desses últimos 30 anos muita informação seja pelos levantamentos regionais realizados, como por exemplo, no Estado de São Paulo, ou mesmo pelas pesquisas acadêmicas desenvolvidas pelas universidades.

O município de Ribeirão Preto, localizado na porção Nordeste do Estado de São Paulo, é 100% abastecido pelas águas do Aquífero Guarani. Nesta região vem ocorrendo o uso intensivo de água subterrânea e uma numerosa quantidade de poços em atividade (cerca de 400 poços) já evidenciam problemas de interferência entre eles. Ao mesmo tempo, percebe-se o aumento do risco de contaminação das águas subterrâneas por incremento de fontes instaladas sobre as partes aflorantes do aquífero (principalmente as relacionadas ao uso de agrotóxicos na agricultura), que são de alta vulnerabilidade.

Neste trabalho será apresentada a caracterização hidrogeoquímica do Aquífero Guarani, bem como a sua representação cartográfica no âmbito do território ribeirão-pretano, apresentada em um mapa principal, complementado por mapas laterais e perfis, preenchendo uma lacuna existente na área do município de Ribeirão Preto no tocante à sistematização de dados de qualidade química de águas subterrâneas.

2 - REVISÃO DA LITERATURA CARTOGRÁFICA DISPONÍVEL

Alguns exemplos de mapas hidrogeológicos especiais elaborados nas escalas de 1:100.000 a 1:50.000, mais compatíveis com o objetivo deste presente estudo, são apresentados a seguir.

A hidrogeologia da região de Hampshire e da Ilha de Wight, na Inglaterra, é mostrada pelo “Hydrogeological Map of Rampshire and the Isle of Wight” (England, 1979). Referências sucintas sobre a qualidade química das águas desta região são representadas por diagramas colunares em mapa lateral.

Os “Mapas de Vulnerabilidade à Poluição dos Lençóis Aquíferos do Município de Campinas (Estado de São Paulo)” de Taltasse (1972) foram elaborados com a finalidade de servirem de base sobre problemas de penetração e propagação de poluidores nos terrenos da região do município de Campinas.

No “Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica” (Costa Rica, 1985) as análises químicas mais significativas são representadas por letras no mapa hidrogeológico e listadas em uma tabela lateral.

Albinet e Margat (1970) fazem uma proposta de legenda para a cartografia e classificação dos aquíferos franceses no tocante à vulnerabilidade, em três escalas. O trabalho faz uma abordagem metodológica para as três escalas, mostrando em riqueza de detalhes na escala 1:50.000, para as indicações gráficas das fontes poluidoras dos aquíferos (esgotos, cemitérios, usinas siderúrgicas, etc).

No mapa hidrogeológico “Istres-Eyguières, Plaine de la Crau, Carte Hydrogéologique de la France” (France, 1969) são mostradas isolinhas, com intervalos variáveis do conteúdo de cloretos em mg/l e zonas hachuradas em roxo onde há interface de águas doces/salgadas.

O “Hydrogeological Map of Yu-Gawa and Agatsuma-Gawa Basins, Nagano and Gumma Prefectures” (Japan, 1974), apresenta no mapa hidrogeológico indicações pontuais de poços e fontes com águas minerais quentes.

