

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

JÚLIA CRISTINA BONANI FARACINI

CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO SERRA GERAL NA
PORÇÃO CENTRO NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Graduação apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

Rio Claro - SP

2013

JULIA CRISTINA BONANI FARACINI

CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO SERRA GERAL NA
PORÇÃO CENTRO NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Graduação apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

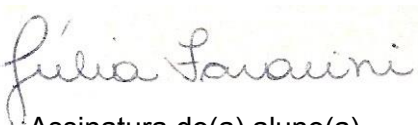
Comissão Examinadora

Prof. Dr. Didier Gastmans (orientador)

Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Msc. Márcia Regina Stradioto

Rio Claro, 14 de janeiro de 2014.



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

551.49 Faracini, Julia
F219c Classificação hidroquímica das águas subterrâneas do
Aquífero Serra Geral na porção centro norte do Estado de São
Paulo / Julia Faracini. - Rio Claro, 2013
50 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Geografia) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas
Orientador: Didier Gastmans

1. Águas subterrâneas. 2. Hidroquímica. 3. Hidrogeologia.
4. Geologia. 5. Poços tubulares profundos. I. Título.

Dedico este trabalho a Pedro Couto Carneiro,
In memoriam

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a meus pais, que tanto amo, por todo o apoio e confiança que depositaram em mim e em minhas escolhas durante estes anos de graduação, bem como em toda minha vida.

Sou grata ao meu orientador, Prof. Dr. Didier Gastmans, pela ajuda, paciência e amizade durante todos estes meses e principalmente pela confiança depositada em meu trabalho.

Agradeço a todos os funcionários, professores e pesquisadores do CEA pela disponibilidade dos materiais e equipamentos.

Ao meu irmão Thiago por sempre estar ao meu lado desde os primeiros anos de minha vida.

Ao Guilherme que me apoiou nos momentos mais difíceis do final da minha jornada da graduação.

Agradeço a FAPESP pela concessão do auxílio financeiro (Processo FAPESP 2012/00241-5), que possibilitou a realização da pesquisa.

Agradeço aos técnicos da SABESP e dos departamentos de Água de Jaboticabal, Bebedouro, Orlândia, Américo Brasiliense e Águas de Guará, pela colaboração durante as etapas de coleta das amostras.

Todas estas pessoas e instituições contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho, e sem a qual, a realização do mesmo não teria sido possível.

*"The illiterate of the 21st century will not to be those who cannot read or write,
but those who cannot learn, unlearn and relearn"*

Alvin Toffler

SUMÁRIO

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
ÍNDICE DE TABELAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E AQUÍFEROS.....	3
4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DOS BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL	6
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	9
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	33
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E AQUÍFEROS.....	3
4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DOS BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL	6
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	9
5.1 Aspectos Hidrogeológicos: Os Aquíferos da Área: Aquífero Serra Geral e Sistema Aquífero Guarani.....	11
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
6.1. Pesquisa bibliográfica e levantamento de dados.....	13
6.2. Amostragem e Análise de Água.....	14
6.3. Tratamento dos Dados.....	18
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
7.1. Aspectos Hidrodinâmicos do Aquífero Serra Geral.....	25
7.2. Aspectos Hidroquímicos do Aquífero Serra Geral.....	26
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	33
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha	4
Figura 2. Tipos de aquífero em função de suas características hidráulicas	5
Figura 3. Morfologia dos derrames basálticos e sua implicação hidrogeológica.....	8
Figura 4. Mapa de localização das UGRHIs da área de estudo, mostrando as áreas de afloramentos dos basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo	10
Figura 5. Equipamentos transportados ao campo.....	16
Figura 6. Procedimento de coleta de amostra	16
Figura 7. Medida da condutividade elétrica em campo	17
Figura 8. Esquema de Construção do Diagrama de Stiff.....	20
Figura 9. Esquema de Construção do Diagrama de Piper.....	21
Figura 10. Mapa de localização dos poços amostrados.....	22
Figura 11. Mapa potenciométrico simplificado do Aquífero Serra Geral na área de estudo.	26
Figura 12. Gráfico de correlação entre a concentração de bicarbonato e a condutividade elétrica nas águas do ASG.....	28
Figura 13. Diagrama de Piper. As amostras do ASG são indicadas com um círculo, e as do SAG com um triângulo.....	30
Figura 14. Mapa de distribuição das fácies hidroquímicas – Diagramas de Stiff.....	31

INDICE DE TABELAS

Tabela 1. Principais Métodos Empregados para a Análise de Dados Hidroquímicos.....	18
Tabela 2. Dados dos poços amostrados.....	23
Tabela 3. Dados Hidroquímicos.....	24
Tabela 4. Estatística básica dos parâmetros físico químicos.....	27

RESUMO

O aumento das demandas por água para atender as necessidades do consumo humano, fez com que a água subterrânea seja cada vez mais importante no balanço hídrico em inúmeras partes do mundo, já que quando comparados com a captação de águas superficiais, a exploração de aquíferos possuem diversas vantagens, como a qualidade de suas águas e o custo econômico da extração. Nesse sentido, os basaltos da Formação Serra Geral constituem importante aquífero em sua área de ocorrência. Na região centro norte do estado de São Paulo, as águas subterrâneas provenientes do Aquífero Serra Geral (ASG) são responsáveis pelo abastecimento de inúmeras cidades assentadas sobre essa unidade. Com o objetivo de se conhecer o quimismo, e se obter a classificação hidroquímica de suas águas, foram realizadas campanhas de amostragem nas quais foram coletadas 25 amostras de água subterrânea, sendo 22 em poços perfurados no Aquífero Serra Geral e 3 no Sistema Aquífero Guarani. A avaliação desses dados possibilitou a classificação hidroquímica das águas subterrâneas do ASG nessa região do estado de São Paulo, com a utilização do diagrama de Piper e Stiff. As águas subterrâneas podem ser classificadas em três grupos hidroquímicos principais: bicarbonatadas cálcico-magnesianas; bicarbonatadas cálcico-sódicas e bicarbonatadas sódicas, enquanto uma amostra é classificada como bicarbonatada-sulfatada sódica. É observada uma distribuição espacial dessas diferentes classes, concordantes com as principais direções de fluxo das águas subterrâneas.

Palavras Chave: Águas Subterrâneas, Aquífero Serra Geral e Hidroquímica

ABSTRACT

Increasing demands for water to supply human consumptions becomes groundwater an important source in water budget in many parts of the world, since in comparison with surface water exploitation; groundwater presents several advantages, such as their water quality and economic cost for extraction and treatment. In this sense basalts of Serra Geral Formation constitute an important aquifer in their occurrence area. In the north central region of São Paulo state groundwater from Serra Geral Aquifer (SGA) are responsible for water supply in numerous cities settled over this unit. In order to improve the knowledge about the hydrogeochemical process, and get the chemical classification of their groundwater, 25 groundwater were sampling, 22 of which were collected in wells drilled in the SGA and 3 were collected in wells drilled on the Guarani Aquifer System. These data allowed the hydrochemistry classification of groundwater from ASG using Piper and Stiff diagrams. Groundwater can be classified into three main hydrochemical groups: Ca-Mg-HCO₃ type; Ca-Na-HCO₃ type and Na- HCO₃ type. Only one sample were classified as Na- HCO₃-SO₄ type. Hydrochemical facies spatial distribution is consistent with the main groundwater flow directions.

Keywords: Groundwater, Serra Geral Aquifer and hydrochemical

1. INTRODUÇÃO

O consumo de água potável no planeta aumenta continuamente em ritmo muitas vezes superior ao crescimento populacional, porém, grande parte das pessoas vive em áreas do mundo onde a escassez de água de boa qualidade é apontada como um fator inibidor do crescimento econômico, capaz de propiciar o bem estar social das populações locais. Atualmente é praticamente impossível manter o fornecimento de água doce de qualidade, seja para o abastecimento humano, seja para a indústria e agricultura, se a água subterrânea não for aproveitada.

Os reservatórios subterrâneos são considerados como as fontes mais seguras entre todas as fontes de água potável existentes na Terra, em função da proteção propiciada pelas coberturas de rochas, representando em muitos locais do globo, a maior parte da água potável utilizada no abastecimento humano. Os volumes podem alcançar 80% de toda a água consumida na Europa e na Rússia, e nos casos de regiões desérticas serem ainda maior, como no Norte de África e no Oriente Médio.

Uma das dificuldades para a utilização das águas subterrâneas, está relacionada a renovação das reservas, que varia grandemente de local para local, e depende das condições de precipitação e características dos aquíferos. Geralmente, a água subterrânea apenas é renovada durante períodos chuvosos, que ocorrem em certos períodos do ano, nesse sentido o conhecimento dos tempos de residência e das características hidroquímicas das águas subterrâneas reveste-se de especial importância na gestão correta dos recursos.

Por apresentarem águas subterrâneas de excelente qualidade, com baixos conteúdos em sais dissolvidos, e ocuparem grandes extensões territoriais, os derrames de rochas basálticas constituem importantes aquíferos em diversas partes do globo, como os aquíferos associados aos basaltos da província de Deccan na Índia, do Columbia River Plateau na América do Norte, das Montanhas de Golan em Israel, dos Atheron Tablelands em North Queensland na Austrália, além dos

derrames associados à Formação Serra Geral na porção sudeste do continente sul americano e que constituem uma das mais importantes unidades aquíferas da Bacia do Paraná, o Aquífero Serra Geral (ASG).

Um dos principais problemas relacionados à gestão de recursos hídricos subterrâneos em aquíferos nos quais a água encontra-se armazenada em descontinuidades, reside na complexidade do fluxo, em função do controle exercido por camadas com características hidráulicas distintas, ou descontinuidades existentes nos derrames. Nesse sentido, a definição dos processos hidrogeoquímicos associados à interação água-rocha torna-se chave importante para o reconhecimento das condições de fluxo das águas nessas unidades, especialmente na porção centro norte do estado de São Paulo, onde inúmeras cidades são abastecidas por meio de água captada em poços perfurados no Aquífero Serra Geral.

O Aquífero Serra Geral é formado por rochas originadas a partir de derrames basálticos e rochas intrusivas da formação de mesmo nome. Estas rochas em sua maioria são geralmente impermeáveis, assim, a produção de água subterrânea está associada a descontinuidades presentes na rocha, como falhas e fraturas e na intercalação com rochas mais permeáveis.

Enquanto existe literatura abundante referente aos sistemas aquíferos Bauru (SAB) e Guarani (SAG) no estado de São Paulo, muito pouco conhecimento se produziu em relação ao conhecimento hidrogeológico e hidroquímico do ASG, especialmente quando se busca conhecer a relação existente entre o arcabouço geológico dos derrames da Formação Serra Geral e o quimismo das águas subterrâneas.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é apresentar a classificação hidroquímica das águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral na porção centro

norte do Estado de São Paulo, utilizando para tanto os diagramas de Piper e Stiff. Como objetivos secundários pode-se citar:

- ✓ - Treinamento de técnicas de coleta de amostras de água subterrânea em poços tubulares.
- ✓ - Realização da cartografia hidroquímica da área, por meio de mapa de distribuição das fácies hidroquímicas.
- ✓ - Avaliação, com base nas características químicas dessas águas, das principais reações químicas que controlam a sua composição.

3. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E AQUÍFEROS

A água é encontrada no planeta nos estados sólido, líquido e gasoso, distribuída por diferentes reservatórios, interconectados dentro do ciclo hidrológico. Um desses reservatórios encontra-se abaixo da superfície, invisível aos nossos olhos, mas representa a reserva hídrica mais utilizada no suprimento de boa parte das atividades humanas, além de representar uma fonte de alimentação aos cursos d'água em períodos de recessão.

