

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO TUBARÃO NO
MUNICÍPIO DE AMERICANA/SP.**

Filipe Montanheiro

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Dr. Didier Gastmans (co-orientador)

Rio Claro (SP)

2011

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

FILIPE MONTANHEIRO

CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA
AQUÍFERO TUBARÃO NO MUNICÍPIO DE
AMERICANA/SP.

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

Rio Claro - SP

2011

FILIPPE MONTANHEIRO

CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA
AQUÍFERO TUBARÃO NO MUNICÍPIO DE
AMERICANA/SP.

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Ms. Elias Hideo Teramoto

Ms. Marcia Regina Stradioto

Rio Claro, 18 de Novembro de 2011.

Assinatura do aluno

assinatura do orientador

543.31 Montanheiro, Filipe
M764c Caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero
Tubarão no município de Americana/SP. / Filipe
Montanheiro. - Rio Claro : [s.n.], 2011
54 f. : il., figs.

Trabalho de conclusão de curso (especialização -
Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-Orientador: Dr. Didier Gastmans

1. Água - Composição. 2. Águas Subterrâneas. I. Título.

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais,
Tarcísio e Maria do Carmo.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pela inspiração e fortalecimento durante minha longa jornada de graduação. Aos meus pais que tanto amo, pela força, apoio e principalmente pela confiança depositada em mim.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Chang Hung Kiang, pela oportunidade ao longo desses anos, apoio e confiança depositada em meu trabalho. Da mesma forma agradeço meu co-orientador pesquisador Dr. Didier Gastmans pelas grandes ajudas e calorosas discussões ao longo de todo trabalho.

Especialmente, agradeço a minha futura esposa, Mariana Ap. Fernandes, grande incentivadora, que esteve ao meu lado e me deu força nos momentos mais difíceis de minha jornada da graduação.

Aos meus irmãos que estarão sempre presentes em minha vida: Juliana, Elaine, Lucas, Ana Beatriz, e o caçula mais querido, João Pedro.

Agradeço ainda aos colegas do LEBAC, pelos momentos de descontração e trabalho durante esses anos e pela disponibilidade dos materiais e equipamentos.

Ao Laboratório de Hidrologia e Hidroquímica da UNESP, em especial ao químico Emílio C.B. Hespanhol.

Agradeço a Prefeitura Municipal de Americana pela grande colaboração para a execução deste trabalho.

Enfim, a realização deste trabalho não teria sido possível sem o auxílio de pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, colaboraram em sua elaboração.

*"Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia,
pois o mundo pertence a quem se atreve,
e a VIDA É MUITO pra ser insignificante"*

Chales Chaplin

SUMÁRIO

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE TABELAS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	11
4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6. CONCLUSÕES.....	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Localização e caracterização da área de estudo.....	2
2. MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 Levantamentos Preliminares.....	6
2.2 Amostragem e análises de água subterrânea	6
2.3 Processamento dos dados hidroquímicos	9
2.4 Análise estatística multivariada dos dados hidroquímicos.....	10
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	11
3.1 Geologia Regional	11
3.2 Geologia Local	13
3.2.1 Grupo Tubarão.....	13
3.2.2 Grupo São Bento	16
3.2.3 Depósitos Cenozoicos.....	17
4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 Arcabouço Geológico	22
5.2 Hidroquímica	24
5.3 Análise de agrupamento dos dados hidroquímicos	34
6. CONCLUSÕES.....	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo	4
Figura 2. Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho	5
Figura 3. Amostragem de água no Poço Antonio Zanaga da Prefeitura Municipal	7
Figura 4. Equipamentos de medição dos parâmetros físico-químicos em campo	8
Figura 5. Diagrama de Piper com classificação dos tipos hidroquímicos	9
Figura 6. Diagrama representativo de Stiff	10
Figura 7. Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul	11
Figura 8. Coluna cronoestratigráfica da Bacia do Paraná	12
Figura 9. Perfil geológico com subdivisão estratigráfica do Subgrupo Itararé	15
Figura 10. Mapa geológico do município de Americana	18
Figura 11. Mapa das Unidades Aquíferas do estado de São Paulo	20
Figura 12. Mapa de distribuição da proporção dos sedimentos grossos-finos	23
Figura 13. Localização espacial dos pontos amostrados	24
Figura 14. Classificação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Tubarão no município de Americana/SP	28
Figura 15. Distribuição dos tipos hidroquímicos do Sistema Aquífero Tubarão na área de estudo	29
Figura 16. Correlação entre Nitrato (NO_3) e Cloreto (Cl^-) nas águas do SAT, em Americana.....	30
Figura 17. Correlação entre nitrato+cloreto e condutividade elétrica nas águas do SAT, em Americana.....	31
Figura 18. Correlação entre alcalinidade (HCO_3) e condutividade elétrica nas águas do SAT, em Americana	31
Figura 19. Correlação entre cálcio e sódio em águas do SAT, em Americana	32
Figura 20. Correlação entre alcalinidade (HCO_3) e cálcio em águas do SAT, em Americana.....	33
Figura 21. Dendrograma dos resultados das análises químicas das águas do SAT, em Americana.....	34
Figura 22. Distribuição espacial dos grupos hidroquímicos classificados a partir de análise por agrupamento.....	35
Figura 23. Comparação dos grupos hidroquímicos obtidos.	36