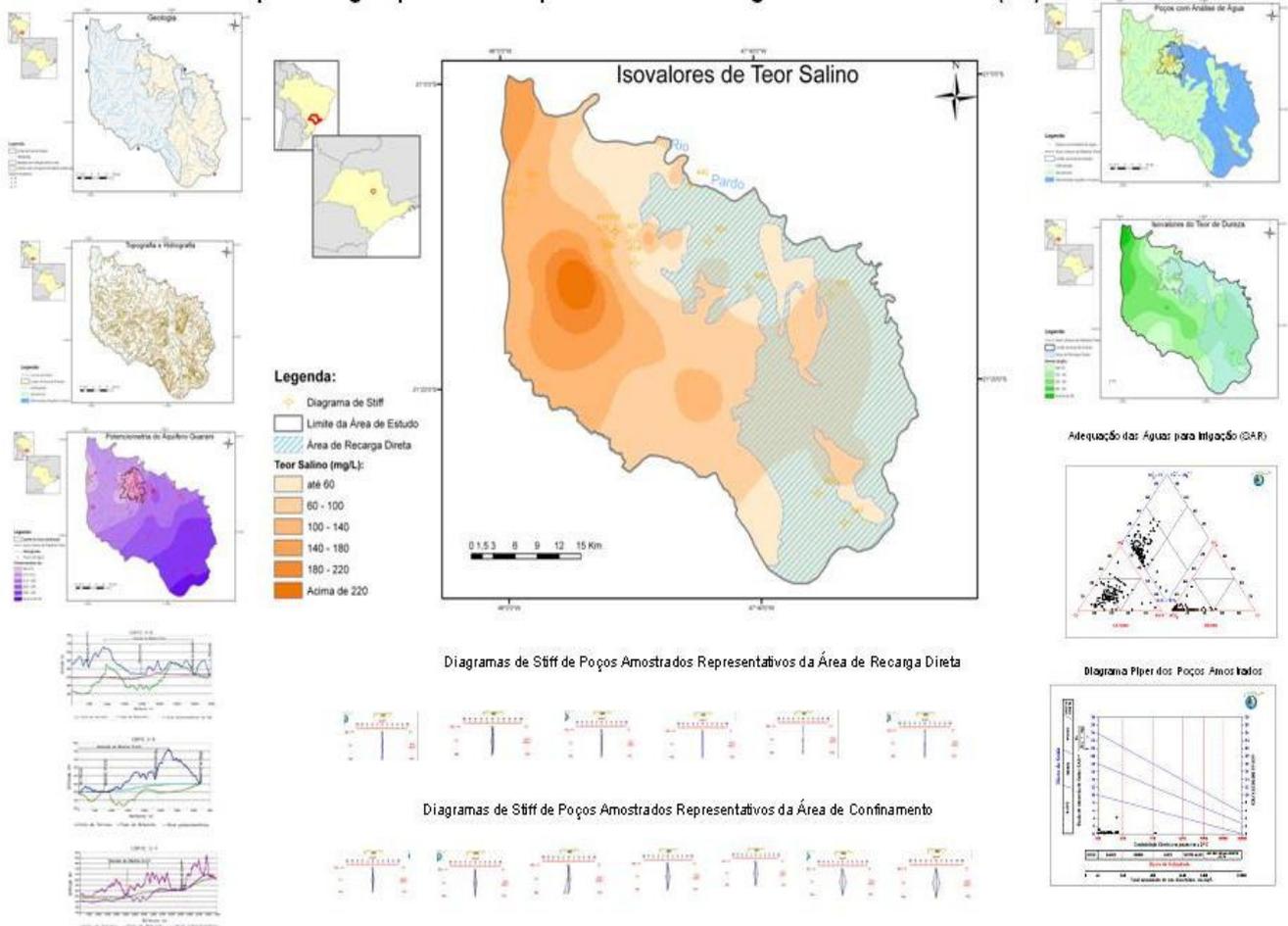
Para facilitar a elaboração de mapas hidrogeológicos, de forma normalizada e internacional, a UNESCO (1970) editou a “International Legend for Hydrogeological Maps”. No texto do documento técnico produzido, a hidroquímica é contemplada com uma seção que descreve com detalhes os símbolos gráficos e cores que devem ser ou já foram reproduzidos em mapas hidrogeológicos em alguns países.

3 - CARTOGRAFIA HIDROGEOQUÍMICA PARA A ÁREA DE ESTUDO

O “Mapa Hidrogeoquímico do Aquífero Guarani - Região de Ribeirão Preto (SP)” é apresentado em *fac-símile* na Figura 1. O mapa original se encontra no formato papel, a cores, e tem a dimensão de 85 x 85 cm, seguindo, de maneira geral, as normas de uma cartografia hidrogeológica internacional.

