

ALEXANDER BITTENCOURT

**ESTUDO SOBRE A TIPOLOGIA DAS ÁGUAS E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL
DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NO EXTREMO OESTE DO ESTADO DO
PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre. Curso de Pós Graduação em Geologia (área de Concentração: Geologia Ambiental). Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná do Paraná.

Orientador:
Prof. Dr Ernani Francisco da Rosa
Filho.

**Curitiba
2008**

AGRADECIMENTOS

Em especial ao Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho, pela orientação, ensinamento, paciência, discussão e leitura crítica da dissertação, bem como pelo estímulo para enfrentar os momentos difíceis, assim como pela grande amizade.

Ao Prof. Dr. Eduardo Chemas Hindi pelas sugestões e também pela discussão em várias etapas do trabalho. Aos colegas Alexandra, Gustavo e Camila pelas opiniões durante as várias fases dessa dissertação.

Ao Sr. Diretor Geral Brasileiro, Jorge Sameck e ao Diretor de Coordenação, Sr. Nelton Friedrich, da Itaipu Binacional pelos recursos financeiros cedidos à pesquisa, sem os quais não teria sido possível desenvolver este trabalho, inclusive subsidiando essa dissertação.

Especial agradecimento a Simone Frederigi Benassi, Bióloga de Itaipu, pela cessão de informações e constante atenção que ela dispensou durante o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos geólogos Adalberto Amâncio de Souza, da SANEPAR e Jurandir Bos Filho, da SUDERHSA, pelo fornecimento de dados referentes aos poços existentes na área de estudo.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas, Alexsandro e Daniela, pelas análises físico-químicas das amostras de água dos poços perfurados na área da pesquisa. Ao amigo Laércio, da SAAE de Marechal Cândido Rondon, pela grande contribuição e pela ajuda nas etapas de campo.

Às bibliotecárias Ângela e Eliane, pela paciência, pelo apoio e pela ajuda na obtenção do material bibliográfico.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRAC

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS	11
2 MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 MÉTODO DE AMOSTRAGEM	12
2.2 PARÂMETROS ANALISADOS E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS	12
2.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	14
2.4 DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS E CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DA ÁGUA	18
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	21
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
3.2 CLIMA	22
3.3 GEOMORFOLOGIA	24
3.4 HIDROGRAFIA	25
3.5 GEOLOGIA	27
3.5.1 FORMAÇÃO PIRAMBÓIA	29
3.5.2 FORMAÇÃO BOTUCATU	30
3.5.3 FORMAÇÃO SERRA GERAL	31
4 HIDROGEOLOGIA REGIONAL	34
4.1 SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI – SAG	34
4.2 SISTEMA AQÜÍFERO SERRA GERAL – SASG	37
5 HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	39
5.1 SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI – SAG	39
5.2 SISTEMA AQÜÍFERO SERRA GERAL – SASG	40
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 AVALIAÇÃO DA TIPOLOGIA DAS ÁGUAS DO SAG	41
6.2 CONDICIONANTES GEOESTRUTURAIS	58

6.3 ESCOAMENTO DAS ÁGUAS DO SAG.....	63
6.4 QUALIDADE DAS ÁGUAS DO SAG.....	66
7 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros analisados e métodos analíticos.....	13
Tabela 2: Classificação pela importância de ânions e cátions.....	15
Tabela 3: Classificação de acordo com a temperatura.....	15
Tabela 4: Classificação segundo o conteúdo de sólidos dissolvidos.....	16
Tabela 5: Classificação quanto ao grau de dureza.....	17
Tabela 6: Classificação quanto ao grau de mineralização.....	18
Tabela 7: Análises físico-químicas das águas coletadas nos poços do SASG e do SAG na área da Bacia Hidrográfica do Paraná III.....	53
Tabela 8: Análises físico-químicas das águas coletadas nos poços do SASG e do SAG na área da Bacia Hidrográfica do Paraná III.....	54
Tabela 9: Dados sobre a cota do terreno, profundidade dos poços e espessuras de basaltos e de arenitos de poços da Bacia Hidrográfica do Paraná III que seccionaram o SAG.....	62
Tabela 10: Dados dos poços localizados na bacia localizados dentro e fora da Bacia Hidrográfica do Paraná III.....	65
Tabela 11: Padrão de aceitação para consumo humano segundo ministério da saúde para substâncias na área de estudo.....	66
Tabela 12: Classes de salinidade para águas de irrigação.....	68
Tabela 13: Classificação de culturas em relação à tolerância aos sais.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.....	22
Figura 2: Principais rios da Bacia Hidrográfica do Paraná III.....	26
Figura 3: Área de ocorrência do SAG.....	33
Figura 4: Localização dos poços.....	35
Figura 5: Gráfico dos cátions das águas do SAG da área de estudo.....	42
Figura 6: Gráfico dos ânions das águas do SAG da área de estudo.....	43
Figura 7: Comportamento dos íons segundo o confinamento da área.....	43
Figura 8: Gráfico da relação Bicarbonato x Carbonato.....	44
Figura 9: Localização dos poços SAG dentro e fora da bacia hidrográfica do Paraná III.....	45
Figura 10: Gráfico dos fluoretos da área de estudo.....	46
Figura 11: Variação de concentração de Flúor (ppm) com a profundidade.....	47
Figura 12: Gráfico do STD da área de estudo.....	48
Figura 13: Gráfico da temperatura da área de estudo.....	49
Figura 14: Gráfico da dureza da área de estudo.....	51
Figura 15: Gráfico do sódio e do potássio da área de estudo.....	52
Figura 16: Diagrama de Piper.....	55
Figura 17: Diagrama de Stiff	57
Figura 18: Principais lineamentos da área de estudo.....	59
Figura 19: Imagem Landsat dos lineamentos da área de estudo.....	61
Figura 20: Secção geológica.....	67
Figura 21: Imagem Landsat com as cotas dos poços e do SAG da área de estudo.....	69

RESUMO

Nesta dissertação é apresentada a tipologia das águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG), em especial, e do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), bem como sobre a estruturação tectônica que afeta os dois aquíferos mencionados, na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Paraná III que está localizada no extremo oeste do Estado do Paraná. O SAG encontra-se confinado com mais de 600 m de basaltos sobre ele. As suas águas são sulfatadas ou cloretadas, com teores de sólidos totais dissolvidos (STD) acima de 1.000 mg/L e com predominância do íon sódio sobre o cálcio e o magnésio. As águas do SASG que sofrem forte influência do SAG, mesmo com perfurações seccionando apenas 180 m de basaltos, são mistas e similares em todos os aspectos físico-químicos com as águas do SAG, inclusive com temperatura superior a 30°C. Ainda que as águas do SAG estejam sendo destinadas, na região, para fins turísticos, elas também podem ser usadas para abastecimento público, desde que diluídas em proporções adequadas com águas superficiais. O intenso sistema de falhamentos geológicos na região, predominantemente com direções SE-NW, representam zonas de descarga do SAG, inclusive recarregando o SASG. O SAG é composto por vários compartimentos hidrogeológicos causados por esses falhamentos geológicos e por intrusões de diques de diabásio, sendo que cada um deles possui uma dimensão própria. Em razão da complexidade desses sistemas aquíferos em termos da sua distribuição no espaço, da altura da carga hidráulica de cada compartimento hidrogeológico e da idade da água, acima de 20.000 anos, ainda não existem dados científicos suficientes para uma compreensão sobre os processos de recarga do SAG na região. As águas do SAG, na área de estudo, não são adequadas para irrigação, devido à alta condutividade elétrica e a alta concentração de sódio.

ABSTRACT

This paper presents particularly the water typology of the SAG - Sistema Aquífero Guarani (GAS - Guarani Aquifer System). It also comprises the SASG - Sistema Aquífero Serra Geral (SGAS - Serra Geral Aquifer System) as well as the tectonic structure that affects both of the referred aquifer systems, encompassed in the Bacia Hidrográfica do Paraná III (Paraná III Hydrographic Basin) located on the west frontier of Paraná State.

The SAG is confined and overlaid by basalt of over 600m. Its waters are cl-Na-So₄ with dissolved total solids contents (TSD) above 1.000 mg/L, and a predominance of ion sodium over calcium and magnesium.

The SASG waters which are strongly influenced by the SAG even under perforations of only 180m, are mixed and similar to the SAG waters in all physical/chemical aspects including at temperatures above 30o C.

The SAG waters, although directed to the tourism industry, can be used as a public water supply provided being diluted in adequate proportions with the superficial waters. The intense geological faults system in the area, predominantly in the SE-MW directions, represent the SAG discharge zones, concurrently recharging the SASG.

The SAG is composed by several hydrological compartments caused by those faults and by the intrusion of diabase dykes, each of them having proper dimensions. On account of the complexities of these aquifer systems in terms of their spatial distribution, of the hydraulic head of each hydro-geological compartment, and of the water age being over 20,000 years, so far there are not sufficient scientific data for bringing out an understanding of the SAG recharge in the region. The SAG waters under study are not suitable for irrigation due to their high electrical conductivity and high sodium concentration as well.

1 INTRODUÇÃO

Tem sido freqüentemente reportado pela mídia que as águas armazenadas no Sistema Aqüífero Guarani (SAG) representam a grande solução para o abastecimento das populações que habitam nas regiões onde ele ocorre. Esse tipo de divulgação tem sido feito nos últimos anos de forma sensacionalista, criando expectativas irreais e totalmente fora do contexto da relação entre a disponibilidade da água armazenada neste aqüífero e a demanda, atual e futura.

Recorrendo aos estudos publicados nos últimos anos (ROSA FILHO, SALAMUNI e BITTENCOURT, 1987; ROSA FILHO *et al.*, 2000; BITTENCOURT *et al.*, 2003; SOUZA, 2004; BORGHETI; BORGHETI e ROSA FILHO, 2004; ROSA FILHO *et al.*, 2005; HINDI, 2007) pode-se constatar que, pelo menos no Estado do Paraná, mais do que 50% de sua área de ocorrência predominam águas que não são potáveis na sua condição de “água bruta”. Essas áreas estão situadas na região central, oeste e sudoeste do Paraná, onde, via de regra, existe uma cobertura de basaltos cuja espessura é superior a 600 m.

Tendo em conta a elevada temperatura de suas águas em regiões de grande confinamento, elas podem ser aproveitadas para diversos usos, tal como é descrito por Borghetti; Borghetti; e Rosa Filho (2004).

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento da população mundial, a uma taxa média de 1,7% ao ano e o crescimento das cidades, desencadearam uma série de fatores relacionados aos recursos hídricos, tais como a elevada demanda por água, a extração excessiva dos aquíferos, o desperdício, o uso irracional, a poluição, a contaminação e a degradação dos mananciais (BORGHETI; BORGHETI e ROSA FILHO, 2004).

Esses fatores associados à sua baixa disponibilidade ou escassez em várias regiões do planeta, certamente levarão a uma crise de água em poucas décadas, mesmos nos países onde a água doce é abundante.

Em virtude dessa situação, a utilização das águas subterrâneas tem se transformado numa alternativa viável, sobretudo onde as águas superficiais tornam-se cada vez mais poluídas, além de constituir um meio de acelerar o desenvolvimento econômico e social sustentável de regiões extremamente carentes.

A viabilidade da utilização desse recurso é decorrente de algumas de suas características: elas são cerca de 100 vezes mais abundantes que as águas superficiais, constituindo uma importante reserva estratégica, e não necessitam, via de regra, de tratamento prévio para o consumo, uma vez que são filtradas e depuradas pelos processos biogeoquímicos do subsolo.

Sendo assim, poder-se-ia supor que as águas do SAG pudessem ser utilizadas apenas para o abastecimento da população. No entanto, diante do termalismo de suas águas com suas múltiplas aplicações, fica demonstrada a viabilidade de sua exploração econômica, e também, porque suas águas não se apresentam potáveis em toda a região de sua ocorrência.

A exploração desse recurso termal, dito de baixa entalpia, tem um desenvolvimento muito recente. Calefação e refrigeração, empreendimentos na agricultura e aquícultura, entre outras, são algumas das aplicações mais conhecidas e estendidas dentro da utilização dos fluidos termais, sendo que a maioria dessas aplicações requer temperaturas acima 35 °C.

Este tipo de recurso hídrico pode ser utilizado multidisciplinarmente à medida que vão sendo resfriadas. Entende-se que é a maneira mais racional de se utilizar desse tipo de recurso.

Por exemplo, no Mabu Thermas & Resorts, em Foz do Iguaçu, as águas termais do Guarani, com temperaturas médias de aproximadamente 31° C, após circularem nas piscinas de recreação são conduzidas até os tanques de peixes, proporcionando o crescimento desses animais acima da média obtida em seu habitat natural, nas épocas frias, e protegendo-os das doenças comuns de inverno, como os fungos que podem acabar com plantéis inteiros.

A instalação de centros hidrotermais e hidroterapêuticos representam uma forma de promoção de receita de expressivo significado econômico baseado no turismo termal, especialmente se bem distribuídas geograficamente.

As águas quentes, atuando como um atrativo turístico, podem representar ainda uma espécie de “âncora” para o desenvolvimento do turismo integrado nas regiões do Brasil onde ocorre o SAG, a exemplo de como é feito no nordeste do Uruguai, onde as termas de Paysandú e Salto (Arapey, Dayman e Guavijú) representam o segundo pólo turístico do país.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é caracterizar a tipologia das águas do SAG com base nos resultados de análises físico-químicas das águas coletadas dos poços, bem como estabelecer os padrões de lineamentos estruturais delineados sobre o SASG para a compreensão dos deslocamentos de blocos do SAG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MÉTODO DE AMOSTRAGEM

Neste trabalho, as águas foram coletadas dos poços, o mais próximo possível do seu ponto de saída, com frascos de polietileno de 2,5 L, lavados e esterilizados previamente no Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) da UFPR.

No momento da coleta, o frasco era enxaguado com água do poço e enchido completamente, de forma a evitar a presença de bolhas de ar no interior do frasco. Não se fez nem acidificação, tampouco filtração de amostras no campo.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor e transportadas para o LPH, onde foram mantidas a uma temperatura de 4 °C.

As medidas do pH, temperatura e condutância específica da água, foram realizadas no campo, utilizando-se um condutivímetro modelo LF 325 e um pHmetro modelo pH 325.

2.2 PARÂMETROS ANALISADOS E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As substâncias dissolvidas na água encontram-se sob a forma de íons simples ou de associações iônicas (complexos). As concentrações totais dessas espécies e seus parâmetros físicos-químicos e organolépticos foram determinadas conforme está demonstrada na tabela 1.

TABELA 1 - PARÂMETROS ANALISADOS E MÉTODOS ANALÍTICOS.

PARÂMETRO	MÉTODO ANALÍTICO
Acidez	Titulometria
Alcalinidade à fenolftaleína	Titulometria
Alcalinidade total	Titulometria
Bicarbonatos	Titulometria
Bióxido de carbono livre	Titulometria
Cálcio	Titulometria
Carbonatos	Titulometria
Cloretos	Titulometria
Coliformes fecais	Substrato cromogênico definido
Coliformes totais	Substrato cromogênico definido
Condutância específica	Condutivímetro
Cor	Colorímetro
Dureza total	Titulometria
Ferro solúvel	Absorção Atômica
Ferro total	Absorção Atômica
Fluoretos	Espectrofotometria UV
Fosfatos	Espectrofotometria UV
Hidróxidos	Titulometria
Magnésio	Titulometria
Nitratos	Espectrofotometria UV
Nitritos	Espectrofotometria UV
Nitrogênio amoniacal	Espectrofotometria UV
Nitrogênio Kjendal total	Espectrofotometria UV
Nitrogênio orgânico	Espectrofotometria UV
Oxigênio consumido em meio ácido	Titulometria
Oxigênio dissolvido	Titulometria
pH	pH-metro

Cont.

PARÂMETRO	MÉTODO ANALÍTICO
Potássio	Fotometria de chama
Sílica dissolvida	Espectrofotometria UV
Sódio	Fotometria de chama
Sólidos suspensos totais	Gravimetria
Sólidos totais a 103 °C	Gravimetria
Sólidos totais dissolvidos	Gravimetria
Sulfato	Turbidimetria*
Temperatura	Termômetro
Turbidez	Turbidímetro

*Método turbidimétrico adaptado ao espectrofotômetro visível (420nm) com limite de detecção de 1 mg/L.

2.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

O estudo da classificação da água quanto ao seu conteúdo iônico depende de análises físico-químicas que representem fielmente a composição da água no seu estado natural. Os parâmetros analisados estão descritos a seguir.

Classificação segundo a importância dos ânions e cátions

A classificação e denominação da água são definidas pelo cátion ou ânion dominante. Se nenhum deles corresponder a mais de 50% da soma dos cátions ou ânions, dá-se o nome dos mais abundantes, com o nome dos ânions precedendo o nome dos cátions.

Segundo Schoeller (1962) e Custódio e Llamas (1983), as relações entre ânions são referenciadas com algarismos e entre cátions com letras. Os tipos possíveis estão apresentados na tabela 2 que, combinados entre si dão um total de 36 classes de água.

TABELA 2- CLASSIFICAÇÃO PELA IMPORTÂNCIA DE ÂNIONS E CÁTIONS.

TIPO	ÂNIONS	TIPO	CÁTIONS
1	$rCl^- > rSO_4^{-2} > rHCO_3$	a	$rNa^+ > rMg^{+2} > rCa^{+2}$
2	$rCl^- > rHCO_3 > rSO_4^{-2}$	b	$rNa^+ > rCa^{+2} > rMg^{+2}$
3	$rSO_4^{-2} > rCl^- > rHCO_3$	c	$rMg^{+2} > rNa^+ > rCa^{+2}$
4	$rSO_4^{-2} > rHCO_3 > rCl^-$	d	$rMg^{+2} > rCa^{+2} > rNa^+$
5	$rHCO_3 > rCl^- > rSO_4^{-2}$	e	$rCa^{+2} > rNa^+ > rMg^{+2}$
6	$rHCO_3 > rSO_4^{-2} > rCl^-$	f	$rCa^{+2} > rMg^{+2} > rNa^+$

FONTE; SCHOELLER (1962).

Quanto à temperatura da água

O termalismo é uma propriedade importante, pois pode ser aplicada com fins terapêuticos. Em geral, as classificações quanto à temperatura são relativas ou apresentam limites de temperatura amplos ou grande número de classes.