Essa água que encontra-se abaixo da superfície circula entre espaços vazios das rochas e sedimentos, que podem ser representados pelos poros, no caso das rochas sedimentares e solos, ou fraturas e descontinuidades, no caso de rocha cristalinas e carbonáticas.

O armazenamento da água em subsuperfície se dá nos aquíferos, que são caracterizados como uma camada ou formação geológica suficientemente permeáveis capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos (IRITANI & EZAKI, 2008).

Existem formações geológicas que, apesar de saturadas e com grande quantidade de água armazenada, não são capazes de transmitir e fornecer água em

quantidade suficiente para a sua utilização, uma vez que são impermeáveis. A essas unidades é dado a denominação de aquíclude e aquífugos (KARMAN, 2003).

Em função da porosidade das rochas armazenadoras os aquíferos podem ser classificados em três tipos: granular, fissural e cárstico (Figura 1).

Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha

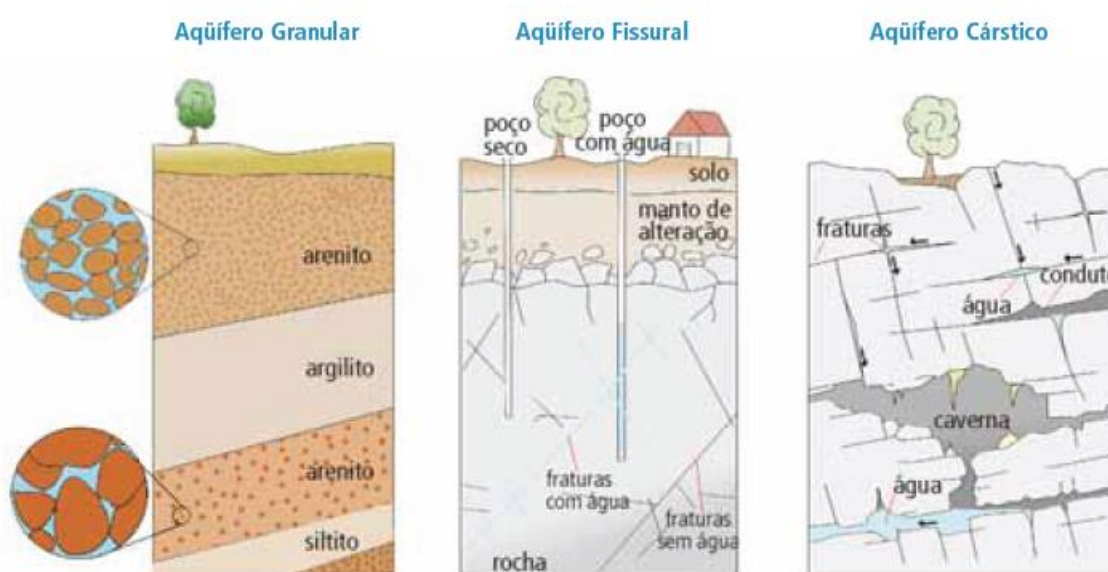


Figura 1. Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha (Fonte: Iritani & Ezaki, 2008)

O primeiro tipo é representado pelas rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, nos quais a água percola, e permanece temporariamente armazenada nos vazios existentes entre os grãos minerais que constituem o aquífero. Esse tipo de aquífero também é denominado de sedimentar.

Em rochas maciças e compactas, onde inexistem espaços vazios entre os minerais que as compõem, como os granitos e gnaisses, a porosidade é devida à presença de fraturas conectadas, constituindo aquíferos denominados fissural ou fraturados. Quanto maior a quantidade de fraturas na rocha, interligadas e preenchidas com água, maior será a potencialidade do aquífero em fornecer água. O Aquífero Serra Geral pode ser classificado nesse tipo de aquífero.

As rochas carbonáticas, como os calcários, sofrem lento processo de dissolução quando em contato com águas ácidas, ricas em dióxido de carbono (CO_2), que infiltram por meio das fraturas da rocha. Com a progressiva dissolução destes condutos, formam-se cavidades, que podem resultar em galerias com rios subterrâneos e cavernas. Neste aquífero, chamado cárstico, a água flui por condutos e canais.

Em função de suas características hidráulicas, os aquíferos podem ser classificados em livres ou confinados (Figura 2), dependendo da pressão a que estão submetidos. No caso do aquífero livre (ou freático), a zona saturada tem contato direto com a zona não saturada, ficando submetido à pressão atmosférica. Neste tipo, a água que infiltra no solo atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero.

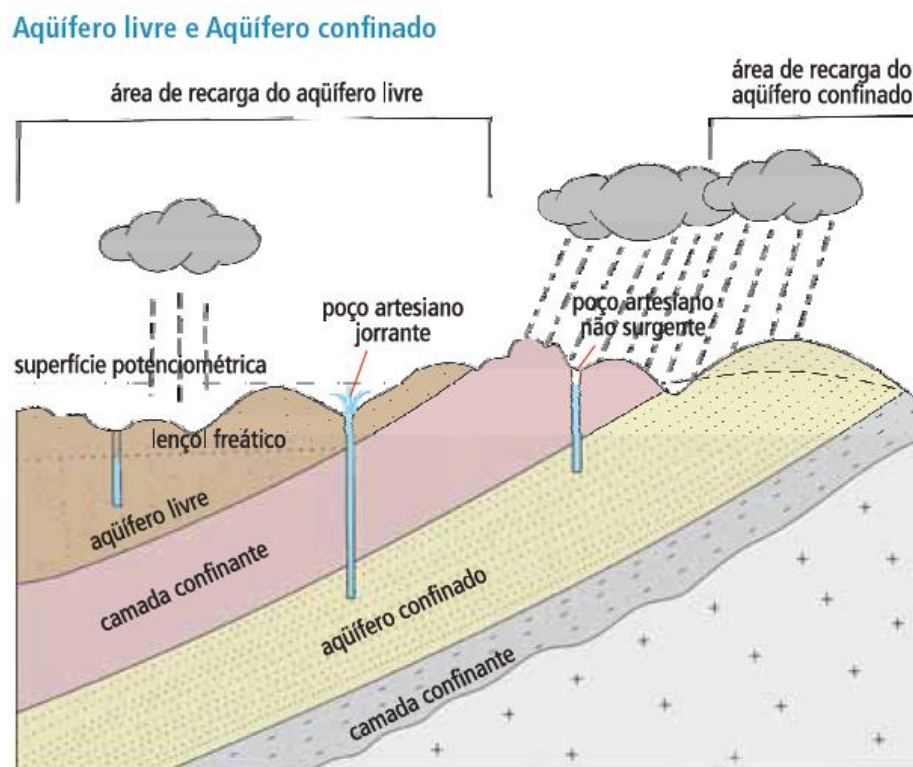


Figura 2. Tipos de aquífero em função de suas características hidráulicas (Fonte: Iritani & Ezaki, 2008)

Já o aquífero confinado é limitado no topo e na base por camadas de rocha de baixa permeabilidade (como argila, folhelho, rocha ígnea maciça etc.). Não há zona não saturada e, neste caso, o aquífero está submetido a uma pressão maior que a atmosférica, devido a uma camada confinante acima dele, que também está saturada de água. Assim, o nível da água tem pressão para atingir uma altura acima do topo do aquífero, mas é impedida pela camada confinante. Neste caso, não podemos chamar o nível da água de freático, pois está submetido a uma pressão maior que a atmosférica.

4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DOS BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

A Província Magmática do Paraná (PMP), na qual estão inseridos os basaltos da Formação Serra Geral, constitui uma das maiores manifestações ígneas vulcânicas de caráter básico em áreas continentais, representando, segundo Milani et al. (1994), importante contribuição para a geração de crosta continental durante o Mesozoico. A essa atividade magmática estão associados derrames e rochas intrusivas (sills e diques) de caráter básico, que se estendem sobre a área de ocorrência da Bacia Sedimentar do Paraná e adjacências.

Esse imenso volume de lavas basálticas, com espessuras médias de aproximadamente 650 m, e máximas de 2000 m, está disposto de maneira concordante sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu, sendo comum a ocorrência de intertraps, associados pausas no evento magmático e deslocamento das dunas desérticas sobre os derrames já instalados (ZALÁN et al., 1997; SCHERER, 2000).

Idades radiométricas obtidas pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ apontam idades entre 133 e 132 Ma para a atividade vulcânica que originou os derrames da Formação Serra Geral, e que a evolução da atividade vulcânica ocorreu de sul para norte em intervalo temporal relativamente curto, de aproximadamente 3 Ma (RENNE et al., 1992 e 1996; ERNESTO et al., 1999).

Diferenças petrográficas e geoquímicas permitem o reconhecimento de três principais litotipos associados à Formação Serra Geral: basaltos e andesitos associados ao conjunto de rochas básicas-intermediárias, que representam 97% de todo o volume magmático, riolitos e riodacitos do tipo Palmas (ATP) e os riodacitos e quartzos latitos do tipo Chapecó (ATC), que representam respectivamente 2,5 e 0,5% do volume magmático, e com área de ocorrência principalmente na região sul do Brasil (BELLINI et al., 1986; NARDY et al., 2002).

No estado de São Paulo ocorrem essencialmente os basaltos da unidade básica-intermediária, constituídos por plagioclásio (essencialmente labradorita), piroxênio (augita e piegonita), olivina, principalmente sob a forma de pseudomorfos, com porcentagem modal respectivamente de 25-50%, 20-40% e 4%. Como acessórios são reconhecidos magnetita e ilmenita em quantidade que variam de 4 a 10%, além de mesóstase (vítrea ou microgranular), que podem chegar a representar 40% do volume total nas rochas com textura intergranular (MACHADO et al., 2007). No limite entre cada derrame são reconhecidas zonas vesiculares, com espessuras variáveis, cujas vesículas são preenchidas por material secundário, formando amígdalas de quartzo, calcita, zeólitas, fluorita e comumente argilas de coloração esverdeada, provavelmente do grupo da celadonita (MACHADO et al., 2007).

A estruturação interna dos derrames basálticos possibilita a geração de um sistema de descontinuidades particulares, definidos por diversos autores como os principais responsáveis pelo condicionamento do fluxo das águas subterrâneas no interior de aquíferos basálticos (DOMENICO & SCHWARTZ, 1998; LASTORIA et al., 2006).

Rebouças & Fraga (1988) apresentam um modelo hidrogeológico genérico para os basaltos da Formação Serra Geral, subdividindo cada derrame de lavas que constitui o aquífero em duas unidades: uma superior, representada pelo produto da alteração intempérica dos basaltos, limitado na base por uma superfície de descontinuidade física, que representaria uma zona de alta permeabilidade, e uma unidade inferior, situada abaixo dessa descontinuidade, que apresenta como zona preferencial de circulação da água subterrânea, associada ao topo dos derrames, caracterizada pela ocorrência de estruturas vesiculares e intenso fraturamento

horizontal, com a circulação vertical ocorrendo nas diáclases existentes na porção central do derrame (Figura 3).