Para a elaboração desse mapa inicialmente foi feita uma pesquisa nos mapas (*layers*) gerados para o trabalho de Cavicchia (2007) que se encontram em arquivos no ambiente ArcGis (ArcMap). Assim, foi possível a geração de três mapas laterais que foram adaptados e simplificados: “Geologia” (Figura 2), “Topografia e Hidrografia” e “Potenciometria do Aquífero Guarani”. A leitura destes quatro mapas temáticos mostra ao leitor as características físicas relacionadas ao meio aquífero. Nessa mesma linha, as seções hidrogeológicas A-B, C-D e E-F, são apresentados, mostrando em subsuperfície as camadas que compõem o Aquífero Guarani e suas respectivas espessuras, além do posicionamento do nível d’água (superfície potenciométrica) em relação à superfície do terreno.

Mapa Hidrogeoquímico do Aquífero Guarani - Região de Ribeirão Preto (SP)*



Diagramas de Stiff de Poços Amostrados Representativos da Área de Recarga Direta

Diagramas de Stiff de Poços Amostrados Representativos da Área de Confinamento

Não a responsabilizar as fontes da informação

1. Mapa de "Geologia" e de "Topografia e Hidrografia" elaborados a partir da interpretação do layer de satélites em ArcGIS (CAVICCHIA, 2007), adaptados e simplificados;
2. Mapa de "Assentamento do Aquífero Guarani" elaborado seguindo dados de CAVICCHIA (2007) disponibilizados em ArcGIS e interpretados seguindo o método de ligação;
3. Seções hidrogeológicas A-B, C-D e E-F compiladas de CAVICCHIA (2007);
4. Diagramas de Piper, de Stiff e de adequação das águas para irrigação (SAR) dos poços amostrados (DAE, 1974) elaborados a partir do programa Qualigraf (MOSES, 2009);
5. Mapa de "Isovalores de Teor Salino" e de "Isovalores de Teor de Dureza" elaborados a partir do layer do Siquem (DAE, 1974) e interpretados seguindo o método de ligação;
6. O trabalho em português, Análise química com a colaboração de Néstor Ricardo Chaves Guarani, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
7. Referências: CAVICCHIA, M. E. 2007. Desenvolvimento de modelos matemáticos para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos na área do Projeto Pivô Ribeirão Preto. 180 p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; DAE (Departamento de Água e Energia Elétrica). 1974. Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 6 (Ribeirão Preto), São Paulo. GEOPROCESSAMENTO & TEMA, 2v., MOSES, G. 2009. Qualigraf. <http://www.fazcoms.br/DEHD/qualigraf/index.htm>

Projeto: Caracterização e Cartografia Hidrogeológica do Aquífero Guarani no Município de Ribeirão Preto (SP)
Mapa Hidrogeoquímico do Aquífero Guarani - Região de Ribeirão Preto (SP)
Núcleo de Estudos em Recursos Hídricos - Ribeirão Preto (SP)
Universidade de São Paulo (USP) - São Carlos
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Supervisor: Prof. Dr. Nelson V. de Lencastre
*Bateria do CNPq, Pós-Doutorado Sênior (POS), Processo: 15/0140/2009-6

Figura 1 Fac-símile do Mapa Hidrogeoquímico do Aquífero Guarani Região de Ribeirão Preto (SP)