Nessa dissertação foi adotada a classificação de Custódio e Llamas (1983) (tabela 3), pois essa classificação leva em consideração apenas a temperatura absoluta da água, com as seguintes divisões:

TABELA 3- CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A TEMPERATURA.

Muito fria	$T < 5^\circ C$
Fria	$5 < T < 10^\circ C$
Moderadamente Fria	$10 < T < 18^\circ C$
Morna	$18 < T < 25^\circ C$
Moderadamente morna	$25 < T < 37^\circ C$
Quente	$37 < T < 42^\circ C$
Muito Quente	$T > 42^\circ C$

FONTE: CUSTÓDIO E LLAMAS (1983).

Quanto aos Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

A concentração de STD é uma indicação geral da adequabilidade da água para diferentes usos.

De um modo geral, considera-se que a água que contenha menos de 1.000 mg/L de STD é satisfatória para o abastecimento público (Portaria 518 do Ministério da Saúde). A classificação de águas, em função do conteúdo de STD, é apresentada na tabela 4.

Nesta dissertação, a escala adotada foi àquela proposta por Davis e Dewiest (1966) por ser específica para águas subterrâneas.

TABELA 4- CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O CONTEÚDO DE STD.

DAVIS ; DEWIEST (1966)	STD (mg/L)	HEM (1970)	STD (mg/L)
Água doce	0 – 1.000	Levemente salina	1.000 – 3.000
Água salobra	1.000 – 10.000	Moderadamente salina	3.000 – 10.000
Água salgada	10.000 – 100.000	Muito salina	10.000 – 35.000
Salmoura	> 100.000	Salmoura	> 35.000

FONTE: DAVIS E DEWIEST (1966) E HEM (1970).

Quanto a Dureza total

Para Estrada (1986), citado por Hindi, (1999), a dureza total (Dt) é a soma das durezas individuais dos íons do cálcio e magnésio, sob a forma de carbonatos e bicarbonatos.

Em geral, águas provenientes de regiões de basaltos, arenitos ou granitos são brandas ou moles, e aquelas provenientes de regiões onde ocorrem calcários, calcários dolomíticos, mármore ou depósitos de gipsita, são, em geral, duras.

Segundo Custódio e Llamas (1983), a dureza total pode ser expressa pela soma das durezas temporária e permanente. O teor de cálcio e magnésio presente na água expresso como carbonato de cálcio, é calculado da seguinte forma:

$$Dt = [Ca^{2+}] \times [(CaCO_3)/(Ca)] + [Mg^{2+}] \times (CaCO_3)/(Mg)$$

$$Dt = 2,497 [Ca^{2+}] + 4,115 [Mg^{2+}]$$

Onde $[Ca^{2+}]$ e $[Mg^{2+}]$ são as concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} expressas em mg/L, determinadas nas análises químicas.

O grau de dureza varia de muito duro a mole ou branda, e são expressos em mg/L de $CaCO_3$. Neste trabalho foi utilizada a classificação de Custódio e Llamas (1983), conforme tabela 5.

TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE DUREZA.

Grau	Dureza Total (mg/L)
Mole	$Dt < 50$
Ligeiramente dura	$50 < Dt < 100$
Moderadamente dura	$100 < Dt < 200$
Muito dura	$Dt > 200$

FONTE: CUSTODIO E LLAMAS (1983).

Quanto ao Grau de mineralização

Para Davis e Dewiest (1966), a Condutividade Elétrica é a capacidade de um cubo de um centímetro de aresta conduzir corrente elétrica. Segundo Hem (1970), no estado natural, a água apresenta condutividade elétrica diretamente proporcional à quantidade de íons dissolvidos.

Essa propriedade permite conhecer de forma rápida e aproximada o grau de mineralização de uma determinada água. A Tabela 6 é uma modificação da classificação apresentada por Castany (1975) adotada por Hindi (1999), e mostra os diversos graus de mineralização em função da condutividade elétrica.

TABELA 6- CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE MINERALIZAÇÃO.

Mineralização	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Muito baixa	$\sigma < 100$
Baixa	$100 < \sigma < 200$
Média Baixa	$200 < \sigma < 335$
Média	$335 < \sigma < 665$
Alta	$665 < \sigma < 1.000$
Muito Alta	$1.000 < \sigma$

FONTE: CASTANY (1975).

2.4 DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS E CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DA ÁGUA

A representação gráfica de dados hidroquímicos permite a avaliação, interpretação e comparação dos processos envolvidos na evolução química da água, a partir de amostras de um mesmo ponto, coletadas em épocas diferentes ou, de amostras coletadas em vários locais.

Os principais tipos de diagramas hidroquímicos são: os colunares; circulares e de setores; os poligonais e radiais; os de colunas verticais aritméticas

e logarítmicas; os triangulares; os gráficos x-y; e os mapas hidrogeoquímicos, cujas aplicações e modo de construção são encontrados em Schoeller (1962); e Custódio e Llamas (1983). Nesta dissertação, foram utilizados os diagramas colunares.

Para a classificação geoquímica da água será aplicado o diagrama de Piper e de Stiff.

O diagrama de Piper baseia-se na abundância relativa dos íons mais comuns nas águas naturais. Esse diagrama permite relacionar 8 variáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2}) em três campos triangulares, sendo um para cátions e outro para ânions, e o outro onde são lançados valores percentuais relacionados ao total de cátions e ânions (Σ cátions = 100% e Σ ânions = 100%).

Os dois pontos gerados são projetados no losango central para mostrar, através de um único ponto, o caráter químico geral da água, de acordo com as concentrações relativas de seus íons maiores expressas em mg/L.

O diagrama de Stiff permite comparar os distintos grupos de águas quanto aos íons predominantes. É útil para realizar uma comparação visual rápida entre água de diferentes pontos amostrados. Quanto maior for a área da forma poligonal, maior a concentração dos íons maiores.

Por último, foi realizada a análise de salinização das águas e os resultados foram plotados no diagrama de SAR, para saber se as águas do SAG na área de estudo, enquadram-se ou não dentro dos padrões de qualidade para as diversas culturas existentes na região.

Nesse diagrama, o sódio é avaliado com base na razão de adsorção de sódio (SAR), para saber se as águas do SAG na área de estudo enquadram-se ou não dentro dos padrões de qualidade para as diversas culturas existentes na região.

Esta razão, conhecida na literatura da língua inglesa como SAR (Sodium Adsorption Ratio) é utilizada, juntamente com a condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C), para a classificação da água para fins de irrigação, indicando se a água é apropriada ou não para tais fins. Quanto maior for o SAR, menos apropriada a

água será para fins de irrigação. O SAR é uma razão que indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo e é calculado através da seguinte equação:

$$\text{SAR} = \frac{\text{rNa}}{\sqrt{\frac{\text{rCA} + \text{rMg}}{2}}}$$

2.5 CONDICIONANTES ESTRUTURAIS

Com relação aos condicionantes estruturais, foi feita a descrição e interpretação de dados estruturais e morfoestruturais obtidos através da interpretação de campo e de imagens landsat, identificando-se os lineamentos contínuos e mais importantes na área de estudo.

Após a identificação desses grandes lineamentos, foi feita uma interpretação cujo objetivo foi o de estabelecer um padrão de lineamentos estruturais delineados sobre o SASG para a compreensão dos deslocamentos de blocos do SAG.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Bacia Hidrográfica do Paraná III, (figura 1) no extremo oeste do Estado do Paraná, numa região onde afloram rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. O relevo varia pouco, entre ondulado e suave ondulado, com altitudes entre 300 e 700 m ANM.

Nessa bacia hidrográfica, as principais drenagens são representadas pelos rios São Francisco Falso, Taturi, Ocoí, Chocoró, Arroio Fundo e São Vicente. Todos eles deságuam no lago de Itaipu.

A referida bacia tem uma área total de 8.389 km², estando ocupada por uma população de aproximadamente 997.500 habitantes que se distribuí em 27 municípios.

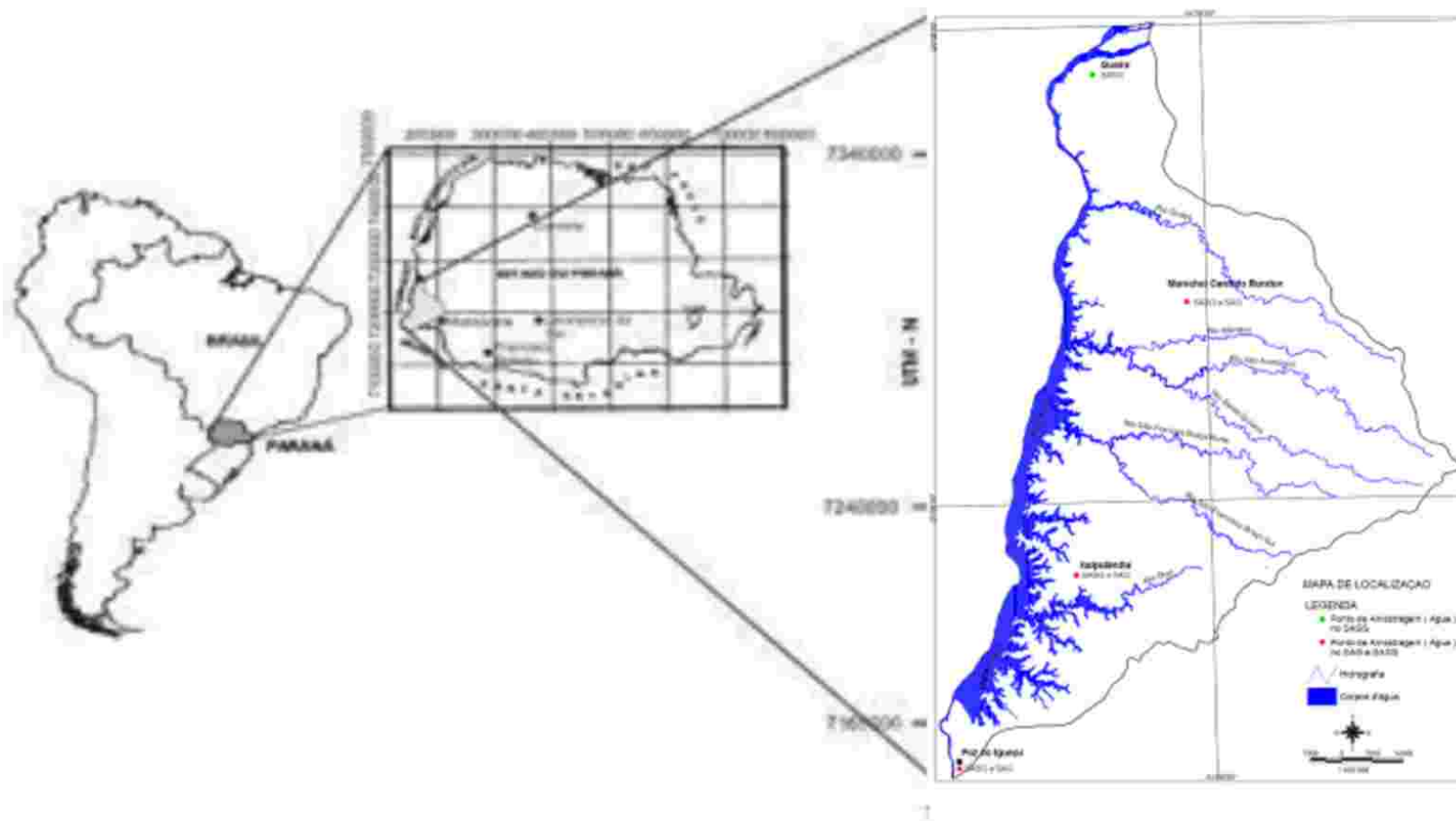


FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.2 CLIMA

Inicialmente, Maack (1968) definiu um mapa climático para o Estado do Paraná. Embora essa classificação seja estruturalmente simples, permite uma delimitação inequívoca das regiões climáticas do Estado.

Esse mapa foi redefinido por Godoy e Corrêa (1974), através da interpretação e avaliação de séries temporais hidrometeorológicas mais abrangentes.

Através dos dados pluviométricos disponíveis e das médias de temperaturas estimadas, foram identificadas, na região de estudo, dois tipos climáticos:

- a) Cfa – com verão quente; (a)- temperatura do mês mais quente acima de 22° C.
- b) Cfb – com verão fresco; (b) – temperatura do mês mais quente abaixo de 22° C.

A maior parte do 3º Planalto é representado pelo clima “Cfa”. Esse clima abrange as áreas que se estendem às margens dos rios Paranapanema e Paraná, até os limites dessas áreas com as regiões e altitudes situadas entre 600 e 800 m ANM. Caracterizam-se por apresentar um clima subtropical úmido, mesotérmico, com verão quente sem estação seca no inverno, bem definida e geadas menos frequentes. O restante da área, que abrange as regiões serranas e de superfície de planalto, caracteriza-se por apresentar estações de verão amenas e chuvosas todos os anos, sendo, portanto, de tipo “Cfb”.

3.3 GEOMORFOLOGIA

A área de interesse desse trabalho está situada no 3º Planalto Paranaense (Maack, 1968), correspondendo esse, segundo Almeida (1964), à província do Planalto Ocidental.

Maack (1968) descreve em seu trabalho que as linhas orográficas principais do 3º Planalto Paranaense são formadas, em suas maiores extensões, por escarpas de estratos e planaltos que declinam suavemente nas direções oeste e noroeste. Segundo este autor, essas feições geomorfológicas são delimitadas pelos divisores de água dos principais traços de drenagens, a exemplo dos rios Tibagi, Ivaí, Piquiri e Iguaçu. De conformidade com esse condicionamento estrutural, o 3º Planalto Paranaense é dividido nas seguintes regiões geográficas naturais: a) Planalto de Cambará e São Jerônimo da Serra; b) Planalto de Apucarana; c) Planalto de Campo Mourão; d) Planalto de Guarapuava; e) Planalto de Palmas.

A área de estudo está inserida no Planalto de Guarapuava, que constitui a porção meridional do 3º Planalto Paranaense. Essa área está situada entre os rios Piquiri e Iguaçu. Junto à escarpa da Serra da Boa Esperança, as áreas alcançam cotas de 1.250 m ANM, pendendo para 350 m ANM até a Serra do Boi Preto/São Francisco. A partir desse último acidente topográfico na área correspondente ao Baixo Iguaçu, o declínio topográfico acentua-se ainda mais, atingindo 197 m ANM. Segundo Maack (1968), a base do Cânion do Rio Iguaçu encontra-se entre 45 e 49 m ANM.

No âmbito regional, o 3º Planalto Paranaense limita-se a leste pela escarpa Triássico-Jurássica, formada pelos arenitos da Formação Botucatu e Pirambóia e pelas rochas ígneas da Formação Serra Geral. Geomorfologicamente, trata-se de uma escarpa sinuosa, formada por uma intensa atuação erosiva da borda do planalto arenítico-rochas ígneas.

3.4 HIDROGRAFIA

Para Maack (1968), o complexo hidrográfico do Estado do Paraná abrange dois grandes sistemas: a Bacia Atlântica, cuja área representa apenas 7,3% do território paranaense; e a Bacia do Rio Paraná. Segundo o autor citado, os cursos dos rios dessa bacia hidrográfica penetram para o interior do continente formando o complexo hidrográfico da Bacia do Rio da prata, que deságua no Oceano Atlântico.

As linhas e queda desses rios são rejuvenescidas por meio de levantamentos epirogenéticos. O delineamento em altiplanos escalonados, formando sucessivos degraus que são representados pelas linhas de escarpa, determina a ocorrência de saltos e corredeiras, que constituem aspectos característicos no maior numero de cursos de água do complexo hidrográfico da Bacia Hidrográfica do Paraná III.

De maneira geral, os rios da Bacia Hidrográfica do Paraná III possuem sentido de escoamento para oeste condicionados fortemente ao aspecto estrutural refletido sobre as rochas da Formação Serra Geral.

A área de estudo faz parte do complexo hidrográfico da Bacia Hidrográfica do Paraná III e seus cursos de água de maior destaque são: São Francisco Falso; Taturi; Ocoí; Chocoró; Arroio Fundo; e São Vicente, sendo que todos deságuam no lago de Itaipu (figura 2).

3.5 GEOLOGIA

Segundo Zalán *et al.* (1987), a Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica com aproximadamente 1.600.000 km² que está localizada na América do Sul, sendo que 1.100.000 Km² situa-se em território brasileiro. Esta depressão foi formada no continente Gondwana, em função da subsidência termal da crosta após múltiplas colisões durante o ciclo Orogênico Brasileiro-Panafricano.

A Bacia do Paraná é preenchida por mais de 6.000 m de espessuras de rochas sedimentares e vulcânicas, agrupadas em seis supersequências que de acordo com Milani e Ramos (1998), são as seguintes: 1 Rio Ivaí (Ordovício-Siluriano); 2 Paraná (Devoniano); 3 Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico); 4 Gondwana II (Neotriássico); 5 Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo); e 6 Bauru (Neocretáceo). De acordo com os referidos autores, as três primeiras supersequências correspondem aos grandes ciclos transgressivos paleozóicos, enquanto que as demais são representadas por sedimentação continental e rochas ígneas associadas.

Nos trabalhos de Soares *et al.* (1973), Zalán *et al.* (1987) e Rostirolla *et al.* (2003), é citado que durante o preenchimento da Bacia do Paraná antigas falhas do embasamento foram várias vezes reativadas, influenciando a distribuição e a espessura das unidades sedimentares.

A supersequência Rio Ivaí corresponde ao primeiro ciclo de sedimentação da bacia durante o Neordovinciano ao Eoseluriano (MILANI e RAMOS 1998).

Essa supersequência é representada pelo Grupo Rio Ivaí e caracteriza-se por conglomerados, arenitos continentais e marinho da Formação Alto Garças, por diamictitos glacial da Formação Iapó, e por folhelhos marinhos transgressivos e arenitos marinhos regressivos da Formação Vila Maria.

De acordo com Zalán *et al.* (1987), a supersequência Paraná é representada por uma espessa sucessão de arenitos litorâneos e marinhos da Formação Furnas e pelos folhelhos marinhos com intercalação de arenitos deltaicos da Formação Ponta Grossa. Os folhelhos da Formação Ponta Grossa, depositados no Devoniano, são considerados importante rocha fonte de hidrocarbonetos na bacia.