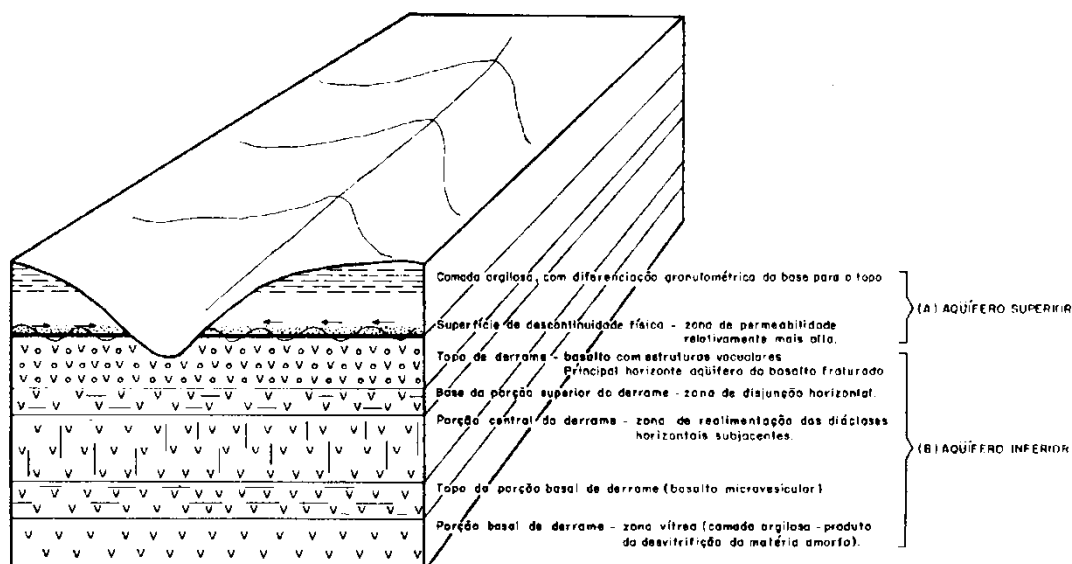


Figura 3. Morfologia dos derrames basálticos e sua implicação hidrogeológica (Modificado de Rebouças & Fraga, 1988).

As condições de fluxo nos basaltos na região de Ribeirão Preto, e a sua relação com a recarga da unidade aquífera imediatamente sotoposta, o Sistema Aquífero Guarani, foram estudados por Wahnfried (2010), que apontou a predominância de fluxos horizontais nas descontinuidades dos basaltos, e a inexistência de fluxo vertical através dos lineamentos geológicos identificados por meio de levantamentos aerofotogramétricos, que possibilitassem a recarga do SAG por água proveniente dos basaltos.

Quimicamente as águas subterrâneas do ASG no Estado de São Paulo geralmente apresentam baixas condutividades elétricas e, consequentemente, baixos conteúdos em sólidos totais dissolvidos, com amplo espectro de variação do pH, conferindo características desde ácidas a alcalinas às águas do aquífero. Em função de sua composição química as águas são geralmente classificadas como bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas (DAEE, 1974 e 1976, CAMPOS, 1993).

Na região noroeste do estado foram reconhecidas algumas anomalias hidroquímicas caracterizadas por valores de resíduo seco superiores a 200 mg/L, e que foram associadas, em função de sua localização, a regiões de ocorrência de fraturas ou falhas preenchidas por mineralização hidrotermal, ou ainda contaminação por águas oriundas de aquíferos mais profundos por fluxo ascendente (DAEE, 1976).

Ocorrências de concentrações de flúor nas águas do ASG, acima dos limites permitidos, foram observadas por Perroni et al. (1985) em águas com elevadas concentrações de sódio e em poços situados em uma faixa ao longo dos principais alinhamentos estruturais reconhecidos na Bacia do Paraná, o que levou os autores a aventarem um possível condicionamento estrutural para esse fenômeno.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região centro norte do estado de São Paulo, compreendendo parte das UGRHIs Pardo (4), Sapucaí/Grande (8), Mogi-Guaçu (9) e Baixo Pardo Grande (12), região de ocorrência dos basaltos da Formação Serra Geral (Figura 4).

Na área de estudo a Formação Serra Geral é caracterizada por rochas de composição basáltica originadas pela atividade magmática fissural junto a processos magmáticos subterrâneos, que constituem um meio hidrogeológico heterogêneo. O armazenamento de água subterrânea nestas rochas é relacionado ao seu potencial de fissuras e descontinuidades, tornando, dessa maneira, de grande importância o ASG (SINELLI, 1987).

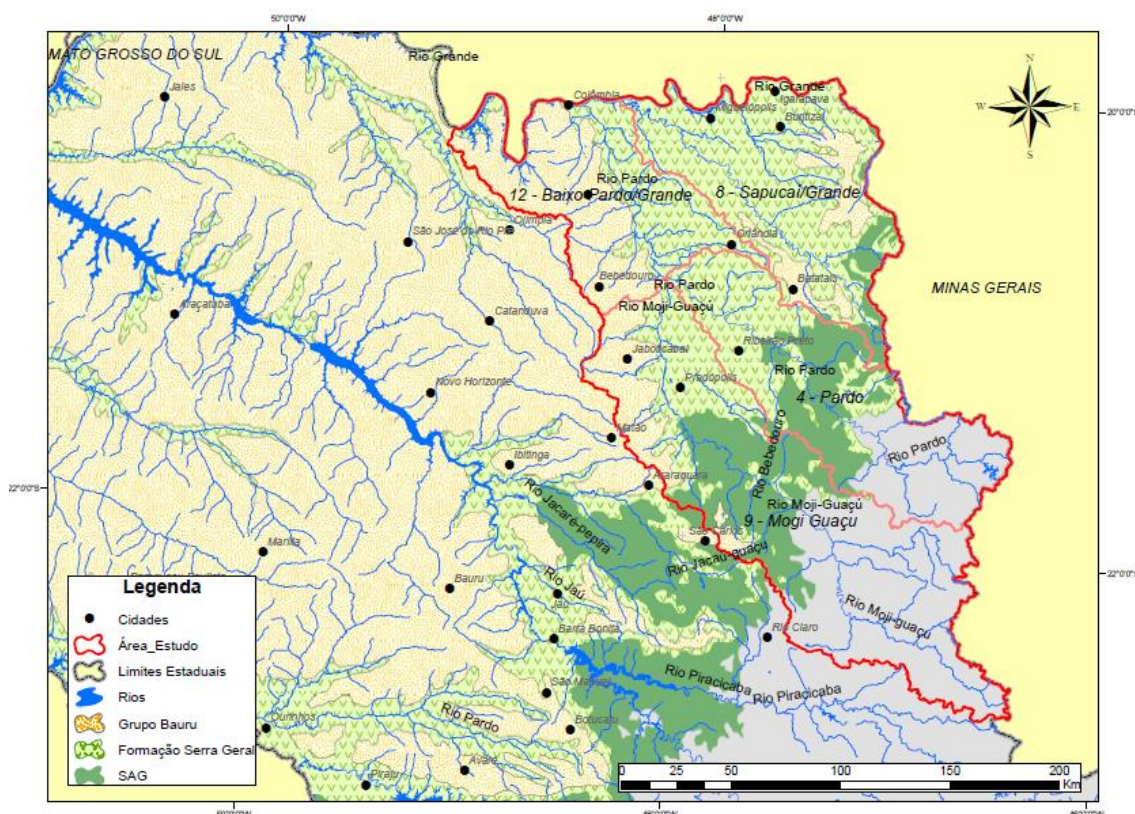


Figura 4. Mapa de localização das UGRHs da área de estudo, mostrando as áreas de afloramentos dos basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo.

A área de estudo apresenta três principais tipos climáticos de acordo com a classificação de Köppen, a saber: - tropical úmido com inverno seco (Aw), ocorre na porção leste da Bacia, quente úmido com estação seca (Cwa), compreende toda a porção oeste da Bacia, estendendo-se por uma faixa alongada no limite com a Bacia do Sapucaí-Mirim até Brodowski e também, temperado úmido com estação seca (Cwb), ocorrendo em porções restritas no extremo oeste da Bacia no seu limite com Minas Gerais, onde localizam-se os municípios de Caconde e Divinolândia.

Do ponto de vista geomorfológico a área estende-se por várias províncias Geomorfológicas caracterizadas pelo Planalto Atlântico, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental Paulista, segundo a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo proposta por Almeida (1964) e adotada no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT 1981).

Na Bacia do Rio Pardo, situada na região central da área de estudo, o relevo é essencialmente condicionado pelo entalhamento realizado pelo rio Pardo e por

seus afluentes. A feição dominante é a existência (Leste) de grandes testemunhos tabuliformes sobressaindo em meio a uma superfície levemente ondulada. Esses testemunhos se distribuem em forma de elevações isoladas ou em forma de plataformas interfluviais, amplas e contínuas. O relevo regional é definido pelas altitudes máximas de 970m, sudeste da bacia, e mínimas de 465m a noroeste. (SINELLI. 1987).

Na UGRHI, de acordo com o mapa de solos da região, escala 1:500.000 (IPT 1990), ocorrem cinco tipos de solos: Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada, Latossolo Vermelho-Escuro textura média e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, Areias Quartzosas, Podzólicos Vermelho-Amarelo e Podzólicos Vermelho-Escuro e Terra Bruna estruturada e solo Litólico e Cambissolo. Os tipos de solo estão diretamente relacionados ao relevo e ao substrato rochoso. A influência do relevo na formação do solo manifesta-se principalmente pela interação entre as suas formas e a dinâmica da água. Assim, em sistemas de colinas e planícies, há uma tendência à infiltração da água, que, ao entrar em contato com o substrato favorecerá o desenvolvimento de solos mais profundos (Latossolos), enquanto que em relevos de alta declividade, a ação do escoamento superficial sobrepõe-se à infiltração, levando à formação de solos rasos (Litólicos e Cambissolos).

5.1.Aspectos Hidrogeológicos do Aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani

Os basaltos e diabásios da Formação Serra Geral constituem um aquífero de extensão regional, porém com condições aquíferas restritas, definidas em função de descontinuidades (juntas, fraturas e falhas), e/ou pela presença de pacotes de arenitos inter-derrames.

Na região, os basaltos apresentam espessuras variáveis de 100 m a 600 m, sendo mais espessos no sentido oeste. As transmissividades extremamente baixas na direção vertical, aliadas à sua grande espessura, condicionam o basalto como a camada confinante do Sistema Aquífero Guarani subjacente.

Como o fluxo das águas subterrâneas ocorre essencialmente nas fraturas da rocha, as quais são usualmente descontínuas, os parâmetros hidráulicos do aquífero (transmissividade, permeabilidade, porosidade) não possuem o mesmo significado que nos aquíferos granulares, não servindo, portanto, para previsões de disponibilidade hídrica. Devem ser visualizados apenas como indicadores de características regionais. DAEE (1974) relatou na região administrativa 6 (Ribeirão Preto) variações de transmissividades entre 1 e 95 m²/d, resultando em média de 20 m²/d. Na maioria dos poços foram verificados coeficientes de armazenamento baixos, indicando confinamento das águas nas fraturas. Foram observados valores de porosidade efetiva entre 1% e 5% e vazões extremamente variáveis, entre 2,3 e 150 m³/h, com média de 34,6 m³/h. As profundidades variam entre 35 e 243 m e as vazões específicas de 2,756 a 13,636 m³/h/m e média de 6,994 m³/h/m.

O Sistema Aquífero Guarani é considerado um dos maiores reservatórios subterrâneos existentes, sendo responsável, total ou parcialmente, pelo abastecimento público de inúmeras cidades localizadas na área de estudo, como Ribeirão Preto, Américo Brasiliense, Barretos, Bebedouro, etc..

Os arenitos reservatório do SAG são confinados pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e por rochas sedimentares triássicas e jurássicas de baixa permeabilidade. Os arenitos do Jurássico, de origem eólica, constituem-se nos melhores reservatórios em praticamente toda a Bacia, com porosidade média de 17% e condutividade hidráulica da ordem de 0,2 a 4,6 m/dia, com boa maturidade textural e composicional. Os reservatórios triássicos, de origem flúvio-lacustre/eólico, são afetados por altos níveis de argilosidade, que comprometem sua eficiência hidráulica, com porosidade média de 16% e condutividade hidráulica inferior a 0,01 até 4,6 m/dia (Araújo et al., 1995).