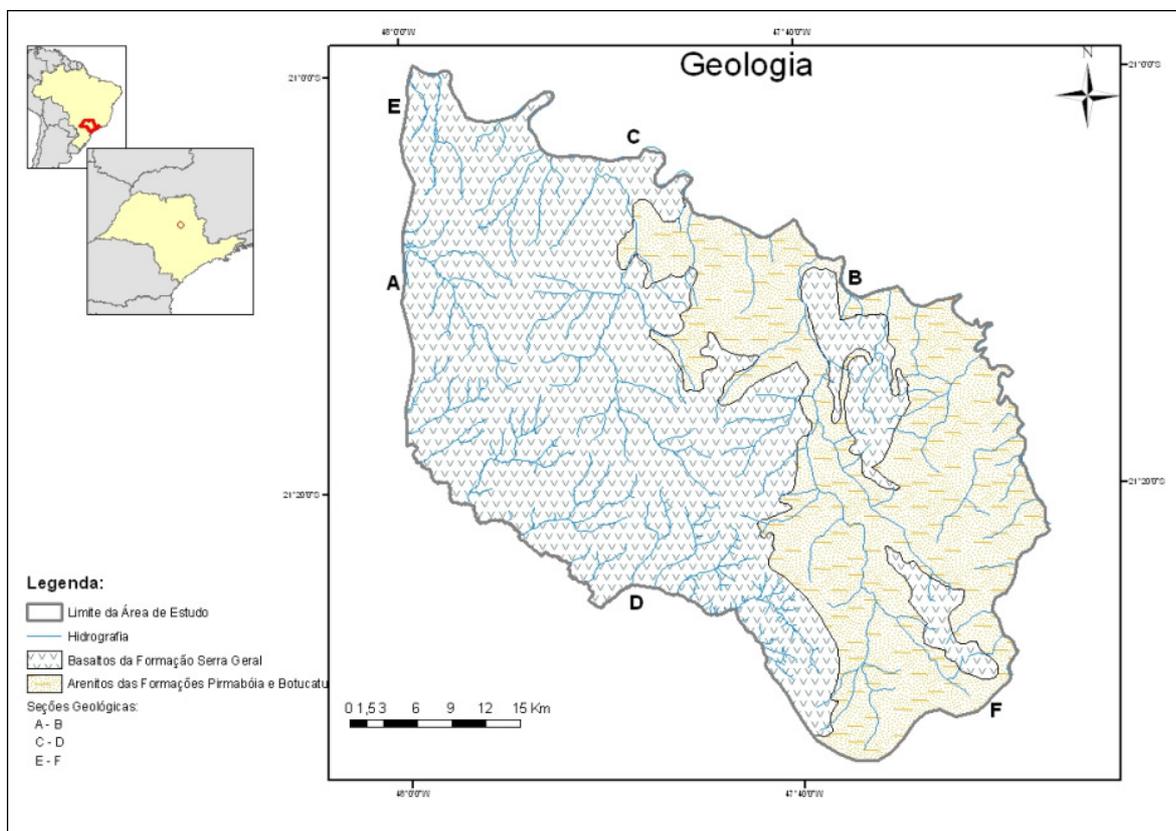


Figura 2 Geologia e localização das seções hidrogeológicas

No que diz respeito à hidrogeoquímica do Aquífero Guarani para a área de estudo, foram confeccionados os Diagramas de *Piper*, de *Stiff* e de adequação das águas subterrâneas (SAR) através do programa Qualigraf (Möbus, 2009).

Esses diagramas, apresentados lateralmente e na base do mapa principal, reúnem os resultados de 123 análises químicas do DAEE (1974), processadas através do “Sistema de Informações Químicas de Águas Subterrâneas-SIQUIM” (Campos, 1993; Souza e Campos, 1993). Pelo baixo teor salino das águas subterrâneas, optou-se por apresentar os diagramas de *Stiff* de alguns poços amostrados mais significativos das áreas de recarga direta e de confinamento do Aquífero Guarani.

Com base nessa mesma fonte de informação, foram gerados os mapas laterais de distribuição dos “Poços com Análise de Água” e de “Isovalores do Teor de Dureza” em mg/l. O mapa de “Isovalores de Teor Salino”, em mg/l (RS 180°C), é o mapa principal e se encontra localizado no centro da folha. Esses três mapas foram elaborados no ambiente ArcGis e as isolinhas geradas a partir do método da *krigagem*.

Por fim, na base da folha do mapa, é apresentada uma nota explicativa e as fontes de informação utilizadas até o presente momento da cartografia.

4 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES SALINOS E DOS ÍONS MAIORES

Em geral, as águas de circulação regional, como as que percolam o Aquífero Guarani, tendem a ir aumentando sua mineralização até ir saturando os diferentes íons, conforme já observaram alguns autores.

Segundo Custodio e Llamas (1976), entre os ânions primeiro satura o HCO_3^- , incluído desde a infiltração e mais tarde o íon SO_4^{2-} , o íon Cl^- não chega a saturar normalmente. Entre os cátions, primeiro satura o Ca^{2+} , mais dificilmente o Mg^{2+} ; o íon Na^+ não chega a saturar normalmente.