A supersequência Gondwana I compreende desde a sedimentação sob influência glacial, ocorrida durante o Neocarbonífero, até o domínio da acumulação na forma de dunas eólicas no Eotriássico. Do Neocarbonífero ao Eopermiano, depositou-se o Grupo Itararé sob a influência glacial, atingindo a espessura de até 1.500 m de sedimentos. França e Potter (1988) descreveram três ciclos deposicionais condicionados pelo avanço e recuo das geleiras. Estes ciclos iniciam com a deposição de arenitos finos a grossos e culminaram com a deposição de siltitos e diamictitos.

Sobrepostos ao Grupo Itararé, ocorrem arenitos e siltitos da Formação Rio Bonito, depositados inicialmente em ambientes deltáicos.

Para Schneider *et al.* (1974.), a Formação Palermo, em que ocorre o predomínio de siltitos com bioturbações, depositou-se sob condições marinha transgressiva de águas rasas.

A Formação Irati, sobreposta, é constituída por folhelhos escuros, margas e calcários, sucedidos por folhelhos carbonáticos, siltitos, arenitos finos, camadas de calcário e níveis de coquina da parte regressiva da supersequência, pertencentes às Formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto, na porção sul da bacia.

Segundo Milani (1997), os depósitos eólicos e fluviais caracterizam a Formação Pirambóia, relacionados à progressiva sedimentação continental no início do Mesozóico. Para este autor, a supersequência Gondwana II representa a sedimentação continental no período Triássico, que inclui os estratos flúvio-lacustres da Formação Santa Maria, restrita a porção sul da bacia.

As Formações Botucatu e Serra Geral integram a supersequência Gondwana III. Enquanto a Formação Botucatu registra uma morfologia das dunas com uma notável preservação das estruturas características do regime eólico, a Formação Serra Geral registra a quebra do supercontinente Gondwana, acompanhada por erupção de um volumoso e extensivo fluxo de lavas, também marcada por subsidência e intrusão de diques e *sills* de diabásio.

A supersequência Bauru corresponde essencialmente a arenitos continentais (Grupos Bauru e Caiuá) que sobrepõem às lavas e completam o preenchimento da Bacia do Paraná.

Ainda sobre a Bacia do Paraná, pela sua importância citamos os trabalhos de Milani *et al.* (1998), Scherer (1998), Faccini (2000), Faccini *et al.* (2003) e Zerfass *et al.* (2003), os quais estão entre os mais recentes.

3.5.1 FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

Com relação aos arenitos da Formação Pirambóia, destaca-se o estudo de Pacheco (1927), que foi o proponente desta denominação.

A Formação Pirambóia foi formalmente definida como unidade litoestratigráfica por Soares (1975), cujo termo cunhado por Gonzaga Campos (1889) citado por Salumuni e Bigarella, (1967), tinha apenas a conotação Litológica.

Tal como foi observado por Soares (1975) e por Soares e Assine (1992), a Formação Pirambóia é formada por camadas predominantemente arenosas, ocorrendo clásticos finos, em repetição cíclica, o que significa uma alternância, na vertical, da fácies fluvial canal e de transbordamento.

Lavina (1989) descreve um episódio de desertificação na Bacia do Paraná representado pela Formação Pirambóia, o que indicaria o início de um importante episódio de continentalização da bacia. Segundo Dutta (1988), estes processos culminariam com os ergs da Formação Botucatu, a qual apresenta unidades correlatas em quase todo o Gondwana.

Nessa linha, Caetano-Chang et al. (1991), Caetano-Chang & Wu (1992; 1993 a, b; 1994; 1995; 1996 a, b); Lavina e Faccini (1993); de Milani et al. (1994); e Brighetti e Caetano-Chang (1995) apontaram a dominância eólica na sedimentação da Formação Pirambóia, em que associações de fácies de dunas, interdunas (úmidas e secas) e lençóis de areia, cortadas por fácies de canais fluviais temporários, compõem uma sucessão de subambientes interrelacionados lateral e verticalmente. Caetano-Chang (1997), em extensiva análise envolvendo estudos faciográficos, petrográficos e estratigráficos, mostrou que a unidade é formada por interessante associação de fácies eólicas, amplamente dominantes, e fácies fluviais subordinadas.

Para Caetano-Chang (1997, 2002), a porção basal da Formação Pirambóia foi depositada em condições de meta-saturação em areias, ressaltada pela facilogia onde abundam depósitos de interdunas úmidas e de *overbank* e lençóis de areia com campos de dunas esparsos. As porções média e superior da unidade, por outro lado, exibem substancial aumento no suprimento de areias, com o desenvolvimento de *ergs* saturados dominantes.

Finalmente destacam-se os trabalhos de Donatti *et al.* (2001) e de Milani (2004), os quais trataram a Formação Pirambóia como uma unidade predominantemente eólica com intercalações produzidas por efêmeros canais fluviais de pequeno porte.

3.5.2 FORMAÇÃO BOTUCATU

A Formação Botucatu foi originalmente definida por Campos (1899), o qual a designou como uma unidade constituída por arenitos vermelhos sobrepostos a Formação Pirambóia.

Dentre os estudos sedimentológicos e estratigráficos, destacam-se os trabalhos elaborados por Mezzalana (1981), Soares (1973, 1975), Scheider *et al.* (1974) e Caetano-Chang e Wu (1993). Segundo Soares (1973, 1975), a Formação Botucatu é composta por uma fácies torrencial na base e eólica no topo. Para

Soares (1973), a superfície pré-Pirambóia representa uma superfície de peneplanização, a qual corta as camadas das Formações Rio do Rasto, Estrada Nova, Itararé-Aquiduaana e rochas cristalinas do escudo Brasileiro.

Segundo Petri e Fúlfaro (1983), essa formação é constituída predominantemente por arenitos com seleção variando de regular a boa, classe modal dominante de areia fina, ocorrendo pouca matriz. Localmente, ocorrem arenitos conglomeráticos (Fáceis Torrencial) que são freqüentes no terço inferior da formação. É característica dessa formação a presença de estratificação de grande porte, correspondendo a um empilhamento de corpos prismáticos ou cuneiformes, achatados, podendo alcançar espessuras da ordem de 20 metros.

Nos trabalhos de Milani et al. (1994) e Donatti *et al.* (2001), consta que o contato da Fácies Torrencial (Formação Botucatu) em relação à Formação Pirambóia é sob a forma de discordância angular.

Nos trabalhos mais recentes de: Matos (1995); Caetano-Chang (1997); Gianinni (2001); Gianinni et al (2004) e Assine; Piranha e Carneiro (2004), mostram que a sedimentação da Formação Botucatu ocorreu num sistema eólico seco diferentemente da Formação Pirambóia que ocorreu num sistema eólico úmido.

3.5.3 FORMAÇÃO SERRA GERAL

As rochas vulcânicas das Bacias do Paraná formam uma das maiores províncias de basaltos do planeta, recobrando $1,2 \times 10^6$ km² da Bacia do Paraná, com idades variando entre 127-137 Ma (Turner *et al.*, 1994; Mantovani *et al.*, 1995). As rochas são predominantemente máficas - basaltos e basaltos andesíticos de filiação tholeiítica (> de 90% do volume). Rochas félsicas (riodacitos e riolitos), podem ocorrer no topo da sequência vulcânica (~ 4% do volume) e são mais expressivas no RS e SC.

Esse espesso pacote de rochas vulcânicas foi definido como Formação Serra Geral por White (1908), como se pode observar na Figura 4. Tendo em vista

as heterogeneidades petrogenéticas, geoquímicas e geocronológicas dessas rochas, várias propostas para uma divisão estratigráfica desse pacote litológico foram surgindo com o decorrer do tempo. Na década de oitenta, foram propostas individualizações de grandes conjuntos litológicos, como a divisão das rochas ácidas nos tipos Palmas e Chapecó (Piccirillo *et al.*, 1988). Geoquimicamente as rochas foram divididas inicialmente em dois grupos (alto Ti e baixo Ti), em função do teor de TiO_2 e de elementos incompatíveis (Rüegg, 1975; Bellieni *et al.*, 1984).

Posteriormente, foi proposta uma classificação complementar que considera os conteúdos e relações entre Sr, Ti, Y e Zr, resultando em seis tipos magmáticos: Urubici e Pitanga (alto Ti), Paranapanema e Ribeira (Ti intermediário), Gramado e Esmeralda (baixo Ti) (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997). Uma nomenclatura baseada em critérios múltiplos de identificação faciológica, incluindo além de dados geoquímicos e geocronológicos, características estruturais e texturais que permitam cartografar as diferentes unidades foi proposta por Wildner (2004), sendo o magmatismo Serra Geral dividido em dez fácies. Da evolução dessa pesquisa, incluindo estudos de estruturas tridimensionais, surgiu a proposta de denominar essas rochas vulcânicas de Grupo Serra Geral, que foi dividido em doze Formações relacionadas ao magmatismo máfico – Esmeralda, Campos Novos, Alegrete e Gramado (baixo Ti/Y), Paranapanema, Campo Erê, Cordilheira Alta e Capanema (Ti/Y intermediário), Novas Laranjeiras, Pitanga, Urubici e Ribeira (alto Ti/Y) – e quatro Formações relacionadas ao magmatismo félsico – Várzea do Cedro e Palmas (baixo Ti), Ourinhos e Chapecó (alto Ti- Zr) – (WILDNER *et al.*, 2007).

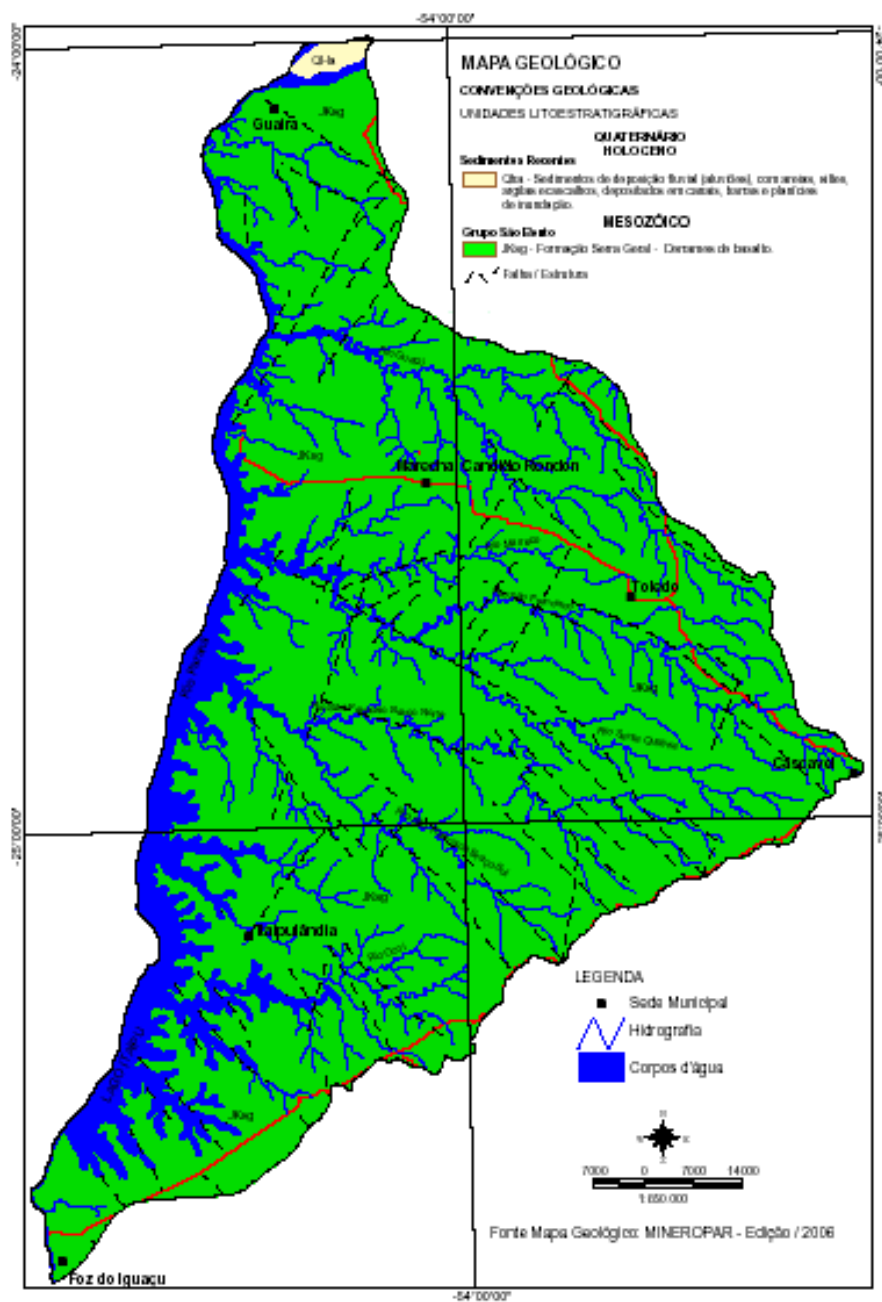


FIGURA 3 – Formação Serra Geral na área de estudo

4 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

4.1 SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI – SAG.

No Brasil o SAG compreende as unidades litoestratigráficas formadas pelos arenitos eólicos da Formação Botucatu e pelos sedimentos flúvio-lacustres das Formações Pirambóia e Rosário do Sul.

Segundo Araújo *et al.* (1995), no Estado do Paraná o SAG ocupa uma área de aproximadamente 131.300 Km², cerca de 15% da porção brasileira do aquífero, (figura 4).

Rebouças (1976) definiu as formações Botocatu e Pirambóia como Sistema Aquífero Botocatu estimando uma reserva permanente de 48.000 Km³, com valores de permeabilidade (K) variando de 10⁻³ e 10⁻⁴ cm/s e porosidade variando entre 16 e 24%.

Segundo Rosa Filho *et al.* (1998), o SAG foi denominado pelo Geólogo uruguaio Danilo Anton, em Homenagem a nação Guarany que habitava a área de abrangência dos afloramentos durante a época de ocupação da América do Sul pelos portugueses e espanhóis.

Com relação à sua espessura, Strugale (2000) registrou variações de 5 a 80 m na para a Formação Pirambóia, enquanto que para a Formação Botucatu seria da ordem de 70 m.

No Estado do Paraná, segundo informações dos poços perfurados pela Sanepar, Petrobrás e Paulipetro, a espessura máxima do SAG está situado na cidade de Altônia com 417 m, enquanto que a espessura mínima seria de 9 m na cidade de Grandes Rios.

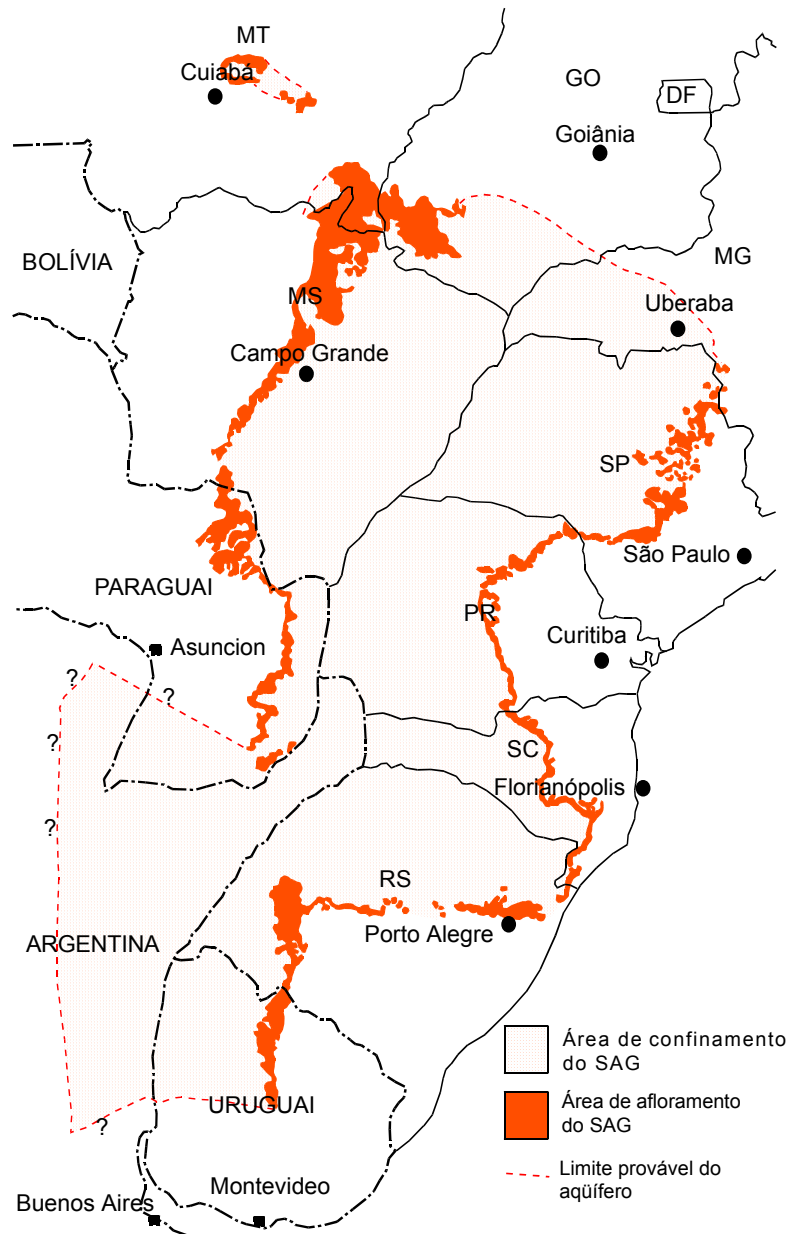


FIGURA 4 - ÁREA DE OCORRÊNCIA DO SAG. FONTE: HINDI (2007).

Rosa Filho *et al.* (2000) descreveram que a partir das áreas de descarga, existe uma tendência para águas mais alcalinas no sentido de fluxo subterrâneo, acompanhado por aumento de pH, do teor de sais e da temperatura atingindo até 65 °C. Segundo estes autores, essa evolução hidroquímica regional estaria sendo controlada pelo grau de confinamento do SAG, bem como pela velocidade de circulação e pelo tempo de residência das águas.

De acordo com Sracek e Hirata (2002), existe uma evolução de águas bicarbonatadas sódicas com concentrações significativas de cloretos e sulfatos nas zonas de alto confinamento. A adição de cloretos e sulfatos estaria relacionada com a dissolução de evaporitos como NaCl e mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou gipsita e difusão de produtos de dissolução da Formação Pirambóia.