Assim, o SAG é um sistema hidrogeológico com capacidade volumétrica expressiva, taxas de recarga e tempo de renovação que possibilitam poços com vazões da ordem de 800.000 m³/h, mas que apresenta particularidades quanto ao balanço hídrico e comportamento hidráulico que refletem as heterogeneidades das bacias do Paraná e Chaco-Paraná. O gerenciamento destes recursos deve, portanto, considerar sistemas de fluxo em diversas ordens hierárquicas, considerando a movimentação de água na escala do próprio sistema aquífero, como

também em escalas intermediárias ou locais. As principais surgências naturais do aquífero estão localizadas em áreas com cotas inferiores a 400 m, predominantemente margeando as principais drenagens da região, a exemplo dos rios Paraná, Paranapanema, Iraí, Piquiri, Iguaçu e Uruguai. O confinamento do aquífero impõe condições de artesianismo a partir de algumas dezenas de quilômetros de distância das áreas de afloramento. (BITTENCOURT et al., 2003)

6. MATERIAIS E MÉTODOS

O plano de trabalho consistiu na realização de um conjunto de atividades já consagradas em estudos hidrogeoquímicos, envolvendo levantamentos em diversas áreas, a saber:

6.1. Pesquisa bibliográfica e levantamento de dados

Na etapa inicial da pesquisa foram realizadas duas atividades importantes para o desenvolvimento das etapas posteriores, que compreenderam:

- ✓ Revisão da literatura científica relevante envolvendo os diversos temas relacionados ao projeto:
 - Fundamentos de hidrogeologia e hidroquímica: revisão de textos didáticos a respeito do ciclo hidrológico, das águas subterrâneas, aquíferos, bem como as noções de classificação hidroquímica das águas subterrâneas.
 - Meio físico: Aspectos relevantes sobre a geologia e geomorfologia da área, hidrologia e hidrogeologia da unidade aquífera em estudo.
 - Sobre estudos hidrogeológicos e hidroquímicos realizados em aquíferos basálticos em outras partes do globo.

- ✓ Definição da malha de amostragem por meio da seleção de poços, priorizando àqueles com perfil geológico e construtivo conhecido, para tanto foram consultadas bases de dados existentes, a saber:
 - SIDAS do DAEE.
 - SIAGAS da CPRM.
 - SABESP.
 - Prefeituras Municipais e Serviços Autônomos de Água.
 - Empresas de Perfuração.

6.2. Amostragem e Análise de Água

Os trabalhos que envolvem a coleta de amostras de águas subterrâneas, representam a atividade mais importante em um levantamento hidroquímico, e especial atenção deve ser dada a essa etapa, uma vez que a qualidade dos resultados analíticos é influenciada pelos cuidados tomados durante os procedimentos de coleta.

Ao todo foram coletadas 22 amostras de água provenientes de poços perfurados no ASG na região de estudo, as quais se somaram 3 amostras representativas do Sistema Aquífero Guarani, que não foram coletadas no decorrer da elaboração desse projeto, sendo os resultados analíticos retirados de Gastmans & Chang (2011).

As amostras dos poços representativos do ASG foram coletadas ao longo de duas campanhas de amostragem, realizadas no mês de março de 2013, durante a qual foram visitados poços tubulares profundos utilizados pelas prefeituras das cidades, serviços autônomos de água e SABESP para o abastecimento público. Todas as visitas foram agendadas com antecedência e os responsáveis acompanharam a equipe para fazer a amostragem até o local do poço em cada cidade.

As amostras foram coletadas nos cavaletes dos poços, ou quando não foi possível, antes dos pontos de chegada da água no reservatório ou do ponto onde é

efetuada adição de produtos químicos na água, como cloro e flúor, de maneira a garantir que a amostra representasse apenas o aquífero.

Em campo foi preenchida uma ficha com informações cadastrais e tomadas as coordenadas geográficas com a utilização de um GPS manual. Após o preenchimento dessa ficha, foram efetuados os procedimentos de coleta, onde ocorreu a medição em campo os seguintes parâmetros:

- ✓ Temperatura:
- ✓ Condutividade Elétrica: indica a capacidade da água de conduzir corrente elétrica, parâmetro diretamente relacionado à quantidade e aos tipos de compostos dissolvidos presentes na água.
- ✓ pH: representa a atividade do íon H^+ , sendo controlado por reações que produzem ou consomem esse íon, podendo ser utilizado como um índice importante na definição do estado de equilíbrio das reações que ocorrem em solução, especialmente no caso do equilíbrio da fase carbonática.
- ✓ Oxigênio dissolvido: medidas de oxigênio dissolvido representam um parâmetro indicativo da ocorrência de reações de oxi-redução, controlando a dissolução de muitos compostos que apresentam mais de um estado de valência, em processos que podem ser indicativos de alteração natural das características das águas.

O pH foi medido com a utilização de um phmetro da Marca Digimed, modelo DM-2P, acoplado a eletrodo DME-CV2. A concentração de oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas foram medidas com a utilização de um oxímetro portátil da Marca Digimed, modelo DM-4P, acoplado a célula de oxigênio dissolvido, modelo DM-C01 e a condutividade elétrica foi medida com a utilização de um condutivímetro da marca Digimed, modelo DM-3P, acoplado à célula de medição, modelo DMC-010M (Figuras 5 a 7).



Figura 5. Equipamentos transportados ao campo



Figura 6. Procedimento de coleta de amostra



Figura 7. Medida da condutividade elétrica em campo

Foram coletadas duas alíquotas, respectivamente para a determinação de cátions e ânions, acondicionadas em frascos de polietileno, após a filtração em campo com filtro de acetato de celulose com abertura $0,45\mu\text{m}$. A preservação das amostras para a determinação de cátions foi efetuada com a adição de ácido nítrico (solução 2N) até pH inferior a 2, enquanto as amostras para a determinação de ânions foram enviadas ao laboratório sem a adição de preservantes, apenas mantidas sob refrigeração.

Em laboratório, os cátions sódio, potássio, lítio e amônia e os ânions flúor, brometo, cloreto, clorito, nitrito, bromo, nitrato, fosfato e sulfato foram determinados por cromatografia de íons, enquanto as concentrações de cálcio, ferro, magnésio, manganês, estrôncio, bário, zinco, chumbo, sílica, alumínio, níquel, cromo, fósforo e cádmio foram determinadas por meio de espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma e argônio induzido (ICP-AES).

Todas as determinações e métodos analíticos estão em acordo aos padrões estabelecidos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (AWWA, 2005).

6.3. Tratamento dos Dados

Os dados hidroquímicos obtidos ao longo dessa pesquisa foram utilizados com o objetivo de se diferenciar as fácies hidroquímicas, com vistas à classificação e definição das principais características das águas. Para que esse objetivo possa ser alcançado, diversos tipos de tratamento podem ser efetuados, conforme apresentado abaixo e resumidos na tabela 1.

- ✓ **métodos estatísticos:** que podem ser univariados ou multivariados;
- ✓ **métodos gráficos:** também denominados de diagramas de concentrações de íons.

Tabela 1. Principais Métodos Empregados para a Análise de Dados Hidroquímicos.

Métodos interpretativos	
Métodos Estatísticos	Métodos Gráficos
Estatística Descritiva (Univariada). Análise de Agrupamentos ("Cluster Analysis"). Análise das Componentes Principais.	Diagrama de Barras. Diagramas de Pizza Diagrama de Stiff (STIFF, 1951). Diagrama de Schoeller (SCHOELLER, 1962). Diagrama de Piper (PIPER, 1944)

A utilização de métodos estatísticos, especialmente os multivariados, na avaliação hidroquímica é bastante difundido, entretanto os mesmos não foram empregados no presente trabalho, e portanto, atenção especial será dada aos métodos gráficos.

Deve-se ressaltar que a despeito de limitações dos diagramas, principalmente o diagrama de Stiff que só possibilita a análise de uma amostra por vez, os métodos

gráficos são ferramentas importantes para o entendimento do padrão hidroquímico das águas, sua relação com a litologia existente no aquífero e os processos hidroquímicos envolvidos na sua formação.

O diagrama de Stiff apresenta, de maneira distintiva, as principais características hidroquímicas de uma amostra. Para a sua elaboração são utilizados quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem nas duas direções a partir de um eixo central vertical (STIFF, 1951).

Por meio da construção dos diagramas de Stiff é possível visualizar, de maneira simples e eficiente, a distribuição espacial das fácies hidroquímicas das águas subterrâneas da região em questão, o que representa uma grande vantagem deste tipo de diagrama em relação aos outros tipos. Além disso, é possível avaliar as diferenças de salinização das águas, uma vez que ele representa as concentrações absolutas dos cátions e ânions principais, o que auxilia em diversos tipos de análises e comparações entre as amostras.

Concentrações em miliequivalentes (meq) de cátions são plotadas à esquerda do eixo central vertical, e as concentrações de ânions, também em miliequivalentes são plotadas à direita deste eixo (HEM, 1985; FETTER, 2001). Os pontos são então conectados, resultando em um polígono irregular cujo aspecto é apresentado na figura 8.

Diagramas trilineares, como o diagrama de Piper apresentam graficamente as concentrações em porcentagem para cada íon analisado, em diagramas triangulares, constituindo-se numa das mais utilizadas representações gráficas para a classificação de um conjunto de dados hidroquímicos (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).

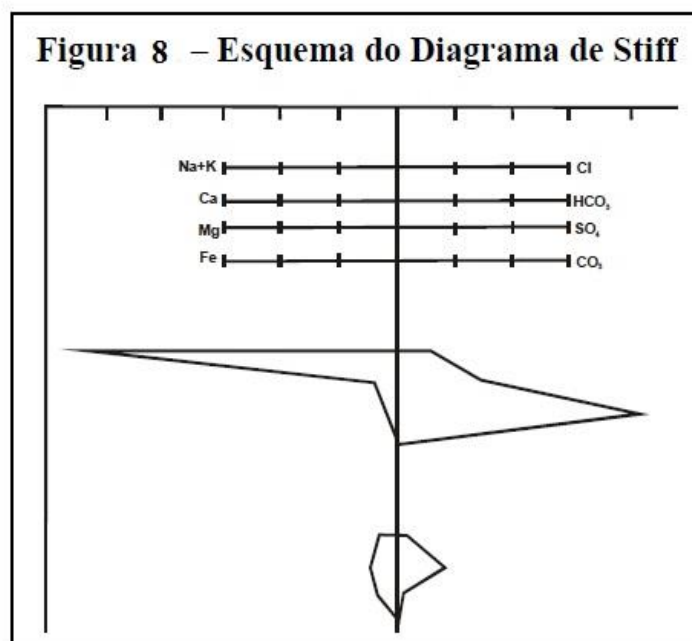


Figura 8. Esquema de Construção do Diagrama de Stiff (retirado de Gastmans et al., 2005)

A figura 9 apresenta o esquema de representação do diagrama de Piper, onde cada vértice dos triângulos inferiores representa 100% da concentração de determinado cátion ou ânion. A intersecção do prolongamento das retas paralelas às faces dos triângulos inferiores (Mg e SO_4), no losango superior, fornece a classificação hidroquímica de determinada amostra (FETTER, 2001).