Por causa destes processos a água subterrânea pode ter composição diferente da rocha pela qual circula à medida que se afasta do lugar da infiltração. Rochas com conteúdos muito baixos de Cl^- e ricas em outros sais solúveis, podem dar origem a águas predominantemente cloretadas, se houve tempo transcorrido o suficiente para ir enriquecendo em pequenas quantidades durante o seu fluxo. Assim, uma evolução normal de uma água de circulação regional é aquela que sucessivamente vão dominando os seguintes íons: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ e $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$

Neste trabalho inicialmente escolheu-se esses cátions e aniôns maiores presentes nas águas do Aquífero Guarani e o conteúdo do teor salino, expressos em mg/l, para a observação dessas mudanças e de evolução hidrogeoquímica.

O teor salino das águas desses aquíferos está representado na Figura 3. Esta figura mostra que os teores salinos mais baixos, até 80 mg/l, correspondem aos poços que captam água do Aquífero Guarani localizados em áreas de afloramento, não confinadas, mais a Leste da área de estudo (quadrantes nordeste e sudeste). Muito embora existam poucos dados distribuídos, os valores de teor salino tendem a aumentar (acima de 140 m/l) para o Oeste, em área de maior espessamento de rochas basálticas e de início de confinamento do Aquífero Guarani. A temperatura dessas águas acompanha essa tendência de incremento podendo atingir valores de 28°C.

Com relação ânions maiores analisados, observa-se que os teores de bicarbonato nas águas subterrâneas na área de estudo são em geral muito baixos, com os valores mais altos atingindo cerca de 80 mg/l ao Norte e a Oeste. Os valores de sulfatos detectados são muito baixo (a maioria dos valores inferiores a 1.6 mg/l) e o pequeno número de pontos analisados (20) não possibilita uma boa regionalização desse parâmetro para efeito de interpretação. Apesar dos conteúdos em cloretos serem também baixos, inferiores muitas vezes a 2 mg/l, parece haver um tendência de enriquecimento desse ânion para o Oeste da área e para a parte central do quadrante Nordeste, na região do município de Ribeirão Preto.