Segundo Souza (2004), os valores de pH variam de 4.5, no poço de Ribeirão do Pinhal – PR, até valores acima de 9,5, caso dos poços termais de Foz do Iguaçu. As concentrações de sódio nas zonas aflorantes são menores do que 5mg/L, e alcançam valores acima de 200mg/L, nas zonas de alto confinamento. A alcalinidade também 15 mg/L nas áreas de recarga para valores acima de 240 mg/L, nas áreas de franco confinamento.

No trabalho de Rosa Filho, Salamuni e Bittencourt (1987), foi observado que na composição das águas subterrâneas do SASG existem vários pontos de contribuição das águas do SAG.

No trabalho de Bittencourt (1996) está descrito a possibilidade de contaminação dos aquíferos Botucatu, Pirambóia e Serra Geral por soluções originadas de formações paleozóicas sotopostas, conduzidas através de sistemas de fraturas.

Uma conectividade hidráulica entre o SASG e o SAG também foi observada em trabalhos mais recentes, de Portella Filho (2002) e de Strugale (2002) através da aeromagnetometria, bem como por Souza (2004), por Rosa Filho *et al.* (2005) e por Hindi (2007). Estas três últimas citações estão baseadas em estudos geoestruturais, associados com análises de dados hidroquímicos.

No trabalho de Rosa Filho *et al.* (2005), são descritos cinco famílias das águas do SAG na porção Centro-Norte do Estado do Paraná, que são as seguintes: bicarbonatadas cálcicas; bicarbonatada sódica; bicarbonatada cálcica com teor elevado de sódio; mista sódica; e sulfatada-cloretada sódica. Esse último tipo coincide com a as águas analisadas na Bacia Hidrográfica do Paraná III.

Em relação à qualidade Machado (2005) afirma que o SAG apresenta estruturas em camadas que se superpõem a muitos aquíferos com potencialidades variadas e ao contrário do que se imaginava suas águas nem sempre apresentam potabilidade em toda sua área de ocorrência.

4.2 SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL – SASG

No trabalho de Araújo *et al.* (1995), o Sistema Aquífero Serra Geral refere-se ao aquífero constituído pelas rochas ígneas da Formação Serra Geral. Este Aquífero também ocorre nos Estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso, bem como na Argentina, no Paraguai e no Uruguai. A sua ocorrência no Estado do Paraná está restrita ao 3º planalto com uma área aproximada de 110.000 Km². O mergulho regional dessas rochas ocorre em direção leste/sudoeste, com as cotas de 1.100 metros da borda leste e 209 metros na Foz do Rio Iguaçu. A espessura máxima dessa formação no Estado do Paraná é de 1.400 m ANM na região de Alto Piquiri.

No trabalho de Bittencourt (1978), é mencionada a possibilidade de ocorrência de altos teores de álcalis, em certas amostras de águas subterrâneas, em razão de estar relacionada com sistemas de fraturamentos que alcançaram o SAG.

O trabalho de Fraga (1986) descreve a possibilidade de interconexão entre os sistemas SASG e SAG. Este autor levou em conta o fato que a tipologia química das águas do SASG é Bicarbonatada Cálcica a Cálcica Magnesiana. No entanto, a fácies de água Bicarbonatadas sódicas representaria uma possível

mistura com águas do SAG, revelando áreas de condicionamento estrutural que permitiria uma interconexão hidráulica entre esses dois aquíferos.

Posteriormente, Celligoi e Duarte (1994), analisando as águas do SASG, próximo à região de Londrina – PR descreveram a sua tipologia como bicarbonatada cálcica, reafirmando que essas águas estão relacionadas com a mineralogia e natureza química das rochas.

Estudos mais recentes sobre as prováveis alterações químicas das águas do SASG, por águas ascendentes oriundas do SAG, podem ser vistos nos trabalhos de: Portella (2002); Buchmann Filho (2002); Bittencourt *et al.* (2003); Souza (2004); Rosa Filho *et al.* (2005; 2006) e Hindi (2007).

5 HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Na área de estudo afloram os basaltos do SASG, cujas espessuras variam de 632 a 920 m ANM. O armazenamento da água subterrânea no SASG está fundamentalmente relacionado às discontinuidades geológicas, a exemplo de falhamentos e fraturamentos, sendo que no contato entre cada derrame de lavas, da ordem de 25 m de espessura média, também pode existir a circulação da água.

A influência desta estruturação regional no contexto hidrogeológico da área, foi evidenciada com base nos dados hidrogeológicos dos poços localizados na Bacia Hidrográfica do Paraná III. A principal influência diz respeito à geometria do aquífero na forma de variações com relação à na cota do topo do arenito.

5.1 SISTEMA AQUÍFERO GUARANI – SAG.

O conjunto de sedimentos na área de estudo, incluindo os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, varia de 70 a 125 m.

Subjacentes aos reservatórios onde se encontram as águas armazenadas do SAG, ocorrem os sedimentos pelíticos da Formação Rio do Rasto, de idade atribuída Paleozóico Superior.

A área foi afetada por um intenso sistema de falhamentos geológicos, predominantemente com direções SE-NW.

5.2 SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL – SASG

As águas coletadas nos poços penetrantes apenas no SASG, sem forte influência do SAG, são do tipo bicarbonatadas cálcicas, onde os STD varia de 161 a 176 mg/L. Predominam, nessas situações, o cálcio sobre o sódio, sendo o pH máximo igual a 7,89 e o conteúdo de fluoretos inferior a 0,1 mg/L (ROSA FILHO, SALAMUNI E BITTENCOURT, 1987).

Esses poços apresentam profundidades inferiores a 180 m, mas a temperatura da água atinge valores de até 28°C. Essas temperaturas mostram que existe uma influência, mesmo que não tão significativas, do SAG sobre o SASG, resultando numa água do tipo mista.

A influência mais nítida do SAG sobre o SASG ocorre nos poços igualmente penetrantes apenas no SASG, mas que apresentam STD entre 1.000 e 2.000 mg/L, com teores de cloretos e sulfatos maiores do que de bicarbonatos, bem como com predominância do sódio sobre o cálcio. Nesses casos, os fluoretos variam de 5 a 8 mg/L, e a temperatura atinge 33 °C.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 AVALIAÇÃO DA TIPOLOGIA DAS ÁGUAS DO SAG.

A espessura dos basaltos sobrepostos ao SAG na Bacia Hidrográfica do Paraná III varia de 540 a 920 m, fato que aponta para uma situação de elevado confinamento onde predominam águas sulfatadas ou cloretadas sódicas, a exemplo do que foi mencionado no trabalho de Hindi (2007).

Sob esta condição, na área de estudo (figura 5) predomina o sódio sobre o cálcio e o magnésio e a concentração de bicarbonato é inferior a de sulfato e de cloretos, conforme é mostrado nas figuras 6 e 7.

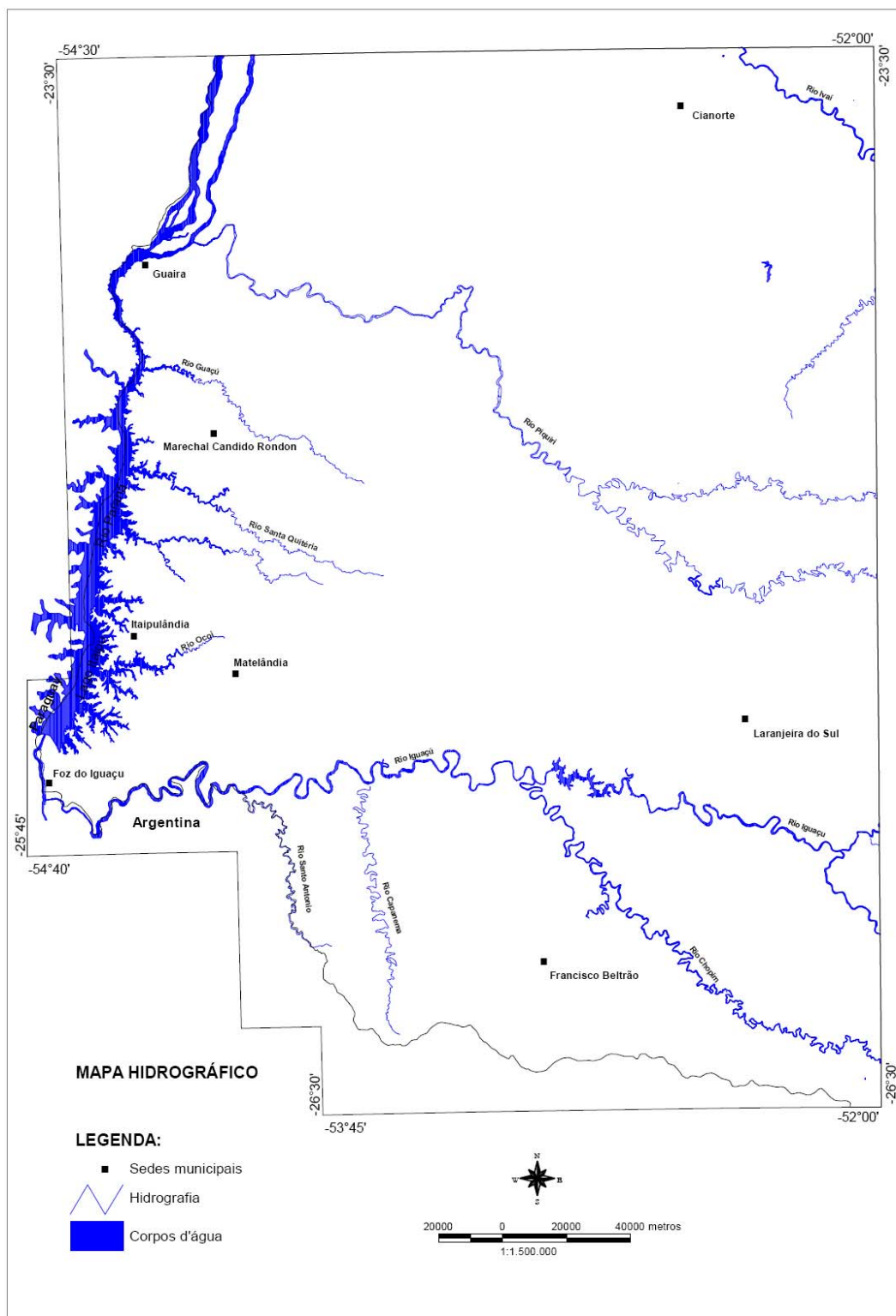


FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS

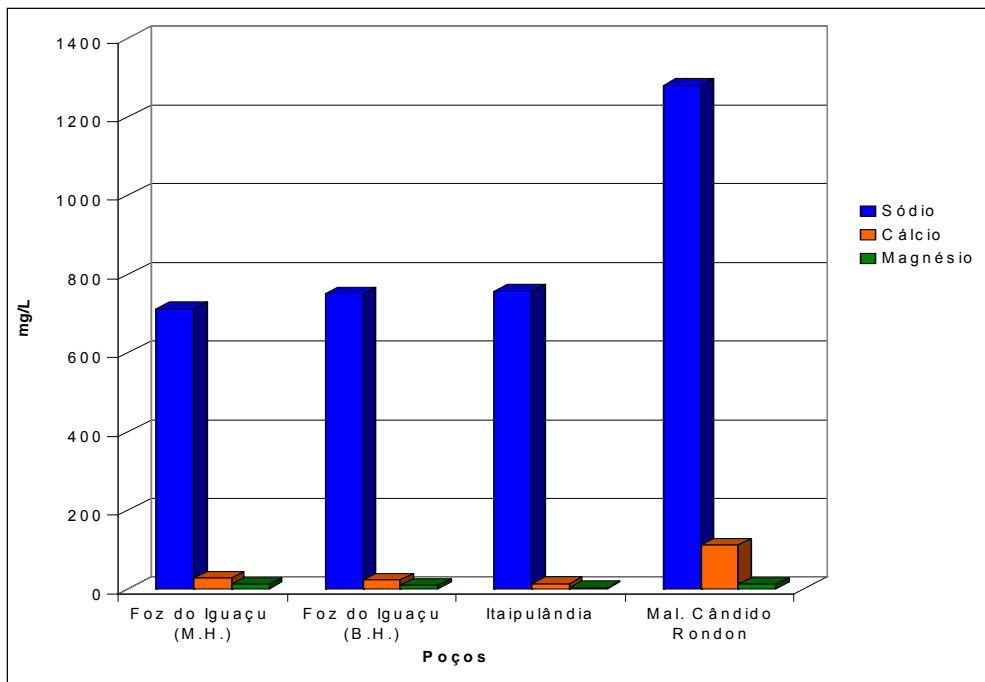


FIGURA 6 - GRÁFICO DOS CÁTIONS DAS ÁGUAS DO SAG.

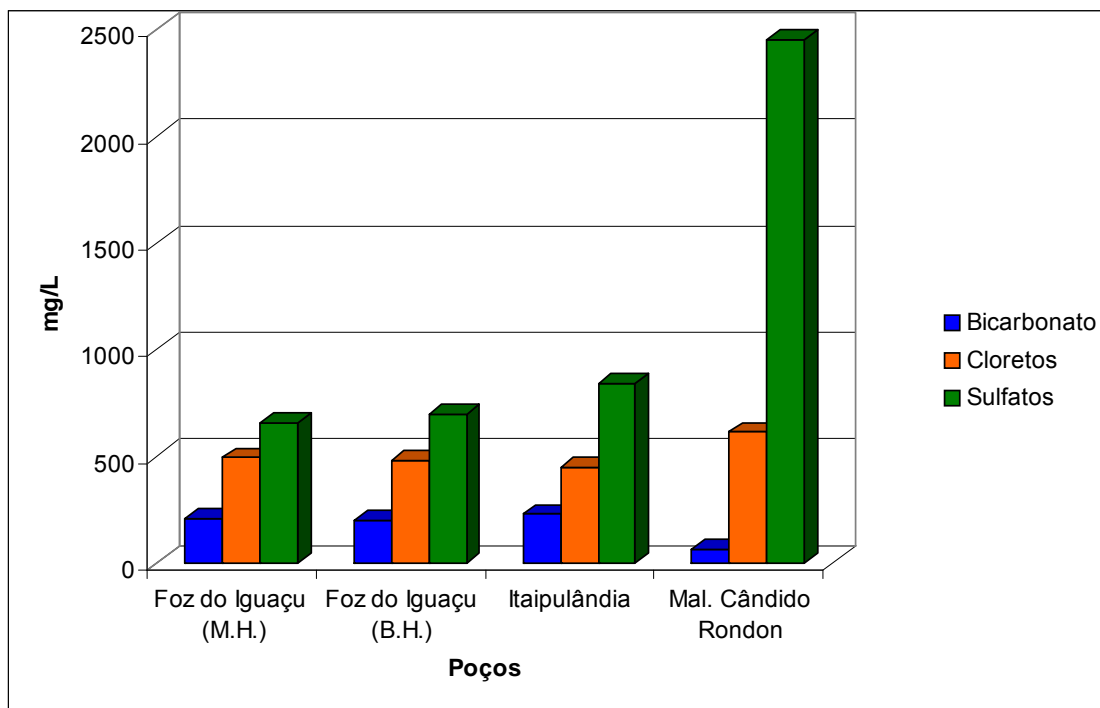


FIGURA 7- GRÁFICO DOS ÂNIONS DAS ÁGUAS DO SAG.

Como a área de estudo situa-se numa zona de alto confinamento, constata-se que as concentrações de sílica dissolvida, de bicarbonato e alcalinidade diminuem à medida que se passa da zona de baixo confinamento para a de alto confinamento (figura 8). Por outro lado, o sódio, os cloretos, os sulfatos e os sólidos totais dissolvidos aumentam suas concentrações no sentido do baixo confinamento para o alto confinamento.

Segundo Schoeller (1962), esse comportamento corresponde à evolução natural da água num aquífero, onde as águas passam gradativamente de bicarbonatadas cálcicas nas proximidades da zona de recarga, a cloretadas sulfatadas sódicas nas zonas mais profundas, indicando um maior tempo de residência da água no aquífero.

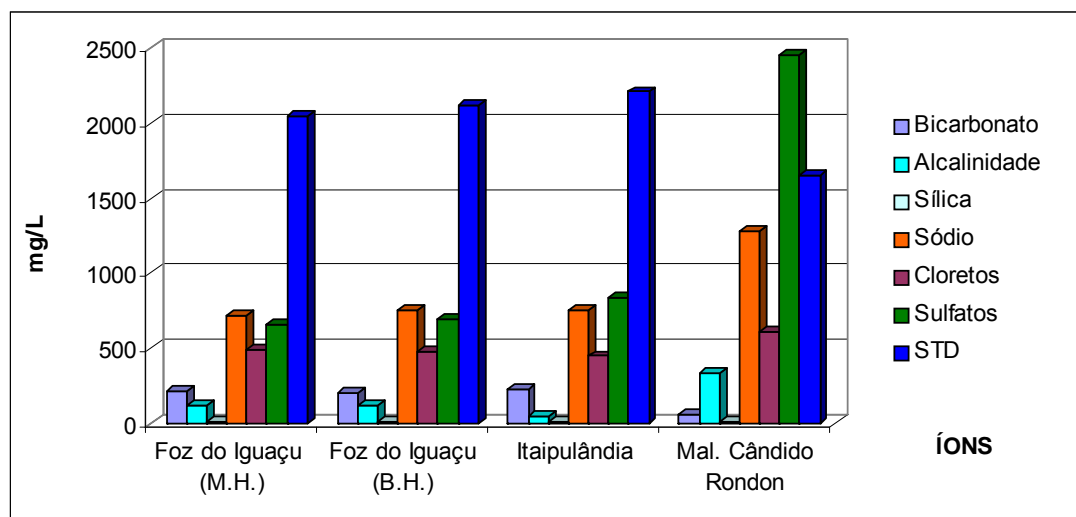


FIGURA 8 - COMPORTAMENTO DOS ÍONS SEGUNDO O CONFINAMENTO DA ÁREA.

A relação de bicarbonato ao carbonato é mostrada na figura 9.

Da mesma forma Bittencourt (1978) e Rosa Filho, Salamuni; Bittencourt (1987), consideram que poços com valores de pH básicos refletem influência da água do SAG sobre a do SASG.