O diagrama de Piper representa uma ferramenta bastante consistente na análise de conjuntos de dados hidroquímicos, diferentemente dos diagramas de Stiff, que são capazes de classificar apenas uma amostra por vez, possibilitando a distinção de grupos hidroquímicos e a avaliação da evolução hidroquímica ocorrida em determinado aquífero, função de processos hidroquímicos ocorridos ou da ocorrência de misturas de águas.

Para a elaboração dos diagramas de Piper e Stiff utilizados no presente trabalho, foi utilizado o software RockWorks V14, a partir dos resultados das análises hidroquímicas.

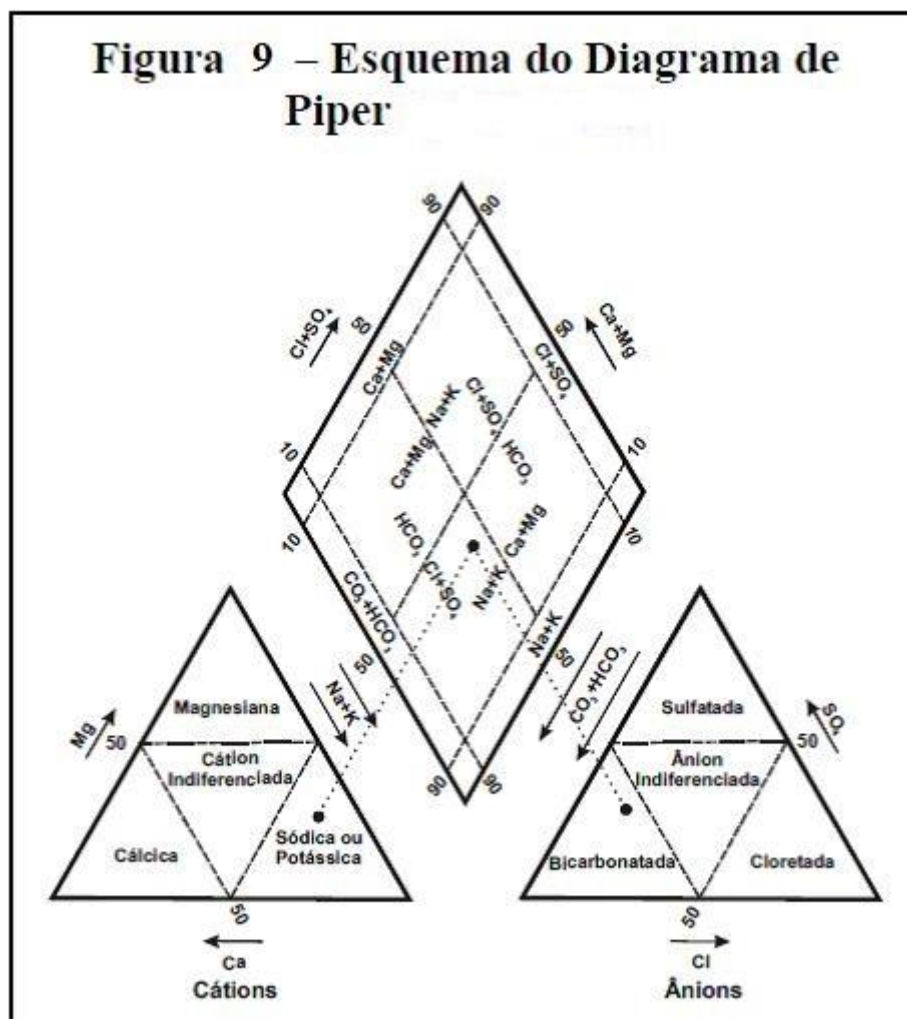


Figura 9. Esquema de Construção do Diagrama de Piper (retirado de Gastmans et al., 2005)

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A localização dos poços amostrados é apresentada no mapa da figura 10, os dados dos poços amostrados são apresentados na tabela 2, contendo as informações sobre a sua localização, profundidade e alguns aspectos hidrodinâmicos, como vazão, níveis d'água (estático e dinâmico), enquanto os resultados analíticos são apresentados na tabela 3.

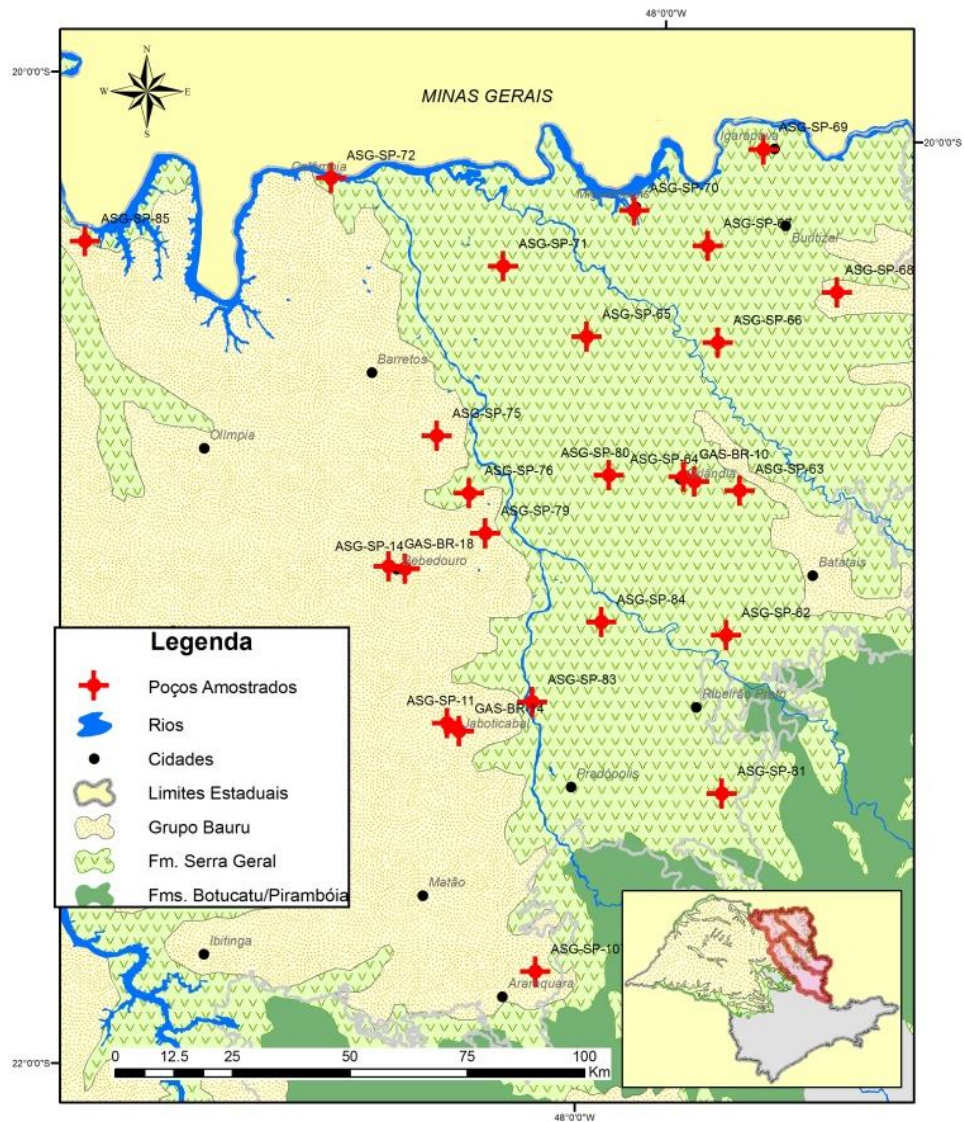


Figura 10. Mapa de localização dos poços amostrados (Os poços com a sigla ASG referem-se aos poços amostrados durante o projeto, enquanto as amostras com a sigla GAS, tiveram seus dados retirados de Gastmans & Chang (2011)).

Tabela 2. Dados dos poços amostrados

Nº Seq	Amostra	Localidade	Data	Coordenadas				Prof.(m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m³/h)	Q_Esp (m³/h/m)	Aquífero	Cota NA
				Zona	UTM-E	UTM-S	Cota							
1	ASG-SP-11	Jaboticabal	16/01/2013	23	775699	7647627	596	116	42	59	20	1.18	ASG	554
2	ASG-SP-14	Bebedouro	16/01/2013	23	763957	7681588	588	150	42.8	105.5	19	0.30	ASG	545.2
3	ASG-SP-62	Jardinópolis	19/03/2013	22	213217	7672447	555	sem informação					ASG	Nd
4	ASG-SP-63	Nuporanga	19/03/2013	22	212839	7704894	739	130	23	72	20	0.41	ASG	716
5	ASG-SP-64	Orlândia	19/03/2013	22	202498	7505949	693	sem informação					ASG	Nd
6	ASG-SP-65	Ipuã	20/03/2013	23	861209	7736115	555	108	16	66	34	0.68	ASG	539
7	ASG-SP-66	Guará	20/03/2013	22	204565	7737434	644	175	55	147	35	0.38	ASG	589
8	ASG-SP-67	Ituverava	20/03/2013	22	200068	7758746	572	150	58.5	72.5	22	1.57	SAG	513.5
9	ASG-SP-68	Jeriquara	20/03/2013	22	230000	7751350	840	100	12.16	20.86	34.86	4.01	ASG	827.84
10	ASG-SP-69	Igarapava	20/03/2013	22	210304	7781452	687	sem informação					ASG	Nd
11	ASG-SP-70	Miguelópolis	21/03/2013	23	810023	7765064	573	sem informação					ASG	Nd
12	ASG-SP-71	Guaíra	21/03/2013	23	781442	7750646	514	sem informação					ASG	Nd
13	ASG-SP-72	Colômbia	21/03/2013	23	741659	7767792	485	149	29	112.4	5.3	0.06	ASG	456
14	ASG-SP-75	Jaborandi	21/03/2013	23	769100	7711800	470	166	0.63	38.17	79.2	2.11	ASG	469.37
15	ASG-SP-76	Terra Roxa	21/03/2013	23	777200	7699415	529	114	13.4	40	108.7	4.09	ASG	515.6
16	ASG-SP-79	Viradouro	22/03/2013	23	781420	7690712	516	206	117	137	46.3	2.32	ASG	399
17	ASG-SP-80	Morro Agudo	22/03/2013	23	808278	7705523	573	212	77.38	99.08	56.1	2.59	ASG	495.62
18	ASG-SP-81	Cravinhos	22/03/2013	22	215952	7636980	690	200	sem informação				ASG	Nd
19	ASG-SP-83	Barrinha	01/04/2013	23	794460	7653667	516	180	4	101	13	0.13	ASG	512
20	ASG-SP-84	Pontal	01/04/2013	23	808751	7672544	541	sem informação					ASG	Nd
21	ASG-SP-85	Icém	01/04/2013	23	687586	7750043	431	151	32.39	75.39	30	0.70	ASG	398.61
22	ASG-SP-107	Américo Brasiliense	05/04/2013	23	799101	7593400	714	133	18.95	112.5	16	0.17	ASG	695.05
23	GAS-BR-14	Jaboticabal	19/04/2012	23	778513	7646025		430	sem informação				SAG	nd
24	GAS-BR-10	Orlândia	23/04/2010	22	200024	7706717		sem informação					SAG	nd
25	GAS-BR-18	Bebedouro	25/08/2012	23	760327	7681897		830	sem informação				SAG	nd