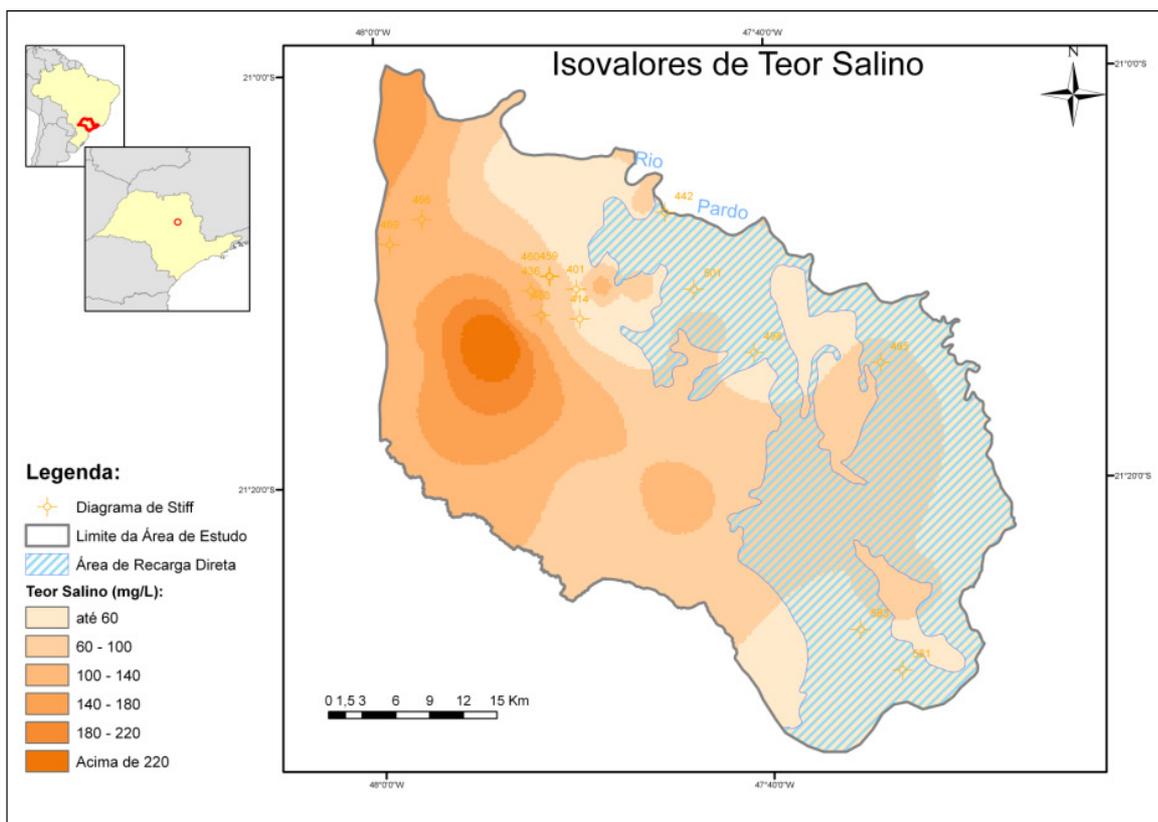


Figura 3 Mapa de isovalores de teor salino em mg/l (RS 180°C) e o poço amostrado

Para o comportamento dos cátions, observa-se que na maior arte da área os valores de cálcio estão na faixa de 4 a 8 mg/l relacionados provavelmente aos setores de exposição em superfície das rochas da Formação Botucatu e de rochas basálticas da Formação Serra Geral, com pouca espessura, situados ao Leste. Um incremento de cálcio é percebido no sentido Nordeste da área, onde os teores passam de 20 mg/l. O comportamento do íon magnésio parece ser diferente em área. A sua distribuição atinge valores superiores a 8 mg/l, com desenho concêntrico, em área nitidamente de afloramento de basaltos, o que sugere a interferência desse tipo de rocha quando da captação das águas dos poços para justificar o aparecimento desse íon. A distribuição do íon sódio em área apresenta valores muito baixos, predominado os teores em torno dos 2 mg/l, mas com uma suave tendência de aumento para Oeste e Nordeste da área de estudo.

No que se refere ao grau de acidez das águas subterrâneas dos reservatórios estudados os valores de pH evidenciam águas levemente ácidas na porção Leste da área estudada, passando a neutras na parte mais central até atingir um caráter de águas ligeiramente básicas para o Oeste.

Em termos de evolução hidrogeoquímica, os dados até aqui analisados permitem dizer que as zonas próximas da área de recarga (porção Leste da área estudada) apresentam as águas

subterrâneas com salinidades e temperaturas mais baixas, pH ligeiramente ácido, com um ligeiro aumento para Oeste, coincidindo com o sentido de fluxo.

As facies hidroquímicas, representadas pela variação dos teores principalmente de bicarbonato, cloreto, cálcio e sódio, mostram um enriquecimento destes íons com o aumento da profundidade e captação dos poços e, por consequência, com os setores mais confinados do Aquífero Guarani para Oeste da área.

5 - ADEQUAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A variação dos teores de nitratos nas águas subterrâneas pode não ter relação direta com as litologias que compõem o Aquífero Guarani. Quando os teores excessivos de nitrato são eventualmente encontrados muitas vezes é de forma pontual. Teores excessivos de nitratos podem ser considerados como indicativos de contaminação e são uma advertência de que a água deva ser analisada mais detalhadamente para se verificar a presença de possíveis organismos patogênicos.

As águas de poços onde os teores de nitrato excedem o limite recomendado são, via de regra, de poços contaminados pela atividade antrópica, relacionados à proximidade de fossas negras ou mesmo de estábulos na zona rural, além da possibilidade de existir contaminação por meio de fertilizantes agrícolas. Esses indícios podem indicar a precariedade construtiva dos poços como ausência de tubo de boca com cimentação e tampa protetora, falta de laje de proteção e de perímetro de proteção sanitária.