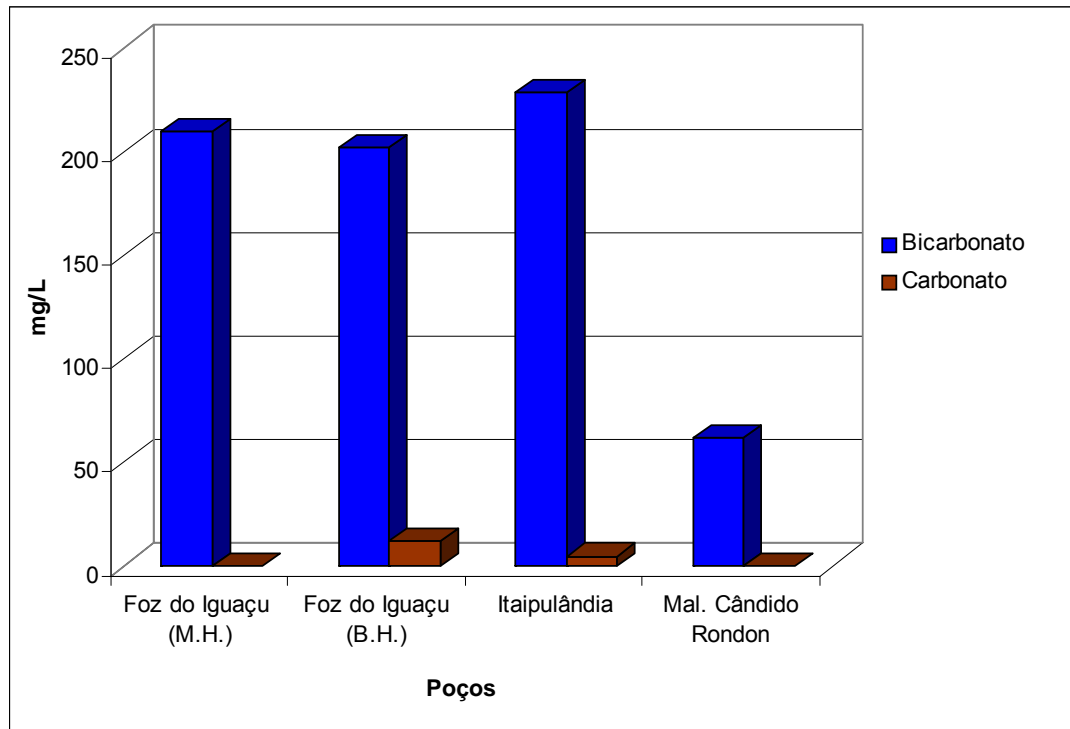


FIGURA 9 - RELAÇÃO BICARBONATO X CARBONATO.

Os poços das águas do SAG, localizados dentro da bacia hidrográfica do Paraná III (figura 10), apresentam teores de fluoretos, os quais são mostrados na figura 11.

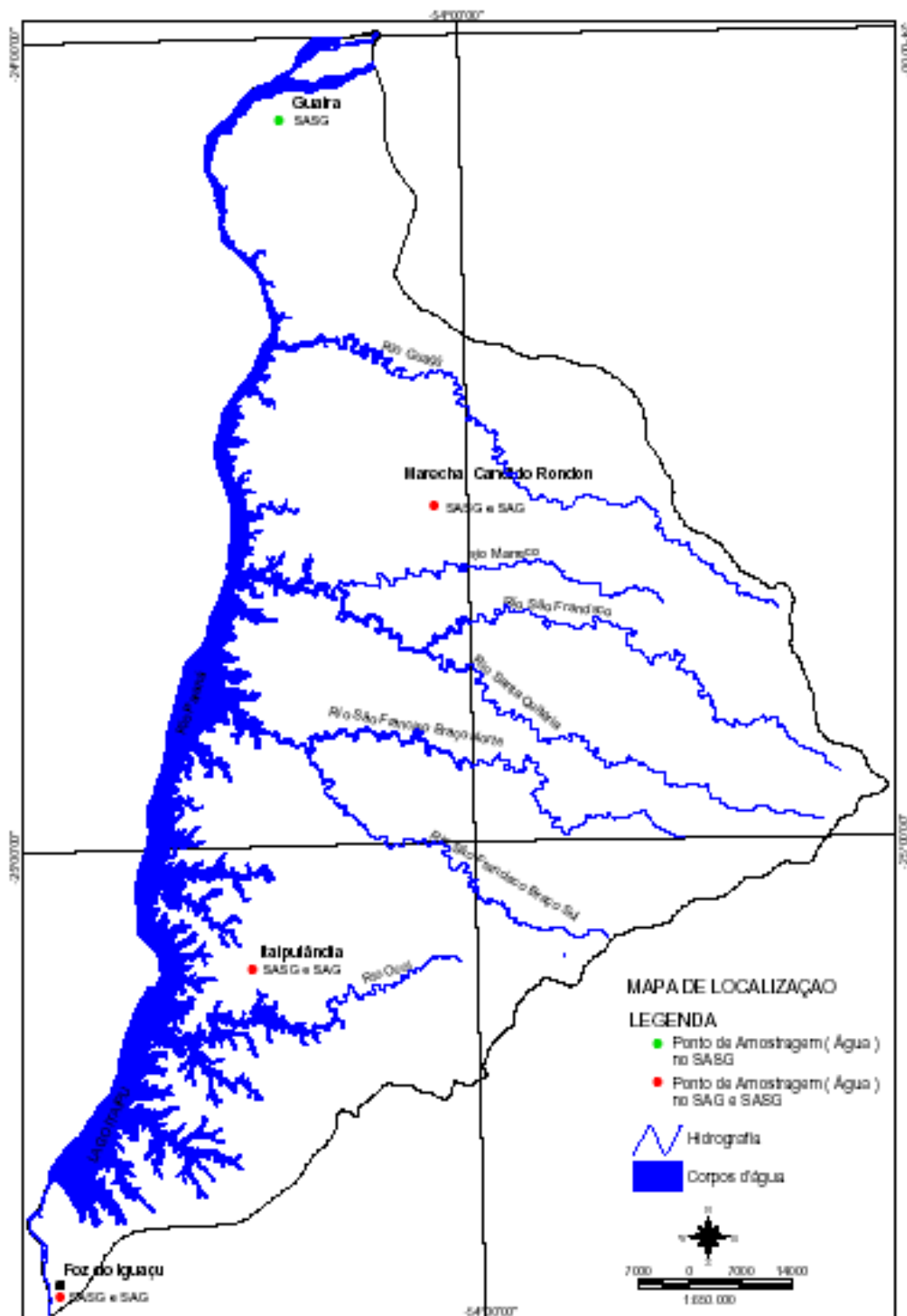


FIGURA 10– LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS SAG DENTRO E FORA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

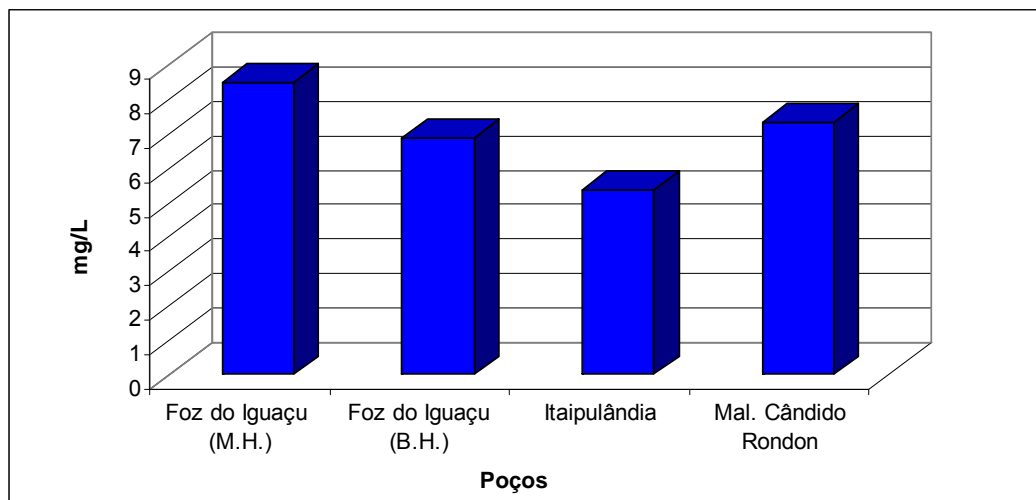


FIGURA 11 -TEORES DE FLUORETOS NA ÁREA DE ESTUDO.

Para Hindi (2007) essas diferenças na distribuição dos fluoretos nas águas do SAG no Estado do Paraná, mostram que o tempo de residência da água ou que as condições de confinamento não exercem forte controle sobre a ocorrência e concentração desse fluoreto nessas águas, sendo mais provável que esteja condicionado às características geológicas locais.

Na área de estudo onde se detectou íon fluoreto acima do padrão de potabilidade, por exemplo, nas cidades de Foz do Iguaçu e de Marechal Cândido Rondon, existe uma coincidência com as áreas com teores mais elevados de fluoretos, revelados no mapeamento geoquímico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001).

Souza Filho (2000) apresenta os resultados analíticos das concentrações de flúor de 6,2 mg/L em amostras de calha, obtidas na perfuração do poço na cidade de Marechal Cândido Rondon.

Nesse poço de Marechal Cândido Rondon, o perfil litológico mostra que de 690 a 770 m ocorreu uma mistura de basalto cinza escuro com basalto avermelhado e de 770 a 794 m, de basalto cinza claro em contato com o SAG. É nesse contato que o arenito registra a maior concentração de flúor.

Os STD apresentam teores entre 1.650 a 2.208 mg/L, enquanto que os valores da temperatura da água atingem valores entre 38 a 41 °C, conforme é mostrado nas figuras 12 e 13.

Relacionando os teores de STD com a escala adotada por Davis e Dewiest (1966) (tabela 4), as águas do SAG são classificadas como salobras.

Com relação à temperatura, Buchmann Filho (2002) descreve que a temperatura média para as águas de poços perfurados no SASG no Estado do Paraná é de 21 °C. Na área de estudo, a temperatura verificada na água dos poços do SASG ficam bem acima dessa média.

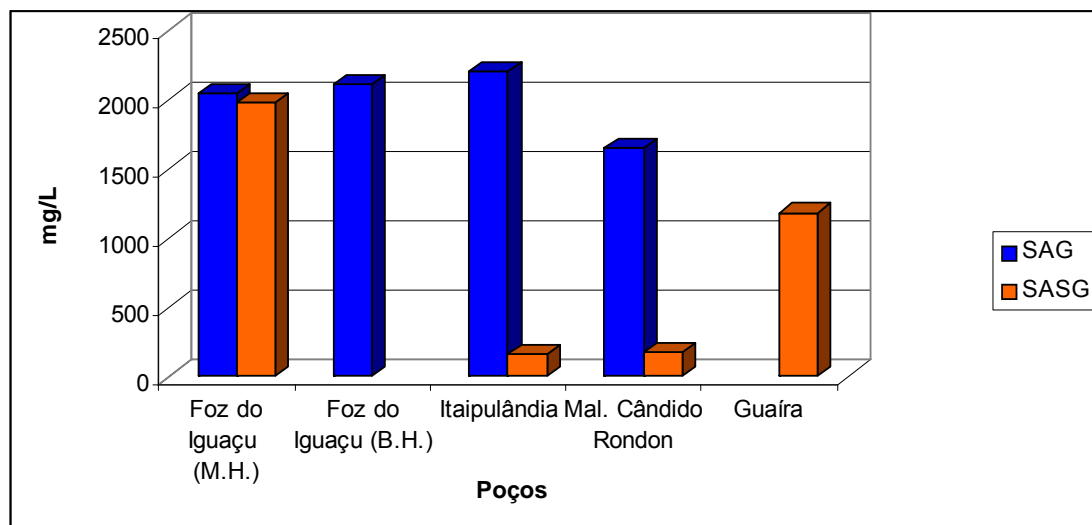


FIGURA 12- GRÁFICO DOS STD DA ÁREA DE ESTUDO.

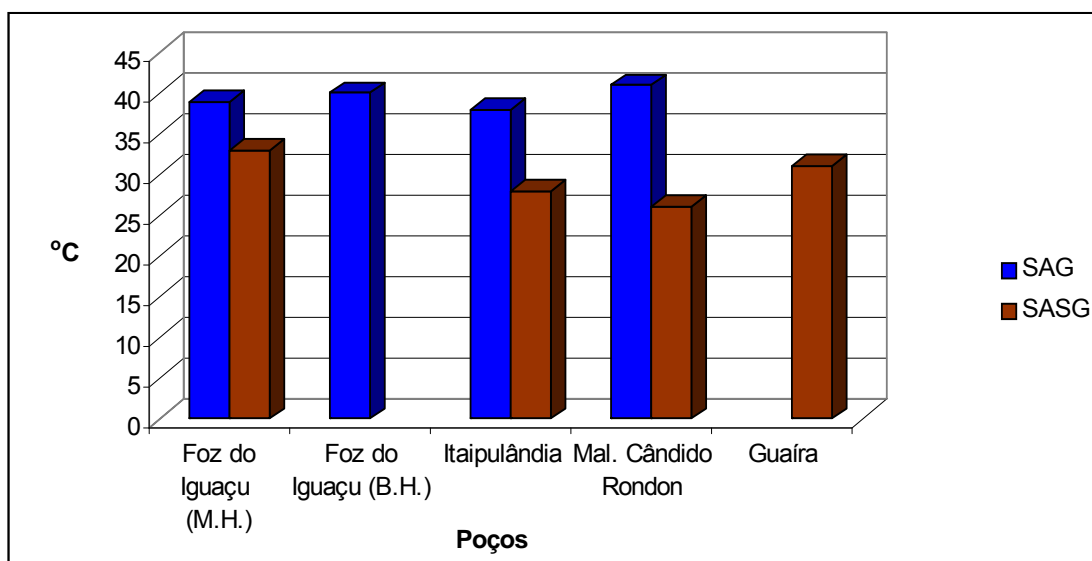


FIGURA 13- GRÁFICO DA TEMPERATURA DA ÁREA DE ESTUDO.

De acordo com a tabela 3, as águas do SAG são classificadas como quentes, enquanto que as águas do SASG são classificadas como moderadamente morna.

A temperatura pode significar uma influência nítida do SAG sobre o SASG, pois os poços perfurados no SASG apresentam profundidades inferiores a 180 m, mas a temperatura da água, em vez de se situarem na faixa de 21 °C, apresentam valores de até 28°C; essas temperaturas mostram que existe uma influência, mesmo que não tão significativas, do SAG sobre o SASG, resultando numa água do tipo mista.

Na área de estudo, a influência mais nítida do SAG sobre o SASG ocorre nos poços igualmente penetrantes apenas no SASG, como por exemplo, os poços de Foz do Iguaçu e Guaíra, os quais apresentam STD entre 1.000 e 2.000 mg/L, com teores de cloretos e sulfatos acima de bicarbonatos, bem como com predominância do sódio sobre o cálcio. Nesses casos, os fluoretos variam de 5 a 8 mg/L e a temperatura atinge 33 °C.

Segundo Hindi (2007), a origem do sódio e do cloreto nas regiões mais profundas do SAG pode ser atribuída à ascensão de águas armazenadas nas formações inferiores, depositadas em ambiente marinho, trazidas para níveis mais rasos pela compressão causada pela sobrecarga dos derrames da Formação Serra Geral.

Quanto à causa da presença de sulfatos, esse mesmo autor descreve que ela pode estar relacionada à oxidação de sulfetos que teria ocorrido na Formação Rio do Rasto, composta essencialmente por sedimentos clásticos, de ambiente sub-aqual raso em condições oxidantes.

De acordo com Bittencourt (1996), os teores de sódio nas zonas de alto confinamento são controlados pelas reações de dissolução da albita e que as concentrações do íon sulfato estariam relacionadas à oxidação dos sulfetos.

Segundo esse autor, o sódio pode servir de indicador para determinar a origem das águas e evidenciar as circulações das mesmas mostrando a realimentação por aquíferos profundos.

Já as águas coletadas nos poços penetrantes apenas no SASG, sem forte influência do SAG, são do tipo bicarbontadas cálcicas.

Segundo Hindi (2007), apesar do aumento do teor de sódio e a diminuição dos teores de cálcio e magnésio, não se verifica o abrandamento das águas que chegam mesmo a ficar duras. Esse fato, ocorre na área de estudo (figura 14), onde as águas coletadas no SAG são classificadas como ligeiramente a moderadamente duras, enquanto que as águas coletadas no SASG são classificadas como ligeiramente duras (tabela 5).

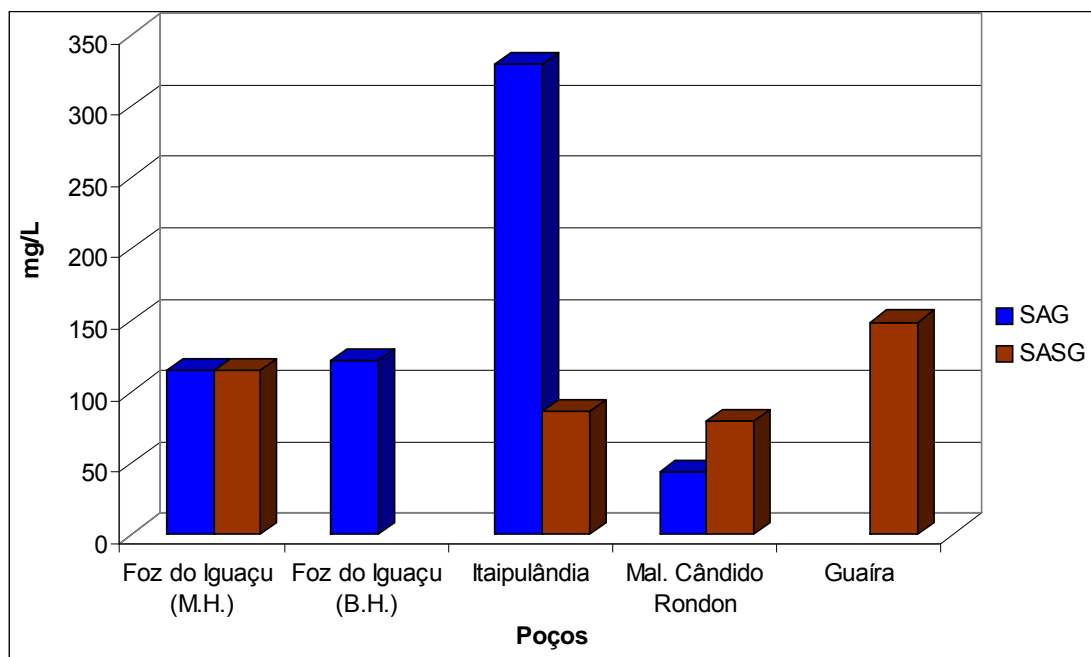


FIGURA 14 - GRÁFICO DA DUREZA DA ÁREA DE ESTUDO.