Tabela 3. Dados Hidroquímicos

Nº Seq	Amostra	CE	pH	Temp	OD	Alcalinidade		Na	K	Ca	Mg	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Si	Erro Balanço
						HCO ₃	CO ₃										
1	ASG-SP-11	157.1	7.8	24	6.9	97.4	ND	4.75	7.1	18.5	4.62	0.068	0.061	< 0.040	< 0.020	28	-2.13%
2	ASG-SP-14	156.4	8.5	26.2	5.24	97.9	2.27	30.4	1.63	7.34	0.15	0.095	0.051	0.22	0.1	16.2	0.97%
3	ASG-SP-62	83.6	7.7	26.8	7.11	50.6	ND	2.03	9.74	8.52	2.08	0.12	0.032	< 0.040	0.077	9.01	-5.24%
4	ASG-SP-63	92.6	7.3	24.6	4.23	49	ND	2.36	4.02	12.5	3.22	0.092	2.61	5.76	< 0.020	15	-5.71%
5	ASG-SP-64	109.2	7.2	24.2	5.78	62.8	ND	6.3	1.67	13.6	3.37	0.07	0.63	6.01	0.1	17.8	-5.04%
6	ASG-SP-65	55	7.1	25.3	7.16	30.1	ND	5.38	0.27	5.96	1.15	0.21	0.41	2.73	0.17	15	-5.43%
7	ASG-SP-66	96.4	7.2	28	3.46	44.2	ND	13.6	0.65	5.82	1.5	0.05	2.14	11.2	0.11	10.1	-2.45%
8	ASG-SP-67	158.8	7.9	28.1	nm	103	ND	32	1.12	4.99	1.69	0.096	0.39	1.14	0.42	12.8	-1.94%
9	ASG-SP-68	95.7	7.5	23.9	3.08	61.5	ND	2.97	2.28	14.1	3.15	0.067	0.063	0.24	0.066	19.5	-6.01%
10	ASG-SP-69	27.2	6.9	25.3	5.44	9.87	ND	1.26	0.52	2.56	1.14	0.03	0.53	4.53	0.043	9.24	-6.65%
11	ASG-SP-70	245	9.4	27.6	2.87	113	23.2	65	0.48	1.65	0.41	0.3	0.63	1.44	2.36	12.1	9.16%
12	ASG-SP-71	259	9.6	24.8	nm	96.1	31.5	71.4	0.29	0.91	0.019	0.16	1.91	6.23	0.69	12.4	10.02%
13	ASG-SP-72	194.9	7.3	26.8	4.17	76.5	ND	10.1	1.21	22.8	7.03	0.079	8.94	28.7	0.22	29.6	-4.89%
14	ASG-SP-75	nm	7.7	nm	nm	60.6	ND	5.13	1.59	11	4.37	0.071	0.63	1.19	0.32	23	-5.60%
15	ASG-SP-76	203	8.1	nm	nm	113	ND	19.2	0.79	22.9	4.04	0.15	4.35	11	0.41	21	-3.42%
16	ASG-SP-79	51.4	7.1	27.2	4.64	26	ND	7.53	0.17	2.75	1.02	0.091	1.13	2.38	0.32	9.46	-4.04%
17	ASG-SP-80	136.5	8.1	30.9	nm	90.3	ND	10.2	2.31	19.5	2.04	0.091	0.056	< 0.040	0.24	7.52	-4.66%
18	ASG-SP-81	115.7	7.6	23.9	nm	64.7	ND	3.47	1.89	14.9	4.98	0.068	1.69	7.44	0.076	20.4	-4.54%
19	ASG-SP-83	122.4	7.9	29	6.4	80.5	ND	3.64	2.1	22.7	1.9	0.088	0.13	0.19	0.16	8.99	-5.71%
20	ASG-SP-84	181.5	7.9	29.2	4.25	113	ND	10.33	1.05	33.8	0.6	0.014	1.02	2.4	0.56	10.7	-6.48%
21	ASG-SP-85	301	9.7	27.3	2.31	49.3	40.5	74.1	0.72	2.14	0.4	2.04	5.75	0.63	34.8	19.5	21.53%
22	ASG-SP-107	133.8	7.5	nm	nm	75.2	ND	2.56	4.09	16.7	7.27	0.096	1.74	5.93	0.23	23.5	8.41%
23	GAS-BR-14	189	7.8	32.4	nm	119	ND	8.63	2.11	23.7	2.91	0.08	0.061	<0.10	0.93	6.67	3.81%
24	GAS-BR-10	145.6	7.7	nm	nm	81	ND	3.3	3.7	17.4	1.9	0.083	0.053	<0.10	0.13	7.26	3.02%
25	GAS-BR-18	307	9.6	43.7	nm	93.8	34.8	63.1	0.3	1.07	<0.025	0.14	2.59	0.46	4.31	14.8	19.00%

Obs: nm – não medido , ND – não detectado

7.1.Aspectos Hidrodinâmicos do Aquífero Serra Geral

Os poços amostrados ao longo do desenvolvimento do trabalho, perfurados no aquífero Serra Geral apresentam profundidades que variaram de 108 metros a 212 metros, com valor médio de 152,5 metros.

As vazões observadas refletem uma característica de aquíferos fissurais, a sua heterogeneidade, variando de $5\text{m}^3/\text{h}$ à $108\text{m}^3/\text{h}$, com médias de $34,2\text{m}^3/\text{h}$, o que reflete as variações observadas na vazão específica dos poços, que representa o quociente da vazão pelo rebaixamento observado, com variação de $0,06\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ a $4,09\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$.

As profundidades dos níveis d'água são geralmente rasas, com médias de 36 metros, apresentando valores máximos de 117 metros e mínimos de 0,63 metros de profundidade.

O mapa potenciométrico elaborado a partir das cotas do nível d'água levantados nos banco de dados de poços consultado, indica que o fluxo das águas subterrâneas no Aquífero Serra Geral apresenta direção preferencial EW, controlado essencialmente pela topografia da área de estudo, e descargas localizadas ao longo das principais drenagens estabelecidas na área: Rio Pardo e Rio Mogi Guaçu (Figura 11).

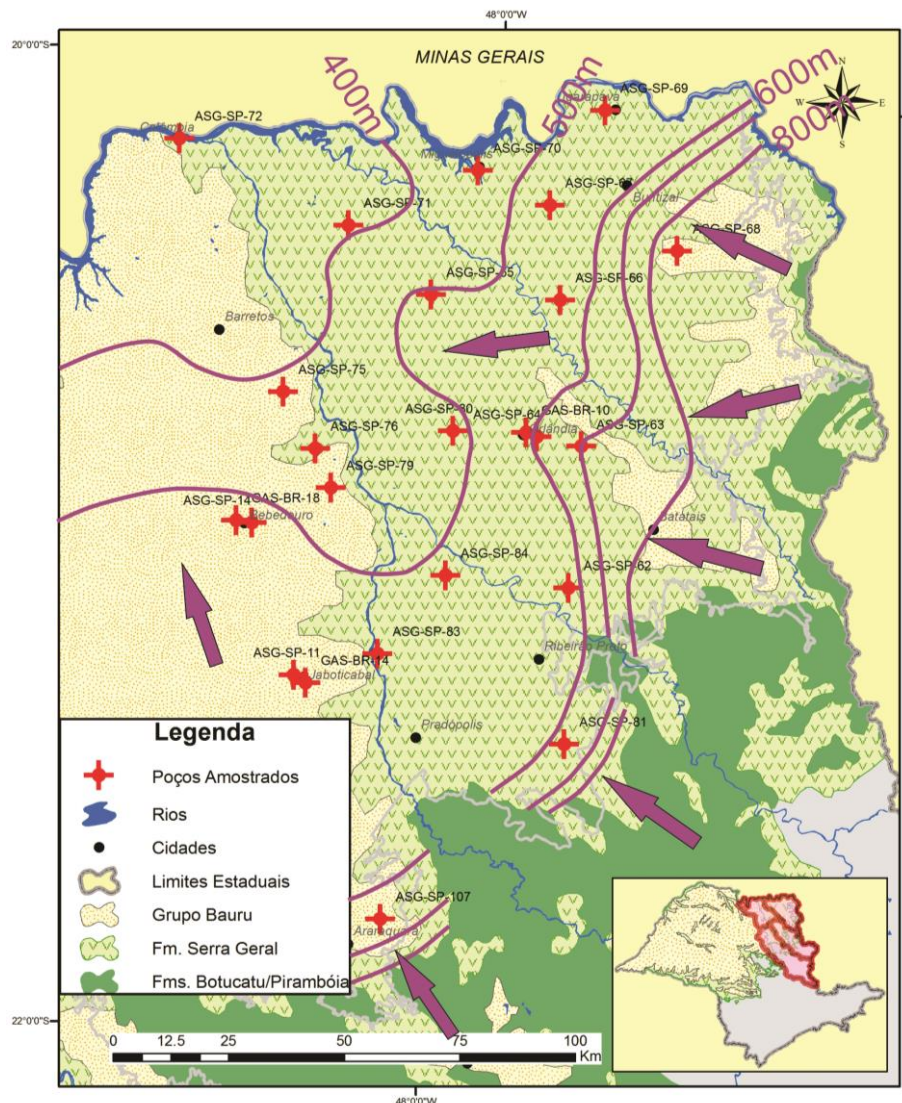


Figura 11. Mapa potenciométrico simplificado do Aquífero Serra Geral na área de estudo

7.2. Aspectos Hidroquímicos do Aquífero Serra Geral

A avaliação da qualidade das análises químicas foi feito por meio do cálculo do balanço iônico. Para isto, utiliza-se da equação abaixo em que Σ Ânions ou Σ Cátions representam a somatória das concentrações dos mesmos, em meq/L.

$$Erro = \frac{\sum \hat{Anions} - \sum \hat{Cations}}{\sum \hat{Anions} + \sum \hat{Cations}} \times 100$$

equação 01

Após avaliação do balanço iônico das análises, pôde-se verificar que das vinte e cinco amostras, apenas três apresentaram erros positivos indicando concentrações superiores de ânions, enquanto todas as outras apresentaram erros negativos indicando, desta maneira, concentrações superiores de cátions. Quase todos os resultados apresentaram erros inferiores a 7%, exceto cinco amostras (ASG-SP-70; ASG-SP-71; ASG-SP-85; ASG-SP-107 e GAS-BR-18), mas que não comprometem a análise apresentada no trabalho (Tabela 3).

Uma avaliação estatística básica dos parâmetros medidos em campo e das concentrações dos elementos determinados em laboratório é apresentada na tabela 4.

Tabela 4. Estatística básica dos parâmetros físico químicos

Parâmetros	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Casos
CE	141.72	133.80	27.20	301.00	70.59	21
pH	7.86	7.70	6.90	9.70	0.79	22
Temp.	26.48	26.80	23.90	30.90	2.04	19
OD	4.87	4.64	2.31	7.16	1.58	15
HCO ₃	71.12	69.95	9.87	113.00	29.85	22
CO ₃	24.37	27.35	2.27	40.50	16.34	4
Cl	1.59	0.63	0.03	8.94	2.20	22
NO ₃	5.23	2.73	0.19	28.70	6.64	19
SO ₄	2.07	0.23	0.04	34.80	7.72	20
F	0.19	0.09	0.01	2.04	0.42	22
Na	17.44	6.92	1.26	74.10	23.05	22
K	2.08	1.40	0.17	9.74	2.35	22
Ca	12.07	11.75	0.91	33.80	8.79	22
Mg	2.55	1.97	0.02	7.27	2.11	22
Si	15.95	15.00	7.52	29.60	6.43	22

As águas desse aquífero apresentam condutividades elétricas que variaram de 30 µS/cm até 300 µS/cm, com média de 140µS/cm, caracterizando águas com médio grau de mineralização, em acordo com observações de outros autores.

O pH das águas do Aquífero Serra Geral possuem valores que variaram de 6,9 a 9,7 com predominância de pH's neutros a ligeiramente alcalinos.