Os teores detectados de nitratos nas águas subterrâneas, com base nos dados do SIQUIM (DAEE, 1974), revelam que esse parâmetro está dentro do valor máximo permissível (10 mg/l), segundo a Portaria ANVISA nº 518, de 25 de Março de 2004.

À parte da discussão sobre a origem do fluoreto nas águas subterrâneas do Aquífero Guarani (condicionamento estrutural e/ou composição litológica do reservatório), a distribuição dos teores de fluoreto em área mostra que esses teores são muito baixos, para um valor máximo permissível de 1.5 mg/l.

Os requisitos de qualidade das águas subterrâneas utilizadas em diferentes processos industriais são muito variados. Há uma variedade de especificações exigidas e critérios estabelecida para cada tipo de indústria e, muitas vezes, pequena faixa de tolerância.

Por exemplo, os teores de dureza podem estar na faixa entre 50 a 135 mg/l para a indústria dos curtumes, até 20 mg/l para a indústria têxtil e entre 25 e 75 mg/l para a indústria de enlatamento de vegetais (Logan, 1965). A distribuição dos teores de dureza na área de estudo (Figura 4) mostra que as águas subterrâneas na área, com relação a esse parâmetro, necessitam de alguma correção dependendo do tipo de indústria.

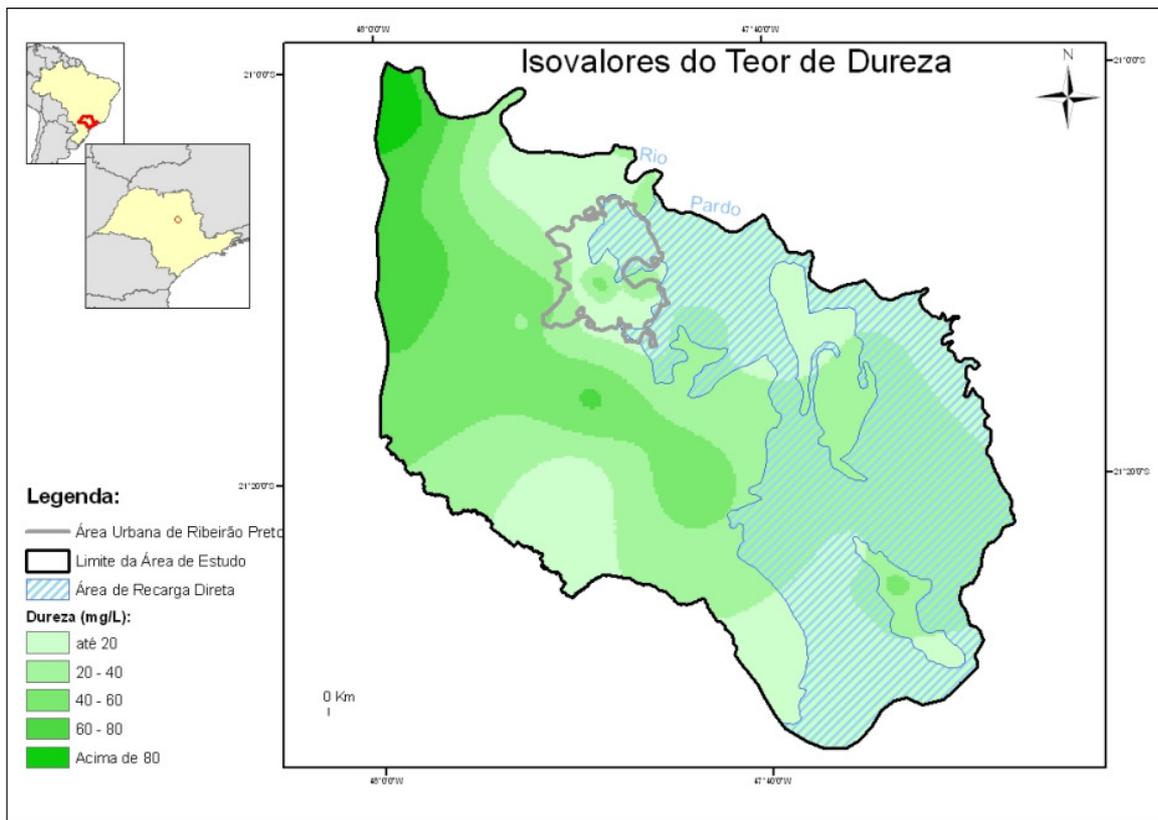


Figura 4 Mapa de isovalores do teor de dureza em mg/l

Praticamente todas as águas subterrâneas contém um pouco de ferro e sua química no meio aquífero é complexa. A água pode adquirir ferro pelo contato com o revestimento do poço, conjunto moto-bomba e tubulações.