Com relação ao sódio, Bittencourt (1996) descreve que esse cátion pode servir de indicador para determinar a origem das águas e evidenciar as circulações das mesmas mostrando que aquíferos mais próximos da superfície podem ser alimentados por aquíferos profundos.

Todas as águas dos poços coletadas no SAG possuem teores de sódio entre 712 e 1.280 mg/L e de potássio entre 1,7 a 7,6 mg/L (figura 15). Já as águas dos poços coletadas no SASG possuem teores de sódio entre 7,8 e 646 mg/L e de potássio entre 0,5 e 6,4 mg/L.

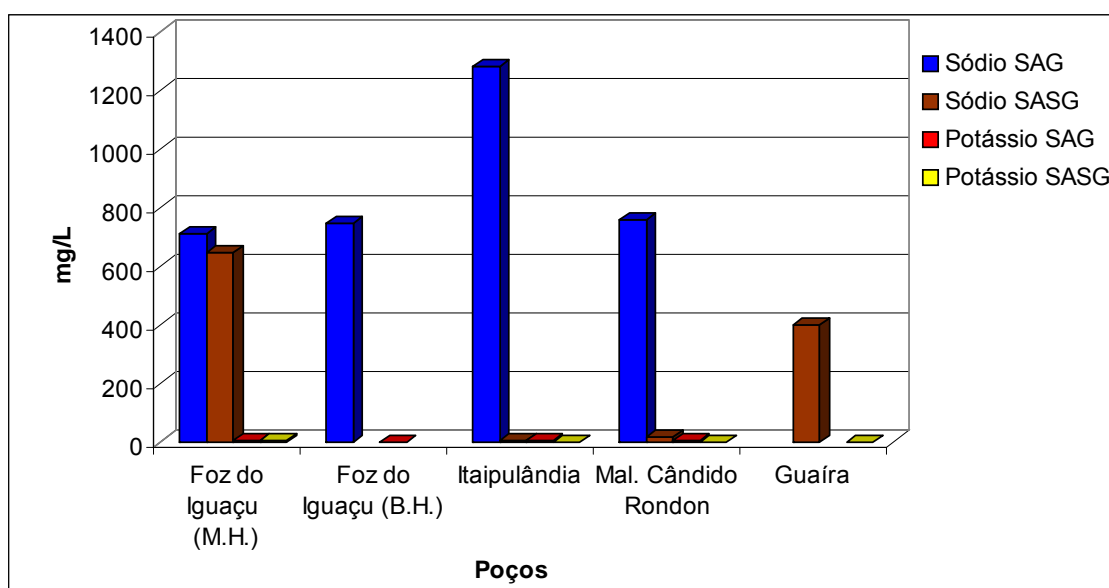


FIGURA 15- GRÁFICO DO SÓDIO E POTÁSSIO DA ÁREA DE ESTUDO

A tabela 7 sintetiza os tipos de água encontradas no SAG na área de estudo e nas proximidades da Bacia Hidrográfica do Paraná III. A classificação foi feita com base nas predominâncias dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ , K^+ e dos ânions HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e Cl^- .

Na tabela 8 são mostradas as concentrações de ânions e cátions em situações onde os poços seccionam o SAG e onde os poços seccionam apenas o SASG.

TABELA 7 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PREDOMINÂNCIA IÔNICA DAS ÁGUAS DO SAG.

LOCALIZAÇÃO	UTM E - W	UTM N - S	PREDOMINÂNCIA IÔNICA	TIPOLOGIA DAS ÁGUAS	
Poços localizados na parte externa da Bacia Hidrográfica do Paraná III					
Francisco Beltrão	266867	7125187	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Bicarbonatada Sódica
Matelândia	204650	7200270	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Cloretada Sódica
Cianorte	335478	7383005	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Cloretada Sódica
Poços localizados na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Paraná III					
Foz do Iguaçu H-M	142831	7167479	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Sulfatada-cloretada Sódica
Foz do Iguaçu H-B	142839	7167471	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Sulfatada-cloretada Sódica
Itaipulândia	172230	7217186	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Cloretada Sódica
Mal. Candido Rondon	197812	7280157	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	Cloretada Sódica

TABELA 8 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS COLETADAS NOS POÇOS DO SASG E DO SAG NA ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

Cidade Poços	Dureza	pH	Temperatura	Sólidos Totais Dissolvidos	Condutividade Elétrica	Sódio Na ⁺	Potássio K ⁺	Cálcio Ca ⁺⁺	Magnésio Mg ⁺⁺	Cloreto Cl ⁻	Bicarbonato HCO ₃ ⁻	Carbonato CO ₃ ⁻⁻	Sulfato SO ₄ ⁻	Fluoreto F ⁻
Água coletada em poços penetrantes no SAG														
Mal. Cândido Rondon	329,0	8,14	38	1650	3260	1280,0	7,6	111,40	12,40	612,00	61,63	0	2450,0	7,35
Itaipulândia	43,9	8,50	41	2208	3570	756,0	4,3	12,80	2,90	448,00	228,90	4,70	840,5	5,40
Foz do Iguaçu (M.H.)	115,18	8,26	39	2051	4980	712,0	6,3	28,11	11,04	491,70	209,60	0	654,0	8,50
Foz do Iguaçu (B.H.)	121,88	8,70	40	2117	4430	750,0	1,7	22,80	9,63	482,48	202,12	11,74	694,6	6,90
Água coletada em poços penetrantes no SASG														
Mal. Cândido Rondon	79,27	7,89	26	176	228	15,6	0,5	26,24	3,38	0,60	131,21	0	0,5	0,09
Itaipulândia*	86,01	7,63	28	161	200	7,8	0,7	22,94	7,05	1,15	110,80	0	0,5	0,11
Foz do Iguaçu (M.H.)*	114,76	8,65	33	1983	5004	646,0	6,4	31,52	8,87	482,00	247,30	5,45	636,2	8,20
Guaira*	148,53	7,20	31	1182	1906	400,0	2,7	42,77	9,67	265,46	116,58	0	347,4	5,40
VMP**	500	-	-	1000	-	200	-	-	-	250	-	-	250	1,5

Observações: Os valores dos parâmetros estão expressos em mg/L, exceto o pH e a condutividade elétrica (µS/cm).

* Poços penetrantes no SASG, próximos de poço do SAG sem revestimento. ** VMP = Valor Máximo Permitido, de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde

O diagrama de Piper (figura 16) mostra claramente a separação de três grupos das águas coletadas nos poços perfurados no SASG e SAG na área de estudo. O primeiro grupo é o das águas coletadas no SAG, as quais, apresentam uma tipologia cloretada-sulfatada-sódica; o segundo grupo é o das águas coletadas no SASG que apresentam uma tipologia bicarbonatadas cálcicas, típica desse aquífero; e por último, aparecem o grupo das águas do SASG coletadas nos poços de Foz do Iguaçu e Guaíra (de águas misturadas).

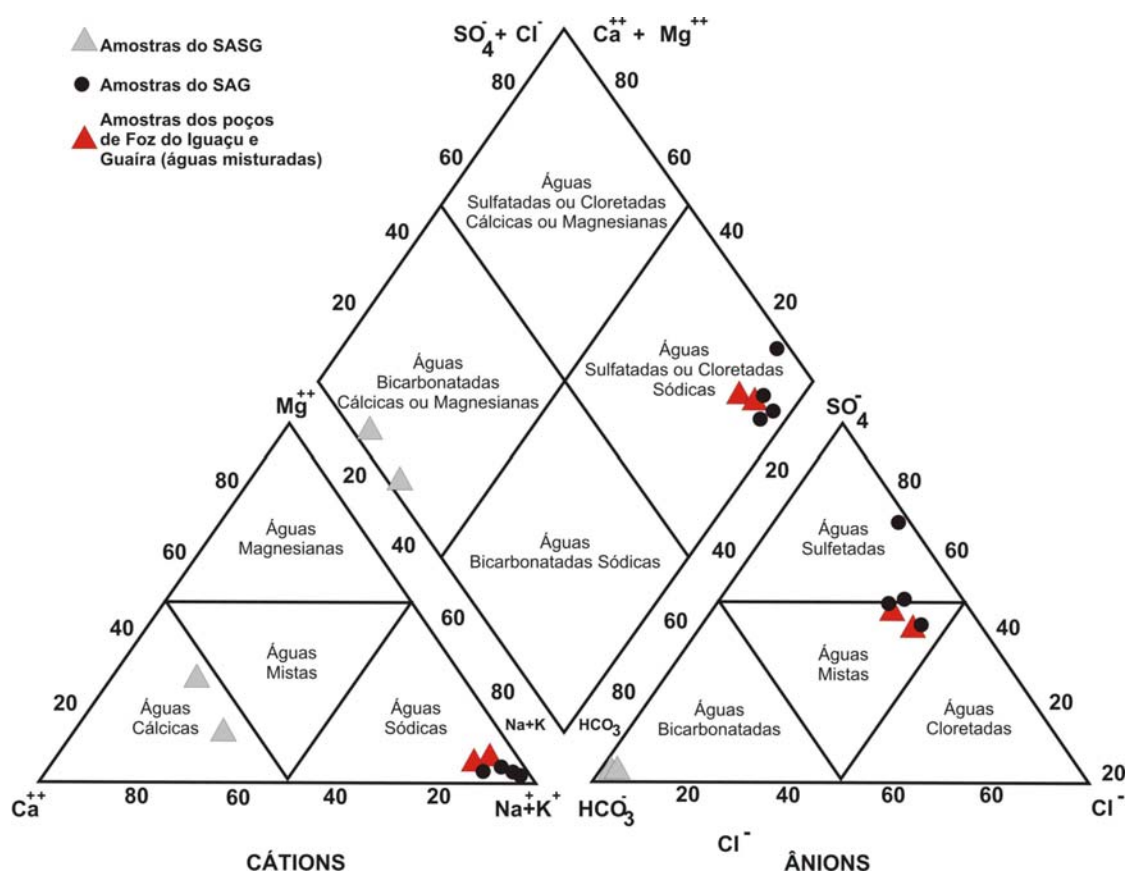


FIGURA 16- DIAGRAMA DE PIPER DE ÁGUAS COLETAS EM POÇOS PENETRANTES NO SASG E NO SAG, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

A figura 17 mostra a variação das fácies hidroquímicas na área de estudo. Nesse diagrama observa-se que existem três tipos de águas, segundo suas características químicas.

As tipologias das águas que estão na cor verde correspondem às águas do SASG, apresentando uma tipologia de águas bicarbonatadas cálcicas; na cor vermelha, apresenta uma composição química intermediária entre as águas do SAG e SASG; e, por último, na cor azul é de composição química cloretada-sulfatada sódica, típica das águas do SAG.

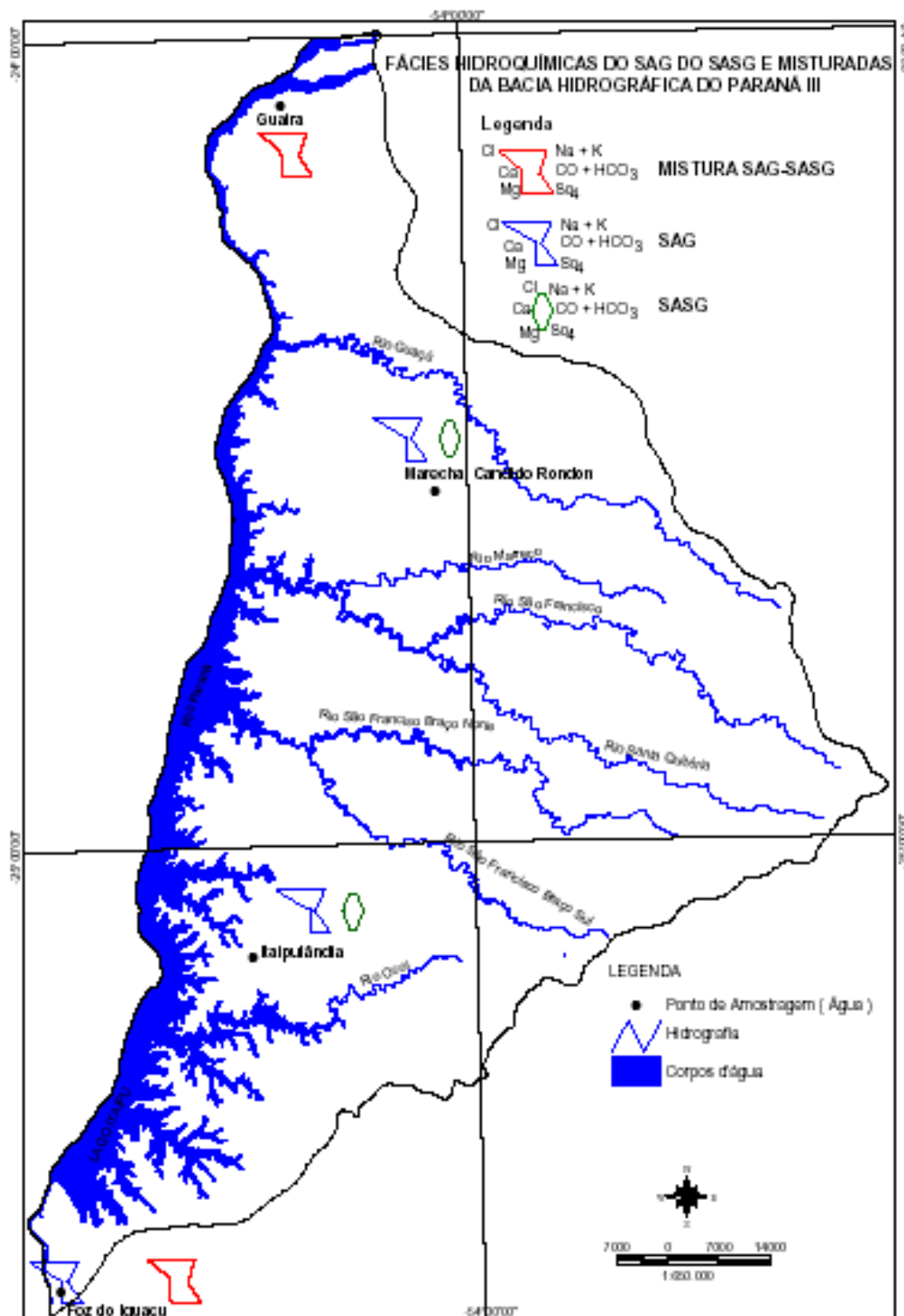


FIGURA 17- DIAGRAMA DE STIFF DAS ÁGUAS COLETAS EM POÇOS PENETRANTES NO SASG E NO SAG, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

6.2 CONDICIONANTES GEOESTRUTURAIS

Nas cidades de Foz do Iguaçu, Itaipulândia e Marechal Cândido Rondon, as cotas do topo do SAG correspondem a -357 m ANM, -631 m ANM e -375 m ANM, respectivamente. Entre a primeira e a segunda cidade, o deslocamento de blocos é da ordem de 274 m (a diferença da cota do terreno é de 85 m), e entre a segunda cidade em relação à terceira, o deslocamento corresponde a 256 m (a diferença de cota do terreno é de 131 m). Considerando a diferença entre a cota do terreno e o topo do SAG, o menor deslocamento de blocos entre Foz do Iguaçu e Itaipulândia, distantes apenas 50 km entre si, seria de 189 m e, entre Itaipulândia e Marechal Cândido Rondon, seria de 125 m. Essas relações podem ser visualizadas na tabela 9.

As principais drenagens apresentam as mesmas direções das intrusões de diabásios, ou seja SE-NW (figura 18), tal como estão configurados os lineamentos do rio Piquiri, do rio Alonso e de São Jerônimo-Curiuva (FERREIRA, 1982).

Os rios que estão encaixados nesses falhamentos são: o rio Ocói (com aproximadamente 50 km de extensão), entre Foz do Iguaçu e Itaipulândia; o rio São Francisco Falso (com aproximadamente 75 km de extensão); e o rio São Francisco Verdadeiro (com aproximadamente 50 km de extensão), entre Itaipulândia e Marechal Cândido Rondon.

Na área de estudo, existe uma notável compartimentação estrutural condicionada por falhas SE-NW, as quais são os lineamentos mais importantes e contínuos da área de estudo, como por exemplo, os rios Rio Ocói, Rio São Francisco Falso e Rio São Francisco verdadeiro (figura 18).

As principais direções das descontinuidades estruturais na área de estudo são as zonas de falhas SE-NW. Essas estruturas tectônicas mais proeminentes são caracterizadas por lineamentos superiores a 70 km.

Esses falhamentos seccionam o aquífero em blocos, o que causa a descontinuidade da camada aquífera, e pode modificar o fluxo local e conseqüentemente o processo de recarga do aquífero.

Devido a esse fato, a hipótese, pelo menos nessa região, do aquífero ser homogêneo em toda sua extensão pode estar totalmente equivocada.

A secção geológica é praticamente ortogonal aos lineamentos acima mencionados. Pressupõe-se, portanto, que essas diferenças de cotas do topo do SAG entre as cidades onde foram perfurados os poços tenham sido causadas pelo soerguimento do Arco de Ponta Grossa, o que resultou numa malha de falhamentos geológicos regionais. Esses tipos de estruturas estão bem destacados nos trabalhos de Portella Filho (2002), de Strugale (2002) e de Hindi (2007).

A secção geológica mostrada na figura 19 demonstra que na região de Itaipulândia, entre as cidades de Foz do Iguaçu e Marechal Rondon (distantes 50 km entre si), a cota do topo do SAG, na sua parte mais profunda varia de -274 m até - 312 m, sendo inferior às cotas do topo do SAG em Foz do Iguaçu e em Marechal Cândido Rondon. A conformação geométrica desta secção assemelha-se (somente sob o ponto de vista geomorfológico) a uma estrutura do tipo "graben".

Na tabela 9 são apresentados os dados relativos à cota do terreno, a profundidade total dos poços tubulares, incluindo as espessuras de basaltos e de arenitos seccionados nas perfurações de poços para a captação de água do SAG.