O principal ânion é o bicarbonato, o que pode ser constatado pela boa correlação que o mesmo apresenta com a condutividade elétrica (Figura 12), com concentrações que variaram de 10mg/L até 113 mg/L, e valores médios de 71 mg/L. O ânion carbonato está presente em 4 amostras que apresentam pH's maiores que 8,3, representadas na figura 12 pelas amostras com maior condutividade.

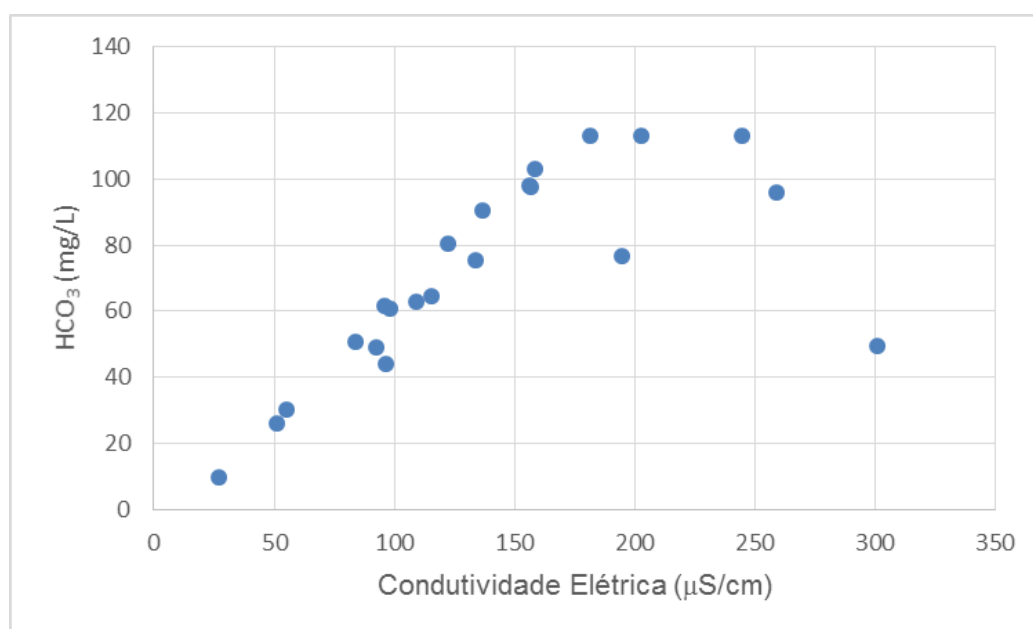


Figura 12. Gráfico de correlação entre a concentração de bicarbonato e a condutividade elétrica nas águas do ASG

Os principais cátions presentes são o Cálcio e o Sódio, com concentrações que variam respectivamente de 0,91 mg/L a 33,80 mg/L e 1,26 mg/L a 74,1 mg/L, com médias de 12,07 mg/L e 17,44 mg/L, respectivamente. O seu comportamento será discutido mais adiante.

As águas subterrâneas do ASG, coletadas no âmbito do presente projeto, foram classificadas por meio do Diagrama de Piper (Figura 13), que mostra a existência de três grupos hidroquímicos principais, conforme discriminado a seguir.

O primeiro grupo é representado pelas águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas, onde encontram-se as amostras coletadas em dois poços no SAG. A diferenciação entre as águas do SAG e do ASG está relacionada às concentrações de magnésio, que são maiores nas águas do ASG devido à presença de minerais magnesianos, como piroxênio e olivinas na mineralogia dos basaltos (Machado et al., 2007).

O segundo grupo é representado pelas águas bicarbonatadas cálcico-sódicas, intermediárias, cuja composição pode estar relacionada a processos de troca iônica. As amostras que representam esse grupo estão situadas na região próxima a Bebedouro, onde os basaltos são recobertos pelo Grupo Bauru, e na porção norte da área, na margem direita do Rio Pardo.

Um terceiro grupo é caracterizado pela ocorrência de águas bicarbonatadas sódicas, englobando as amostras coletadas nas proximidades do Rio Grande, na divisa entre São Paulo e Minas Gerais, e a uma amostra coletada em poço do SAG na cidade de Bebedouro.

Uma única amostra é classificada como bicarbonatada sulfatada sódica, coletada na cidade de Icém, nas proximidades do Rio Grande.

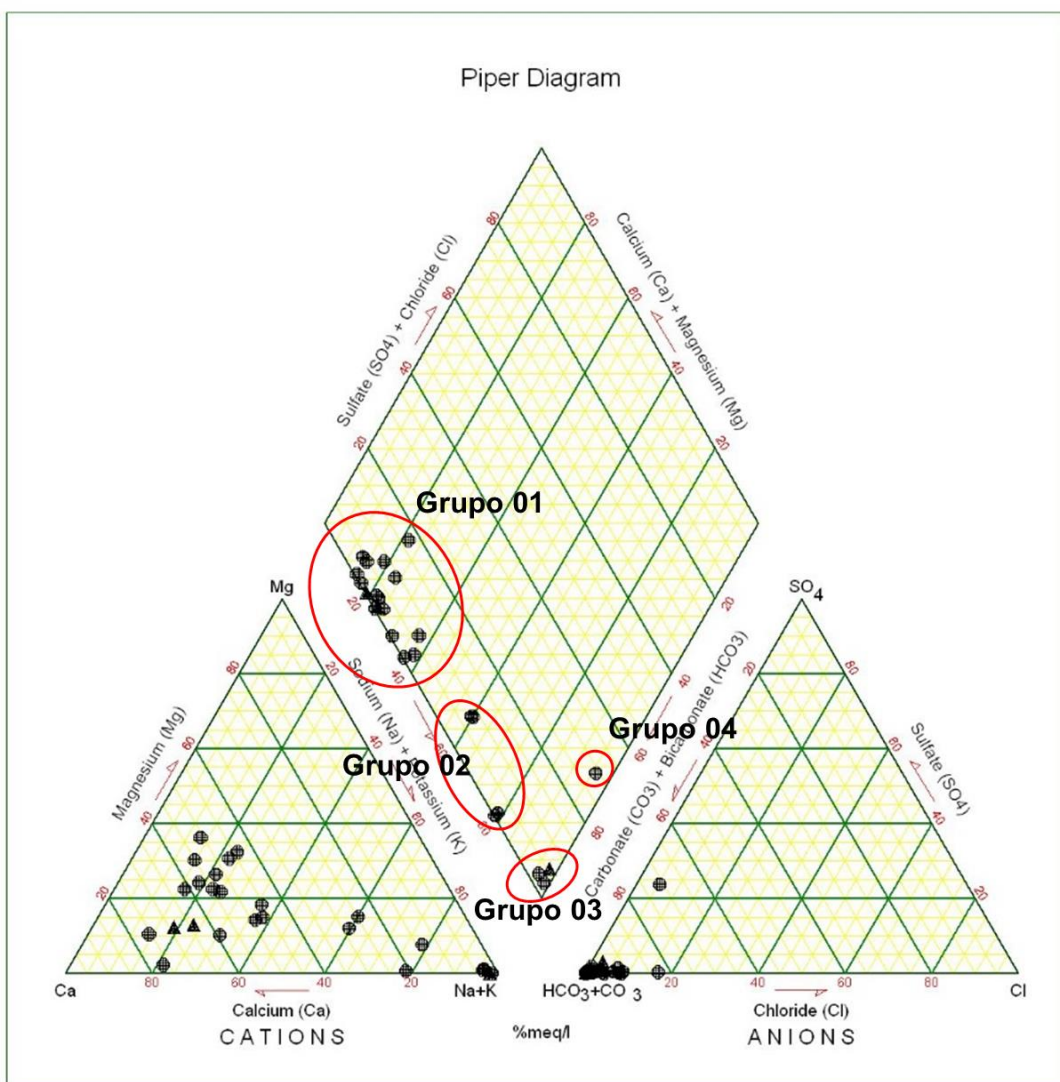


Figura 13. Diagrama de Piper. As amostras do ASG são indicadas com um círculo, e as do SAG com um triângulo

A distribuição espacial dessas fácies hidroquímicas pode ser observada na figura 14, que mostra a classificação das amostras por meio da utilização do Diagrama de Stiff.

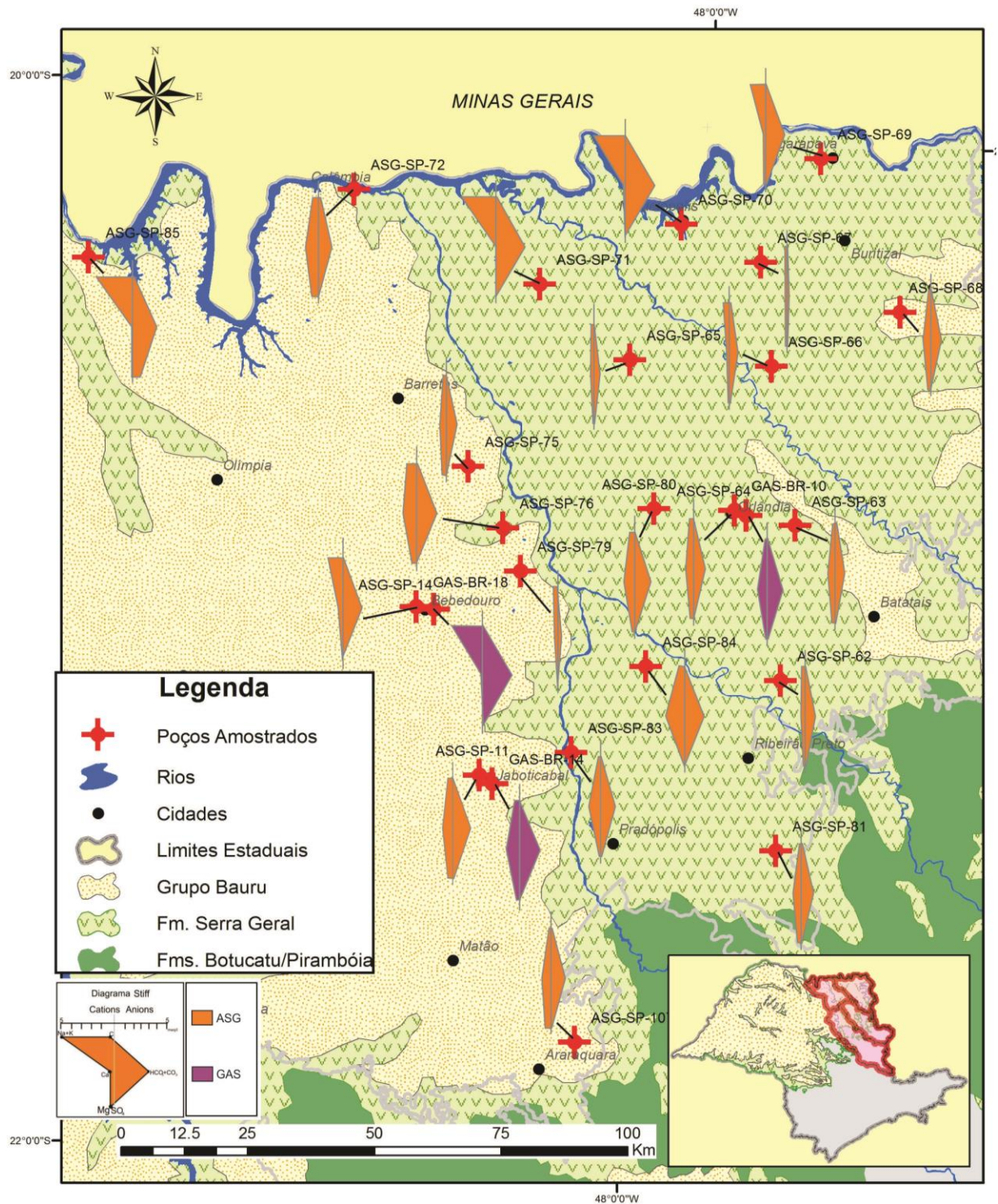


Figura 14. Mapa de distribuição das fácies hidroquímicas – Diagramas de Stiff

As amostras coletadas na porção norte da área, próximo ao Rio Grande, são classificadas como Bicarbonatadas Sódicas, apresentando maiores condutividades elétricas. Nessas amostras as concentrações de cloreto e sulfato são baixas, bem

como as de cálcio. A amostra com maior quantidade de SO_4 é a ASG-SP-85, localizada em Icém, e que é classificada com bicarbonatada-sulfatada sódica. Já a amostra localizada em Colômbia tem um perfil diferente das demais, destacando suas quantidades de Mg, Ca e HCO_3+CO_3 .