Quanto mais corrosiva é a água mais dissolve ferro das superfícies com as quais estabelece contato. O teor excessivo em ferro passa a ser considerável quando determinadas quantidades podem afetar algumas finalidades industriais. Segundo Logan (1965) algumas indústrias precisam ter esses teores abaixo de 0.5 mg/l e suas águas necessitariam de correção, como na maior parte da área.

Para a irrigação as principais restrições são as águas com média e alta salinidade e quantidade de sódio muito elevada o que não é observado na área objeto de estudo, com base nesses mesmos dados.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados até aqui pesquisados permitiu delinear na área de estudos o comportamento hidrogeoquímico das águas subterrâneas do Aquífero Guarani.

Até o presente momento foram utilizadas ferramentas comumente usadas na compreensão desse comportamento, principalmente as que geraram mapas de contorno pelo método da *krigagem*,

via o ambiente ArcGis, que servirão de suporte para as ações futuras propostas neste projeto no tema relativo a cartografia.

O presente trabalho representa, também, um esforço de sistematização do conhecimento hidrogeoquímico, de certa forma disperso em vários trabalhos de diferentes épocas, e que pode ser sintetizado num mapa, conforme o plano de trabalho proposto.

7 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) dado ao projeto de pesquisa, através da concessão das bolsas de mestrado e de pós-doutorado.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albinet, M. e Margat, J. 1970. Cartographie de la vulnérabilité à pollution des nappes d'eau souterraines. Paris, Bul. BRGM, sect. III, (4):13—22.

Campos, H.C.N.S. 1993. Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, 177p., 1 mapa na escala 1:1.000.000. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Cavicchia, M.E. 2007. Desenvolvimento de modelo numérico para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos na área do Projeto Piloto Ribeirão Preto. 169 p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Costa Rica. 1985. Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica, escala 1:50.000. Servicio Nacional de Águas Subterráneas, Riego y Avenamiento. British Geological Survey. E.S.R. Limited, West Buxton Survey, England.

Custodio, E.G. e Llamas, M.R. 1976. Hidrologia Subterránea. Barcelona, Espanha. Omega, 2v.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 1974. Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 6 (Ribeirão Preto). São Paulo, GEOPESQUISADORA & TAHAL, 2v.

England. 1979. Hydrogeological map of Hampshire and the Isle of Wight, scale 1:100.000. Institute of Geological Sciences and Southern Water Authority. London, England.

France. 1969. Istres-Eyguières, Plaine de la Crau, Carte hydrogéologique de la France (échelle de las feuilles 1:50.000). Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Service Géologique Regional Picardie, Normandie.

Japan. 1974. Hydrogeological map of Yu-Gawa and Agatsuma-Gawa Basins, Nagano and Gumma Prefectures, scale 1:50.000. Geological Survey of Japan. Hydrogeological maps of Japan 23, Printed by Ken-Ichi Tanaka.

Logan, J. 1965. Interpretação de análises químicas de água. Recife, U.S. Agency for International Development. 75p.

Möbus, G. 2009. Qualigraf. <http://www.funceme.br/DEHID/qualigraf/index.htm>

Souza, W.V.V. e Campos, H.C.N.S. 1993. Sistema de informações químicas de águas subterrâneas-SIQUIM. In: V Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. SBG-Núcleo Paraná, Curitiba.

Taltasse, P.R. 1972. Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (Estado de São Paulo). IGUSP. Publicação avulsa nº 1, 12p.; 4 mapas.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 1970. International Legend for hydrogeological maps. UNESCO/IASH/IAH/Institute of Geological Sciences. England. 101p.