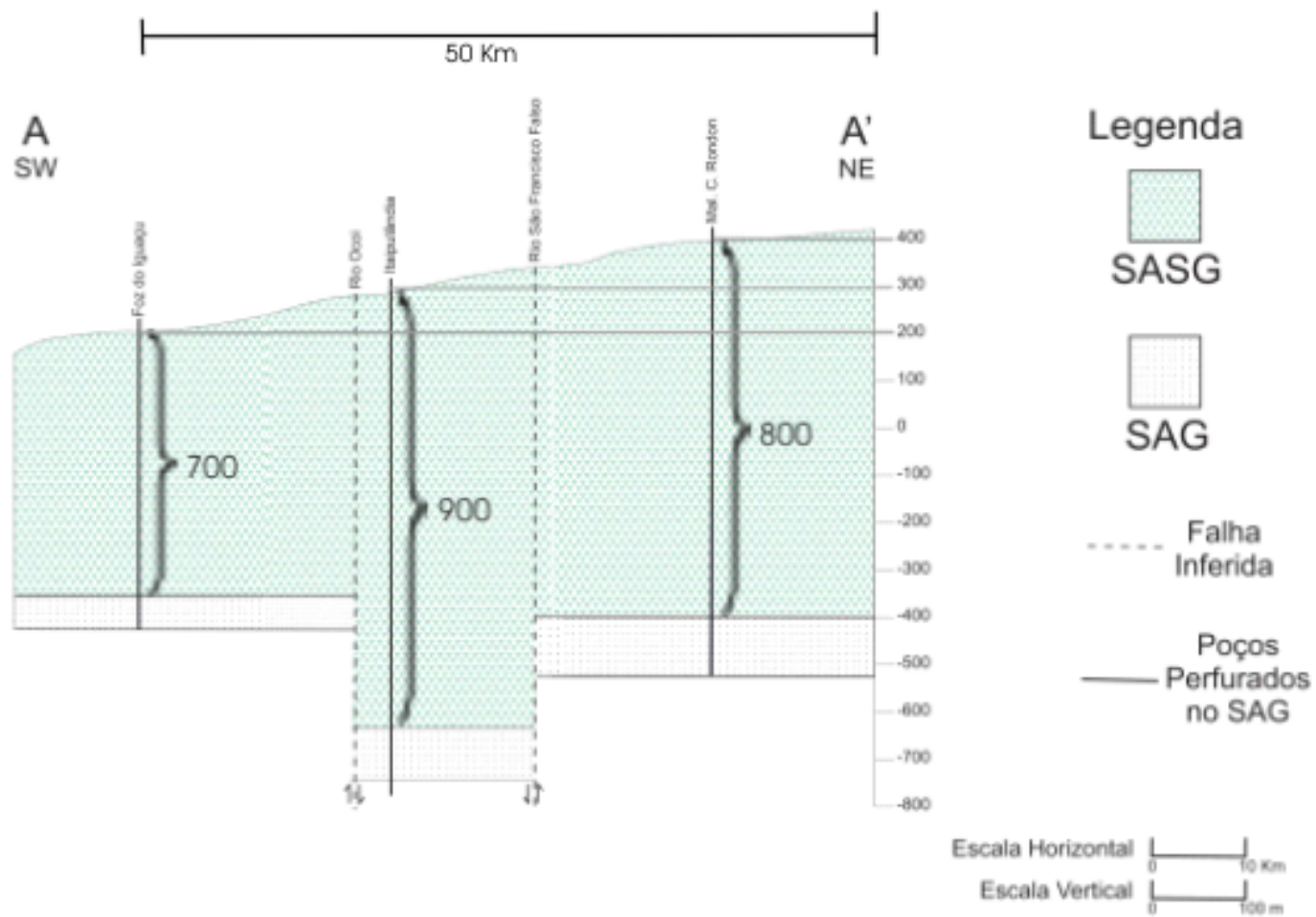


FIGURA 19- SECÇÃO GEOLÓGICA MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE FALHAMENTOS GEOLÓGICOS NO SAG E NO SASG NA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

TABELA 9 - DADOS SOBRE A COTA DO TERRENO, PROFUNDIDADE DOS POÇOS E ESPESSURAS DE BASALTOS E DE ARENITOS DE POÇOS LOCALIZADOS DENTRO E FORA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

Cidade	Cota do Poço (m)	Profundidade Total (m)	Espessura Basalto (m)	Espessura Arenitos (m)
Poços localizados na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Paraná III				
Foz do Iguaçu – Poço 1 M.H.	204	810	561	71
Foz do Iguaçu – Poço 2 B. H.	218	632	540	92
Itaipulândia	289	1030	920	110
Marechal Cândido Rondon	420	920	795	125
Poços localizados na parte externa da Bacia Hidrográfica do Paraná III				
Cianorte	580	1564	1.402	127
Cascavel – Termas de Cascavel	645	1.088	1.088	-
Francisco Beltrão – Termas do Sudoeste	799	1.356	1.356	-
Laranjeiras do Sul – Petrobrás	826	1.014	1.014	-
Matelândia	345	908	908	-

6.3 ESCOAMENTO DAS ÁGUAS DO SAG.

Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), o escoamento subterrâneo em meio saturado origina-se quando há diversificações de carga potenciométrica ou de acordo com o gradiente hidráulico, sendo ministrado ainda pela disposição em subsuperfície de horizontes com diferentes condutividades hidráulicas.

A diferença da potenciométrica entre os poços de Foz do Iguaçu (poços do H.M. e do H.B.), distantes 600 m entre si, é de 4 m. Destaque-se, neste caso, que a relação da altura da carga hidráulica em função da distância entre os dois poços, de 6,6 m/km, é consequência do alívio de pressão da água e da compressão dos basaltos sobre os arenitos, efeitos esses que ocorreram simultaneamente tão logo as perfurações atingiram o aquífero, primeiramente através do poço do M.H. (produzindo água a mais de uma década), e posteriormente através do poço do H.B. (concluído no final do ano de 2006). A altura da carga hidráulica e as vazões de surgências desses poços ainda não estão em equilíbrio; a estabilização deverá ocorrer em função do tempo, com reduções da altura da carga hidráulica. Destaque-se que entre esses dois poços não foi constatada a existência de descontinuidades geológicas.

Os falhamentos geológicos com grandes deslocamentos de blocos, são possíveis indicativos da existência de compartimentos hidrogeológicos, cada qual com sua carga hidráulica. Na região de Foz do Iguaçu, a altura da carga hidráulica é superior a cota do terreno, o que favorece o fenômeno do artesianismo.

Nas demais localidades mencionadas na tabela 10, a água do SAG ascende por pressão e se mistura com as águas do SASG. Esse processo é bastante nítido na cidade de Marechal Cândido Rondon, onde os poços penetrantes apenas no SASG, com profundidades entre 150 e 200 m, apresentam uma tipologia de águas mistas.

Os rios principais da Bacia Hidrográfica do Paraná III, anteriormente mencionados, estão encaixados nas estruturas com direções SE-NW; através dessas feições estruturais é que provavelmente ocorre a descarga das águas do SAG na região estudada.

Uma das questões ainda indefinidas em regiões onde o SAG encontra-se confinado com mais de 600 m de espessura de basaltos e igualmente sob elevada pressão hidráulica, o que eleva a água do SAG para o SASG, bem como em função da idade de suas águas, acima de 20.000 anos (ROSA FILHO *et al.* 2006), se refere aos processos de recarga do SAG.

Sob a hipótese de inexistência de recarga através da precipitação, da contribuição de águas do SASG por drenagem vertical através de falhas ou de qualquer outra fonte, é admissível pressupor que o volume da água explorável do SAG, nessa região, é finito.

Sendo assim, a exploração sustentada para um determinado tempo exige, no mínimo, conhecimentos sobre as dimensões dos compartimentos hidrogeológicos e seus respectivos volumes de águas armazenadas, sendo que o esgotamento de cada compartimento (“exploração da água”) será, então, função da vazão extraída em relação ao regime diário de bombeamento.

É importante salientar que durante a limpeza e o desenvolvimento do poço do SAG, na cidade de Foz do Iguaçu (H. M), ocorreu uma ascensão natural da água no poço do SASG localizado nas proximidades do poço do SAG. Este fator pode ser um indicativo de uma possível conexão entre esses dois aquíferos através das fraturas.

A influência desta estruturação regional no contexto hidrogeológico da área, foi evidenciada com base nos dados hidrogeológicos dos poços localizados na Bacia Hidrográfica do Paraná III (tabela 10). A principal influência diz respeito à geometria do aquífero na forma de variações de espessuras na cota do topo do SAG.

TABELA 10 - DADOS DOS POÇOS LOCALIZADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III QUE SECCIONARAM O SAG.

Cidade	Cota do Poço (m)	Nível hidrostático (m)	Profundidade Total do poço (m)	Cota do topo do SAG acima do ANM (m)	Altura da carga hidráulica (m)	Vazão (m³/h)
Marechal Cândido Rondon	420,0	92,0	920,0	-375,0	328,0	90,0(***)
Itaipulândia	289,0	10,0	1.030,0	-631,0	279,0	75,0 (***)
Foz do Iguaçu – (H.M)	204,0	+ 40,0(**)	810,0	-357,0	244,0	82,0 (*)
Foz do Iguaçu – (H.B)	218,0	+ 22,0(**)	632,0	-336,0	240,0	41,0 (*)

*Surgência natural

** Altura da Surgência acima da cota do poço.

*** Vazão de Teste

6.4 QUALIDADE DAS ÁGUAS DO SAG.

Para abastecimento público

A utilização da água para essa finalidade só é possível se for feita a diluição com águas superficiais da ordem de 20% das águas do SAG e 80% das águas doces, obedecendo aos padrões de qualidade para consumo humano, os quais estão definidos na portaria do Ministério da Saúde, (Portaria Nº 518, de 25 de março de 2004, tabela 11).

TABELA 11 – PADRÃO DE ACEITAÇÃO PARA CONSUMO HUMANO, SEGUNDO MINISTÉRIO DA SAÚDE, PORTARIA Nº 518, DE 25 DE MARÇO DE 2004, PARA AS SUBSTÂNCIAS NA ÁREA DE ESTUDO.

PARAMETRO	UNIDADE	Valores na área	VMP⁽¹⁾
Cloreto	mg/L	448,00 a 612,00	250
Dureza	mg/L	43,90 a 329,19	500
Sódio	mg/L	712,00 a 1280,00	200
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	1650,00 a 2117,00	1.000
Sulfato	mg/L	654,00 a 2450,00	250
Fluoreto	mg/L	5,40 a 8,50	1,5

Nota: (1) Valor máximo Permitido.

Para as cidades de Foz do Iguaçu, Itaipulândia e Marechal Cândido Rondon, as águas do SAG são mais adequadas à recreação em hotéis e balneários.

Para irrigação

As águas do SAG, na área de estudo, não são adequadas para irrigação, devido à alta condutividade elétrica (figura 20) que é diretamente relacionada à salinidade (tabela 12). Também, a alta concentração de sódio (figura 20) é fator determinante para a inutilidade desta água para tal fim.

Em relação à condutividade elétrica, as águas do SAG, na área de estudo, são classificadas como muito alta, enquanto que as águas do SASG, são classificadas como média baixa (tabela 6).

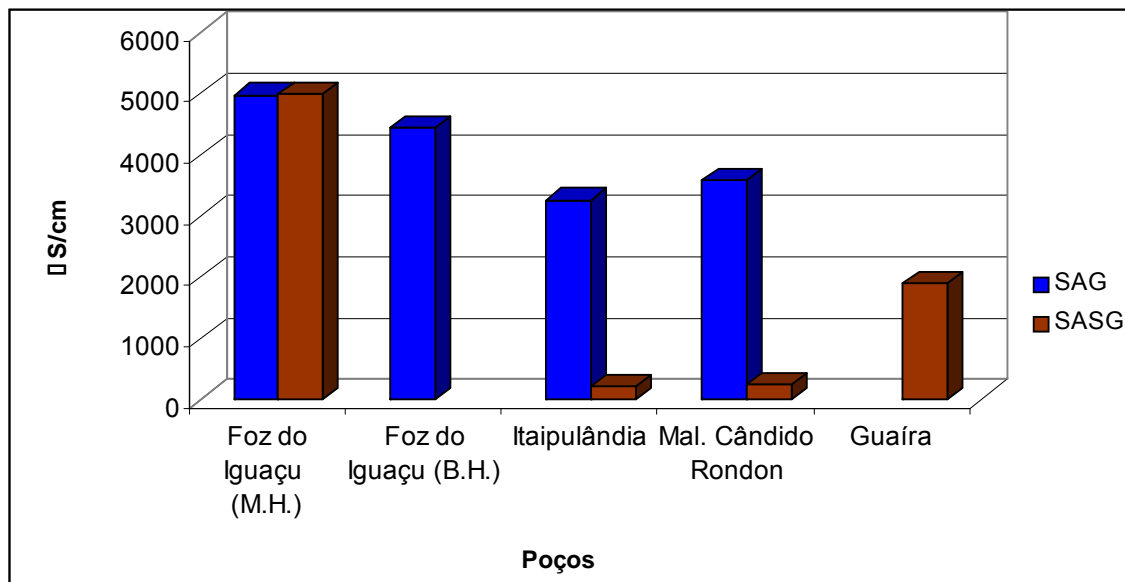


FIGURA 20- GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁREA DE ESTUDO.

TABELA 12 - CLASSES DE SALINIDADE PARA ÁGUAS DE IRRIGAÇÃO.

Classes	Descrição	C.E (µS/cm)	Valores na área
1	Salinidade Baixa	0 a 270	
2	Salinidade média	270 a 780	
3	Salinidade alta	780 a 2.340	
4	Salinidade Muito alta	2.340 a 5.470	3.260 a 4.980
5	Salinidade Extremamente Alta	> 5.470	

FONTE: WESTCOT E AYERS (1991).

As características das classes citadas na tabela 12 são:

C1: São águas de baixa salinidade e podem ser usadas na irrigação da maioria das culturas.

C2 : água com conteúdo médio de sódio. Pode apresentar perigo em condições de drenagem deficiente, em terrenos de textura fina, com alta capacidade de intercâmbio catiônico.

C3 : água alta em sódio. Na maior parte dos solos pode alcançar-se um limite de toxicidade do sódio inter-trocável, o que faz necessário uma boa drenagem, lixiviação intensa e adições de matéria orgânica.

C4 : É nessa classe que a área de estudo está inserida. Essa classe água muito alta em sódio. Essa classe de águas não é adequada para irrigação, exceto com salinidades médias e baixas, sempre que seja possível seu emprego com a dissolução de cálcio no solo, o uso de gesso ou outras substâncias.

C5: Nessa classe as águas não são apropriadas para a irrigação exceto em solos com alta permeabilidade e muito boa drenagem. A utilização é restrita às culturas com alta tolerância aos sais e somente pode ser usado em casos emergenciais.

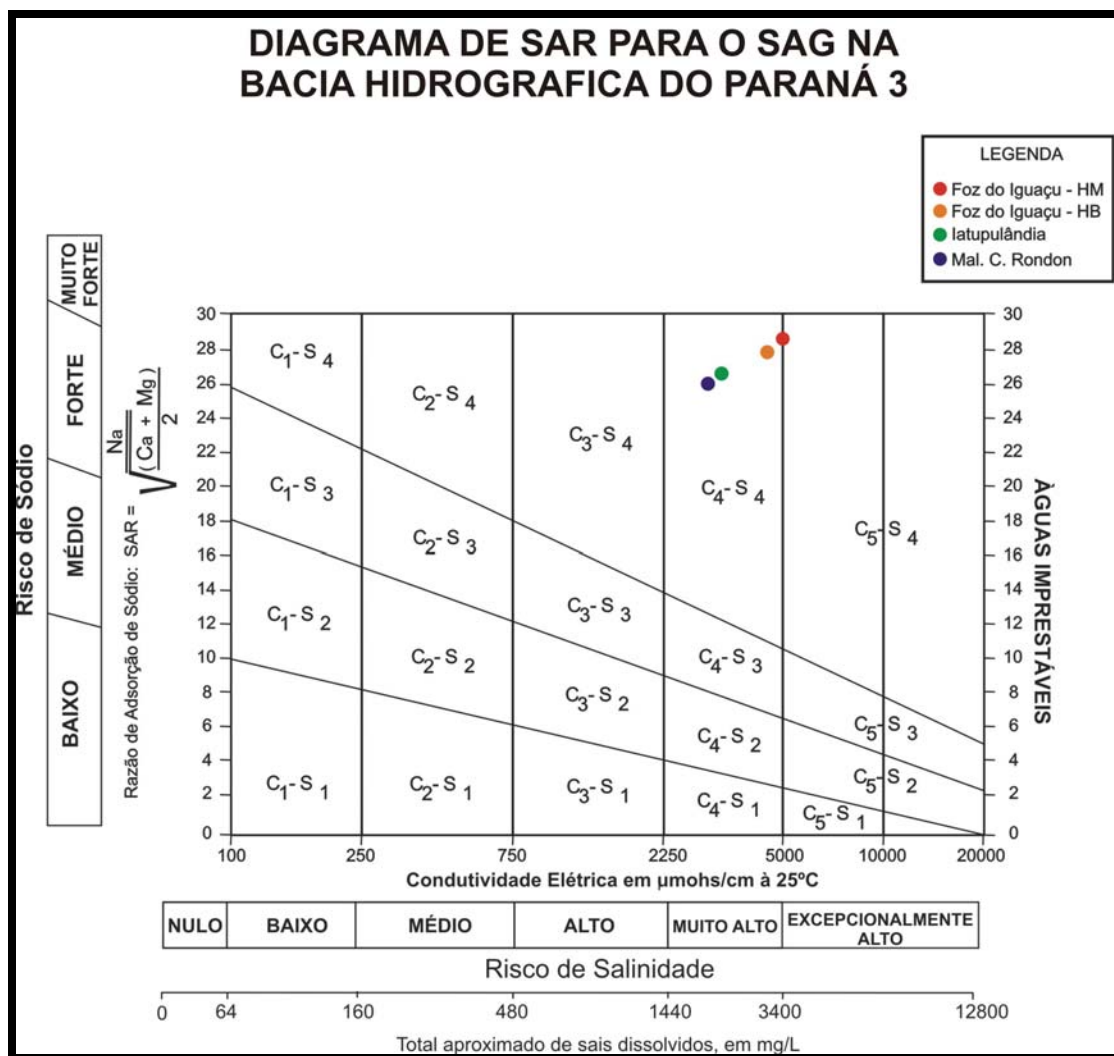


FIGURA 21 - DIGRAMA DE SAR PARA A ÁREA DE ESTUDO.