As amostras localizadas na região centro norte do mapa apresentam o diagrama de Stiff mais “delgado”, indicando baixas taxas de mineralização, caracterizadas pelas baixas condutividades elétricas. O HCO_3+CO_3 é o ânion predominante nessas amostras, enquanto Ca e Mg são os cátions mais abundantes.

No centro do mapa as amostras foram coletadas de poços localizados mais próximos uns dos outros e é possível observar nítidas diferenças entre estas e suas quantidades de elementos. Também nesta região foram coletadas amostras do aquífero Guarani (total de 3 amostras com fins de estudo e comparação de suas águas). As amostras do aquífero Serra Geral, apresentam baixos índices de Na+K, Cl, SO_4 e Mg. O elemento mais presente nestas amostras é o HCO_3+CO_3 , seguido do Ca. A amostra com maior quantidade destes elementos é a ASG-SP-84 e a ASG-SP-76.

Os diagramas das amostras localizadas no centro e no sul são semelhantes com os do centro-norte, porém apresentam maiores quantidade de Mg. O elemento de maior quantidade é o HCO_3+CO_3 , seguido do Ca.

Em Bebedouro foram coletadas duas amostras, uma do Aquífero Serra Geral e outra do Aquífero Guarani. Através do diagrama de Stiff pode-se perceber a diferenças significativas na quantidades de Na+K e HCO_3+CO_3 (ambas maiores na amostra GAS-BR-18, referente ao Aquífero Guarani). Na cidade de Jaboticabal também foram coletadas duas amostras, uma de cada aquífero, porém neste caso as diferenças foram menos nítidas. Há uma maior quantidade de Mg na amostra ASG-SP-11 referente ao Aquífero Serra Geral e maiores quantidades de Ca e HCO_3+CO_3 na amostra GAS-BR-14, referente ao Aquífero Guarani. No caso de Orlandia, visualmente também há pouca diferença entre as amostras pelo diagrama de Stiff, a amostra do aquífero Guarani GAS-BR-10 apresenta maior quantidade de HCO_3+CO_3 e Ca, e a amostra ASG-BR-64 apresenta maiores quantidades de Na+K e Mg em comparação a outra amostra.

O aumento da concentração de cátions e ânions observada pela avaliação da distribuição das fácies hidroquímicas, definidas pelos Diagramas de Stiff (Figura 14), mostra-se concordante com as principais direções de fluxo das águas subterrâneas (Figura 11), indicando que os processos de salinização dessas águas, estão associados a processos de dissolução devido a interação água-rocha ao longo das linhas de fluxo das águas subterrâneas. Maiores tempo de contato indicam maiores caminhos percorridos pela água subterrânea, e consequentemente maior salinização.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Baseando-se nos resultados obtidos após as análises e estudo aprofundado a respeito do tema em questão, é possível concluir, entre outros, que o fluxo das águas subterrâneas no Aquífero Serra Geral apresenta direção preferencial EW, este é controlado pela topografia e descargas localizadas ao longo das principais drenagens estabelecidas na área: Rio Pardo e Rio Mogi Guaçu. Quanto a hidrogeologia também pode-se afirmar que o Rio Pardo e Rio Grande representam a descarga semi-regional do ASG.

O aumento da concentração de cátions e ânions definido pelos Diagramas de Stiff mostra-se concordante com as principais direções de fluxo das águas subterrâneas, isto indica que os processos de salinização dessas águas, estão associados a processos de dissolução devido a interação água-rocha ao longo das linhas de fluxo das águas subterrâneas. Foi observado que no estado de São Paulo ocorrem essencialmente os basaltos da unidade básica-intermediária, constituídos por plagioclásios (Ca) e piroxênios (Mg).

As amostras coletadas foram classificadas de acordo com suas características hidroquímicas, segundo diagrama de Piper, em três grupos distintos: O primeiro grupo é representado pelas águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas, onde encontram-se as amostras coletadas em dois poços no SAG; o segundo grupo

é representado pelas águas bicarbonatadas cálcico-sódicas, intermediárias, cuja composição pode estar relacionada a processos de troca iônica. Um terceiro grupo é caracterizado pela ocorrência de águas bicarbonatadas sódicas e uma única amostra é classificada como bicarbonatada sulfatada sódica, coletada na cidade de Icém, nas proximidades do Rio Grande. Assim, pôde-se concluir que as águas analisadas são principalmente bicarbonatadas cálcio-magnesianas.

Foi possível observar através dos resultados obtidos alto índice de nitrato na amostra coletada na localidade do município de Colômbia. A presença de nitrato indica contaminação da água geralmente por ação antrópica. A contaminação das águas subterrâneas representa um grave problema devido a mistura de águas, dificultando seu controle e monitoramento.

Com a realização deste trabalho foi possível perceber que ainda há pouca bibliografia referente ao Aquífero Serra Geral (em comparação ao Aquífero Guarani, por exemplo). Estudos relacionados ao ASG são de extrema importância devido ao seu alto potencial e qualidade de suas águas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Bol. IGG**, n.41, p.167- 263, 1964.

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTER, P.E. **Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo**. Mapas, Curitiba: UFPR-Petrobras, 1995. 4 mapas, colorido. Escala 1:5.000.000. Texto Explicativo, 16p.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIAROMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.; PAPATRECHAS, C.; PICCIRILO, E.M.; ROISEMBERG, A. Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Paraná Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships. **Journal of Petrology**, v.27, p.915-944, 1986.

BITTENCOURT, A.V.L.; FERREIRA, F.J.F.; FILHO, E.F.R; HINDI, E.C.; ROSTIROLLA, S.P. Sistema Aquífero Guarani, considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**, nº 17, maio 2003.

BITTENCOURT, A,V,L, Sobre o controle do quimismo de águas termais da Bacia do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 44, p.117-129, 1996.

CAMPOS, H.C.N.S. **Caracterização e Cartografia das Províncias Hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo**. 177p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências-Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 1993.

CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea** 2ª Edicion. Barcelona;Ediciones Omega 1983.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO **Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 6 – Ribeirão Preto**. São Paulo: DAEE, 1974.Volume 2. (Texto).

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO **Estudos de Água Subterrânea – Regiões Administrativas 7, 8, 9 (Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba)**. São Paulo: DAEE, 1976.Volume 2, 286p. (Texto).

DEUTSCH, W.J.; JENNE, E.A.; KRUPKA, K.M. Solubility Equilibria in Basalt Aquifers: The Columbia Plateau, Eastern Washington, USA. **Chemical Geology**, v.36, p. 15-34, 1982.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 824p.

ERNESTO, M.; RAPOSO, M.I.B.; MARQUES, L.S.; RENNE, P.R.; DIOGO, L.A.; DE MIN, A. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of the Northeastern Paraná Magmatic Province: Tectonic Implications. **Journal of Geodynamics**, v.28, p. 321-340, 1999.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology** 4nd ed. New York Macmillan Publishing Company 2001.

GALLO, G., SINELLI, O. Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, v.10, p. 129-140, 1980.

GASTMANS, D.; ALBERTO, M. C.; BUFFON, A. G. M.; MORAES, F. T.; SANTOS, M. M.; SILVA, J. R. M.; CHANG, H. K. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: **XIV Encontro Nacional de Perfuradores e II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste**, 2005, Ribeirão Preto. Anais II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, 2005.

GASTMANS, D.; CHANG, H.K. Complementary Isotopic Studies in the Northern Compartment of the Guarani Aquifer System (Brazil) – **Groundwater Dating Along Defined Flow Paths – IAEA Research Project** – Contract # 15697 - Progress Report – July/2010 to June/2011, Rio Claro, 17p. 2011.

GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. **Applied Geochemistry**, v.25, p. 16-33, 2010.

HEM, J.D. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters**. U.S.Geological Survey Water Supply Paper 2254. 272p – 1985.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo. 2v. (IPT.Monografias, 5. Publicação, 1 183), 1981.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo - Bacia do Pardo/Grande**. São Paulo: Convênio IPT/DAEE. (IPT. Relatório, 28 184), 1990.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. Cadernos de Educação Ambiental. Instituto Geológico, São Paulo, 104p. 2008.

KARMAN, I. **Ciclo da Água**. In: TEIXEIRA, W. et al. – Organizadores. Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo, p. 113-138, 2003

LASTORIA, G. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente. UNESP Rio Claro, 2002.

LASTORIA, G.; SINELLI, O.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A. C.; GASTMANS, D.. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, v.20, p. 139-150, 2006.

MACHADO, F.B.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia e Aspectos Petrológicos das Rochas Intrusivas e Efusivas Mesozóicas de Parte da Borda Leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.37(1), p. 64-80, 2007.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n° 1, p. 69-82, 1994.

MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15(2), p. 265-287, 2007.

NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F.; BETANCOURT, R.H.S.; VERDUGO, D.R.H.; MACHADO, F.B. Geologia e Estratigrafia da Formação Serra Geral. **Revista Geociências**, v. 21(2), p. 15-32, 2002.

PERRONI, J.C.A.; SILVA, R.B.G.; HIRATA, R.C.A.; DOZZI, L.F.S.; Ocorrências de Fluoreto nos Aquíferos da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. In: Simpósio Regional de Geologia, 5, 1985. **Atas....**São Paulo, SBG, 1985, v.2, p. 503-514.

PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysuis. **American Geophysical Union Transactions** 25:914-923. 1944.

REBOUÇAS, A.C.; FRAGA, C.G. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. **Revista Brasileira de Águas Subterrâneas**, v.12, p.29-55. 1988.

RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. **Science**, v.258, p. 975-979, 1992

RENNE, P.R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FÉRAUD, G.; PICCIRILLO, E.M. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. **Earth and Planetary Science Letters**, v.144, p. 199-211, 1996.

SCHERER, C.M.S. Eolian Dunes of Botucatu Formation (Cretaceous) in Southernmost Brazil: Morphology and Origin. **Sedimentary Geology**, v.137, p. 63-84, 2000.

SCHOELLER, H. Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparasion des eaux souterraines. **Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin Série 5(5): 651-657. 1935.**

SINELLI, O. Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (SP). **Revista Águas Subterrâneas**, v.11(1), p.1-8, 1987.

STIFF, H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of paterns. **Journal of Petroleum Technology 3(10):15-17. 1951**

WAHNFRIED, I. **Modelo Conceitual de Fluxo do Aquitarde Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na Região de Ribeirão Preto (SP).** 2010. 124p. Tese (Doutorado em Geologia) Instituto de Geociências-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. Bacia do Paraná. In: RAJAGABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro: **Boletim Técnico da Petrobras**, 415 p., 1997.