Todas as amostras conforme é feito constar na figura 21 apresentam perigo de salinização C4-S4 que corresponde a águas altamente salinas não apropriadas para utilizar em condições ordinárias de irrigação.

Excepcionalmente existem registros de que essa água pode ser usada em culturas bastante tolerantes a salinização (tabela 13) desde que os solos sejam bem permeáveis, com boa drenagem e com excesso de água para conseguir um bom lixiviamento.

TABELA 13 - CLASSIFICAÇÃO DE CULTURAS EM RELAÇÃO À TOLERÂNCIA AOS SAIS.

Sensível	Moderadamente Sensível	Moderadamente Tolerante	Tolerante
Feijão	Milho	Aveia	Algodão
Cebola	Cana de açúcar	Figo	Arroz
Morango	Alfafa	Mamão	Aspargo
Maçã	Girassol	Soja	Jojoba
Abacate	Alface	Sorgo	Cevada
Limão	Brócolis	Cevada	Arroz silvestre
Lima	Pepino	Trigo	
Manga	Pimenta	Nabo	
Laranja	Tomate	Romã	
Pêssego	Espinafre	jujuba	
Pêra	Batata		
Tangerina	Melancia		
Cenoura	Berinjela		
Amora	Aveia (forragem)		
Nêspera	Couve flor		
Ervilha	Repolho		
Gergelim	Gramma azul		

FONTE: WESTCOT E AYERS (1991).

7 CONCLUSÕES

As tipologias químicas das águas captadas de poços penetrantes no SAG na área de estudo são sulfatadas ou cloretadas sódicas, evidenciando assim uma área de alto confinamento, com teores de STD entre 1.650 a 2.208 mg/L e temperaturas que variam entre 38 e 41 °C.

Além dos STD, existem outros parâmetros, tais como: cloreto; sódio; fluoreto; e sulfato que também apresentam concentrações acima dos valores permitidos pelo o limite de potabilidade do Mistério da Saúde.

A elevada temperatura da água é indicada para o turismo termal.

Os poços que seccionam apenas os basaltos, com profundidades de até 180 m, sofrem influência das águas do SAG, ora indicadas por temperaturas de até 28° C e, nos casos mais nítidos, pela similaridade com as características físico-químicas das águas de aquíferos subjacentes.

Os estudos de natureza estrutural, realizados a partir da integração de dados geológicos, geomorfológicos e dos poços da área, evidenciaram uma complexa estruturação na área da Bacia Hidrográfica do Paraná III, cujas direções preferenciais são SE- NW.

Não existe continuidade do SAG na região da Bacia Hidrográfica do Paraná III. Os falhamentos geológicos estão delineados pelos rios Ocói e São Francisco Falso. Estas estruturas obedecem aos mesmos padrões dos lineamentos dos rios Iguaçu, Piquiri, Alonso e de São Jerônimo-Curiuva, sendo que os rejeitos de blocos, nessa zona, atingem valores acima de 300 m. Devido a esse fato, a hipótese, pelo menos nessa região, de o aquífero ser homogêneo em toda a sua extensão, pode estar equivocada.

As águas do SAG, na área de estudo, não são adequadas para irrigação, pois são altamente salinas, como se pode constatar na Figura 21.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Instituto Geográfico e Geológico. **Boletim**. n. 41. p. 161-263, 1964.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Arcabouço hidrogeológico do aquífero Gigante do Mercosul (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai): Formação Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 9. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 110-120, 1995.

ASSINE, M, L.; PIRANHA, J, M,; CARNEIRO C, D, R.; **Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. Geologia do Continente Sul -Americano.** Evolução da obra de Flávio Marques de Almeida, São Paulo. Editora Beca. Pg 77 – 92. 2004.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIAROMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R.; PICCIRILLO, E.M.; ROISENBERG, A. **High and Low TiO₂ flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin.** Neues Jahrbuch Miner. Abh, n. 150, p. 273-306, 1984.

BITTENCOURT, A.V.L. **Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do Rio Ivaí: Aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa.** 201 f. Tese (Doutorado) - Instituto de geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

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

BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E. F. da.; HINDI E. C. BUCHMANN FILHO, A. C. A influência dos Basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do sistema aquífero Serra Geral na bacia do rio Piquiri, Paraná – PR, **Revista Águas Subterrâneas**, n. 17. p. 67 – 75, 2003.

BORGHETTI. N. R. B; BORGHETTI. J. R; ROSA FILHO, E. F. da. **Aquífero Guarani - A verdadeira Integração dos Países do Mercosul.** Curitiba: Fundação Roberto Marinho, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, v. 141, n. 59, p. 266, 26 mar. Seção 1, 2004.

BRIGHETTI, J.M.P. e CAETANO-CHANG, M.R. Fácies de dunas e lençóis de areia em sedimentos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995, São Pedro. **Boletim de Resumos**. Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1995, p. 67.

CAETANO-CHANG, M.R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo**. Rio Claro, 1997. 196 p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Bacia do Paraná: formações Pirambóia e Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992, São Paulo. **Roteiro de Excursão...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, v. 2, p. 1-19.

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no centro-leste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. In: SIMPÓSIO CRONOESTRATIGRAFIA BACIA DO PARANÁ, 1, 1993, Rio Claro. **Boletim de Resumos Expandidos...** Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1993, p. 93. (a).

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. A Formação Pirambóia na região de Anhembi (SP), com base em dados de subsuperfície. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3, 1993, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 74. (b).

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Afloramento modelo da Formação Pirambóia. **Geociências**, v. 13, p. 371-385, 1994.

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. As formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995, São Pedro. **Boletim Resumos...** São Pedro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1995, p. 64.

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Sandstone facies and diagenesis of Pirambóia Formation - Paraná Basin, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 30, 1996, Beijing (China). **Abstract...** Beijing, 1996, v. 2, p. 164. (a).

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Pirambóia and Botucatu formations (Tr - J Paraná Basin, South America): sedimentation and stratigraphy. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 30, 1996, Beijing, China. **Abstract**. Beijing, 1996, v. 2, p. 200. (b).

CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T.; BRIGHETTI, J.M.P. Caracterização eólica de arenitos da Formação Pirambóia, proximidades de São Pedro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, 1991, São Paulo. **Atas**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991, v. 2, p. 53-58.

CAETANO CHANG, M.R.; WU, F.T.; BRIGHETTI, J.M.P. Caracterização eólica de arenitos da Formação Pirambóia, proximidades de São Pedro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE. São Paulo. **Boletim de Resumos**, São Paulo. 1991, v. 2, p. 53-58.

CELLIGOI, A; DUARTE, U. Aspectos Hidrogeoquímicos da Formação Serra Geral em Londrina (PR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8. Recife. **Anais...** Recife: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 1994, p. 425 – 433.

CAMPOS, L. F. G. de. Secção Geológica. In: COMISSÃO GEOGRAPHICA E GEOLOGICA DA PROVÍNCIA DE SÃO PAULO. **Relatório**. São Paulo. p. 21-34, , 1889, Anexos.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O. Significado dos diques do arco de Ponta Grossa na abertura diferencial do atlântico sul. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS. 3. Rio Claro. **Boletim de Resumos**. Rio Claro: 1991, p. 77 – 78.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona: Ediciones Omega, 1983.

DAVIS, S. N; DEWIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. New York: Wiley, 1966.

DERBY, O. A. **A Geologia da Região diamantífera da Província do Paraná**. Rio de Janeiro: Arquivo do Museu Nacional. p. 89-98, 1878.

DONATTI, L. M.; SAWAKUCHI, A. O.; GIANNINI, P. C. F.; FERNANDES, L. A. The Pirambóia-Botucatu succession (late Permian – early Cretaceous, Paraná Basin, São Paulo and Paraná states): two contrasting eolian systems. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 73, n. 3, p. 465 – 476, 2001.

DUTTA, P. K. Influence of climate and depositional environment on the Genesis of Mesozoic Quartzarenites of Gondwanaland. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM. 7, São Paulo, **Proceedings**, São Paulo, p. 226-240, 1988.

Faccini U. F. 2000. **Estratigrafia do Permo-Triássico do Rio Grande do Sul: Estilos Depositionais versus Espaço de Acomodação**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2 v.

Faccini U. F., Giardin A., Machado J. L. F. 2003. **Heterogeneidades litofaciológicas e hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. In: Paim P. S. G., Faccini U. F. Guimarães Netto R. (Eds.): Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos. UNISINOS, São Leopoldo. pp.147-173.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, 412 p. 1987.

FENZL, N. 1986. **Introdução à hidrogeoquímica**. Pará: Universidade Federal do Pará, 1997.

FERREIRA, F. J. F. **Alinhamentos estruturais – magnéticos da região centro oriental da Bacia do Paraná – reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos**. São Paulo: IPT. 1982. p. 144-166 consórcio CESP-IPT.

FRAGA, C. G. **Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional do Grupo Itararé, Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, n. 2 p. 147-191, 1988.

GIANINNI, P, C, F. As Formações Pirambóia e Botucatu nos estados de São Paulo e Paraná. São Paulo. IG – USP, 110 pg. Relatório Final de Pesquisa. 2001.

GIANINNI, P, C, F.; SAWACUCHI, A, O.; FERNANDES L, A.; DONNATI, L, M.; Paleofluxo sedimentar do sistema deposicional nos estados de São Paulo e Paraná. São Paulo – estudo baseado em análise estatística de dados azimutais. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(2) pg 282 - 292. 2004.

GODOY, H; CORRÊA, A. R. **Carta climática do Estado do Paraná**. Curitiba: Departamento de produção e divisão de meteorologia, 1974.

GORDON JÚNIOR, M. Classificação das formações gondwanicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. **Notas preliminares e estudo**. Rio de Janeiro, n. 38, 20 p. 1947.

HEM, J. D. Study and interpretation of the characteristics of natural waters. **Geological Survey Water-Supply Paper**, Washington (D.C), n. 1473, p. 1-334, 1970.

HINDI, E.C. **Caracterização Hidroquímica e Hidrogeológica das fontes cársticas das bacias dos rios tumiri, água comprida, fervida e das onças – Colombo, PR.** 127 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

HINDI, E.C. **Hidroquímica e hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná.** 156 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LEINZ, V. Contribuição a geologia dos derrames basálticos ao sul do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras. Geologia**, São Paulo, n. 5, p. 1 – 103. 1949.

IMAGEM Landsat da Bacia Hidrográfica do Paraná III: lineamentos da área de estudo. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/PR/htm2>. Acesso em: 20/08/2007.

IMAGEM Landsat da Bacia Hidrográfica do Paraná III: cotas dos poços e do topo do SAG na área de estudo. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/PR/htm3>. Acesso em: 20/08/2007.

LAVINA, E, L. Formação Pirambóia: um episódio de desertificação na Bacia do Paraná ao final do Permiano. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE. **Boletim de Resumos**, Rio de Janeiro: SBG, 1989, p. 8-9.

LAVINA, E. L.; FACCINI, U. F. Formações Pirambóia e Sanga do Cabral: Um episódio de desertificação da Bacia do Paraná ao final do permiano. In: SIMPÓSIO SOBRE A CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ. 1; Rio Claro; **Boletim de Resumos**, 1993, p. 94-95.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1968.

MACHADO, J.L.F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul.** Tese de Doutorado. UNISINOS. São Leopoldo RS. 2005. 238p.

MATOS, S, L, F. **O contato entre a Formação Pirambóia e a Formação Botucatu na borda leste da Bacia do Paraná no estado de São Paulo.** São Paulo. IG – USP, 110 pg. Dissertação de mestrado. 1995.

MEZZALIRA, S. (ORG.). Léxico estratigráfico do Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Geológico**, São Paulo, 5, 161 p. 1981.

MILANI, E. J. **Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná**. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Org.). Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-280.

MILANI, E. J. **Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 254 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da UFRGS, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias Paleozóicas no domínio sul-occidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.

Milani E. J., Faccini U. F., Scherer C. M. S., Araújo L. M., Cupertino, J. A. 1998. **Sequences and stratigraphic hierarchy of Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous)**, Southern Brazil. *Bol. IG/USP*, Série científica, 29:125-173.

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

MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. **Atlas Geoquímico do Estado do Paraná**. Curitiba, Mineropar, 2001.

MANTOVANI, M.S.M.; STEWART, K.; TURNER, S.; HAWKESWORTH, C.J. **Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and sources regions of continental flood basalts**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 67, supl. 2, p. 163-170. 1995.

PARAGUASSU, A. B. **Contribuição ao estudo da Formação Botucatu: sedimentos aquosos, estruturas sedimentares e silicificação**. 131 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 1968.

PACHECO, J. C. Relatório elucidativo do esboço geológico da região compreendida entre o meridiano 4 Rio Itararé e os 23° 34' e 24° 38'. In: COMISSÃO GEOGRAPHICA E GEOLOGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Exploração da região compreendida pelas folhas topográficas de Sorocaba, Itapetininga, Bury, Itaporanga, Sete Barras, Capão Bonito, Robei**. São Paulo. p. 9-12, 1927.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C.J.; MANTOVANI, M.S. M. **Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma**

types and their spatial distribution. Bulletin of Volcanology, n. 55, p. 119-139. 1992.

PEATE, D.W. **The Paraná-Etendeka province, in Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism** edited by J.J. Mahoney, and M.F. Coffin, pp. 217-245, American Geophysical Union Monograph, Washington DC. 1997.

PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. **Geologia do Brasil Fanerozóico.** São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1983.

PORTELLA FILHO, C. V. **Conexão hidráulica entre os Aqüíferos Serra Geral e Guarani na região de Londrina – Maringá – PR, com base em dados aeromagnetométricos e hidroquímicos.** 128 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

PICCIRILO, E. M; MELFI, A. J. **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: Petrogenic and Geophysical Aspects.** São Paulo: USP, 1988. 600 p.

ROSA FILHO, E. F. da.; FORLIN, M.; MONTAÑO, J. Informações básicas sobre a distribuição do Sistema Aquífero Guarany nas regiões sul e sudeste do Brasil. **Água em revista.** v. 10, p. 23-26, 1998.

ROSA FILHO, E. F. da.; SALAMUNI, R.; BITTENCOURT, A. V. L. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências,** n. 37, p. 22-52, 1987.

ROSA FILHO, E. F. da.; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. V. L.; ARAVENA, R. Caracterização Hidroquímica do Aqüífero Guarani na porção centro-norte do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira Águas Subterrâneas,** Curitiba, v. 19 n 1, p. 87 – 94, 2005.

ROSA FILHO, E. F. da.; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. V. L.; BITTENCOURT A. Estudos sobre as condicionantes estruturais e as tipologias das águas do Sistema Aquífero Guarani no extremo oeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira Águas Subterrâneas,** Curitiba, 2006, (inédito).

ROSA FILHO, E. F. da.; HINDI, E. C; GIUSTI, D. A; NADAL C. A; MONTOVANI, L. E. Usos potenciais do hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani. **Boletim Paranaense de Geociências,** v. 48, p. 63-69, 2000.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; RIGOTI, A.; KRAFT, R. P. Structural styles of the intracratonic reactivation of the Perimbó fault zone, Paraná basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences.** n.16: p. 287-300, 2003.

RUEGG, N. A. **Modelos de variações químicas na província basáltica do Brasil meridional: Característica do teor, distribuição geográfica e diferenciação**. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

SARTORI, P. L. P.; GOMES, C. B. Composição química mineralógica das últimas manifestações vulcânicas na região de Santa Maria (RS). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. Rio de Janeiro, v. 52, n. 1, p. 125 – 133, 1980.

SARTORI, P. L. P.; MACIEL FILHO, C. L. Petrologia da seqüência vulcânica da Formação Serra Geral no rebordo ocidental do planalto meridional (RS), In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 19. **Anais...** Ouro Preto: SBG, 1976, v. 1, p. 297.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, R.A.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, SBG, 28. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974, v.1, p.41- 65.

Scherer C. M. S. 1998. **Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 230 p.

SCHOELLER, H. **Les eaux souterraines**. Paris: Masson, 1962.

SOARES, P. C. **O mesozóico gonduânico no Estado de São Paulo**. 152 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geologia e Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1973.

SOARES, P. C. Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 5, n. 4. p. 229-251, 1975.

SOARES, P. C.; ASSINE, M. L. A seqüência Triássico-Jurássica da Bacia do Paraná. **Acta Geologica Leopoldensia**, v. 1, n. 36, p. 137-138, 1992.

SOUZA, A. A. **Caracterização da bacia do rio Iguaçu a jusante do Município de Reserva do Iguaçu, como área de descarga do Aquífero Guarani**. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SOUZA FILHO, M. N. **Estudo das amostras de calha do poço de Marechal Cândido Rondon, PR**. 12 p. e anexos. Araraquara: Perfil Máster-Orion-SUDERHSA, 2000. (Relatório Técnico não publicado).

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. **Hidrogeology journal**, n. 10, p. 643- 655, São Paulo, 2002.

STRUGALE, M. **Arcabouço e Evolução estrutural do arco de Ponta Grossa no grupo São Bento (mesozóico): implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na bacia do Paraná**. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

TURNER, S; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKSWORTH, C.; MANTOVANI, M.S.M. **Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology**. Earth and Planetary Sciences. Letters n. 121. p. 333-384. 1994.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; ASTOLFI, M.A.M.; APPI, V.T.; ZANOTTO O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In. SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. **Anais....** Curitiba: 1987, v.1,p. 441-477.

Zerfass H., Lavina E. L., Schultz C .L., Garcia A. J. V., Faccini U. F., Chemale Jr. F. 2003. **Sequence stratigraphy of continental triassic strata of Southernmost Brazil: a contribution to Southwestern Gondwana palaeogeography and palaeoclimate**. Sedimentary Geology, 161: 85 -105.

WESTCOT, D. W.; AYERS. R. S.; **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de H. R; J. F. Medeiros de, F. A. Damasceno. Campina Grande, UFPB, 1991.

WHITE, I. C. **Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1908.

WILDNER, W. **Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná - conceitos básicos e divisão faciológica**. In: Anais da reunião aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia. SBG. UFRGS. Porto Alegre, p. 62-78. 2004.

WILDNER, W.; HARTMANN, L.A.; LOPES, R.C. **Serra Geral Magmatism in the Paraná Basin - A new Stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures**. I Workshop - PROBLEMS IN WESTERN GONDWANA GEOLOGY. RGEOTEC. 8 p. 2007.