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físicos e composição química das águas subterrâneas do SAT	25
Tabela 2. Estatística básica das variáveis envolvidas na análise físico-química.....	27

RESUMO

O crescente interesse pela utilização dos recursos hídricos subterrâneos está diretamente relacionado com as vantagens econômicas que a captação subterrânea oferece quando comparadas às águas superficiais. Isso ocorre especialmente nos grandes centros urbanos, como no caso do município de Americana/SP, onde os rios são progressivamente contaminados por despejos industriais e domiciliares. Sendo assim, o presente trabalho buscou caracterizar o Sistema Aquífero Tubarão, no município de Americana, a fim de identificar e avaliar a distribuição espacial das diferentes fácies hidrogeoquímicas, bem como compreender a interação rocha-fluido por meio da construção de um modelo hidrogeoquímico conceitual. Este estudo foi realizado com base no reconhecimento das possíveis reações químicas que imprimem as características químicas da água subterrânea na área. Para a execução do trabalho, realizaram-se duas campanhas de amostragem de água de todos os poços tubulares profundos utilizados pela Prefeitura Municipal de Americana para abastecimento público. A partir dos resultados hidroquímicos, foi feita classificação das águas por meio de diagramas *Piper* e *Stiff* além de geoestatística dos dados empregando análise de agrupamento dos componentes principais (*cluster analysis*). Com base nas informações dos perfis de sondagem obtidas do SIAGAS, bem como nos perfis geológicos fornecidos pela Prefeitura Municipal de Americana, buscou-se detalhar a geologia de subsuperfície do Subgrupo Itararé no município de Americana. Os resultados obtidos permitiram identificar três tipos hidroquímicos na área de estudo: Bicarbonatadas Cálcio-Sódicas (1), Bicarbonatadas Sódicas (2) e Cloretadas Sódicas (3). As águas bicarbonatadas apresentam pH básico a alcalino, podendo ser consideradas fracamente salinas, com valores de condutividade elétrica em torno de 161 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As amostras classificadas como bicarbonatadas sódicas valor médio de 174,99 mS/cm. Os valores de pH variam de 6,74 a 7,99, com média de 7,52. Para o grupo de águas classificadas como cloretadas sódicas, a condutividade média é de 164,32 mS/cm e os valores de pH oscilam de 5,08 a 7,13. Essas amostras apresentaram elevadas concentrações de nitrato associado a cloreto, sendo isso geralmente indicativo de contaminação do aquífero por ação antrópica.

Palavras-chave: Hidrogeoquímica. Sistema Aquífero Tubarão. Americana

ABSTRACT

The growing interest in the use of groundwater resources is directly related to the economic advantages that the groundwater exploitation offers when compared to surface waters. This happens especially in large urban centers, such as the city of Americana / SP, where the rivers are increasingly contaminated by household and industrial waste. Therefore, this study aimed to characterize the Tubarão Aquifer System, in the city of Americana, to identify and evaluate the spatial distribution of different hydrogeochemical facies as well as understand the rock-fluid interaction through the construction of a conceptual hydrogeochemical model. This study was made based on the recognition of the possible chemical reactions that print the chemical characteristics of groundwater in the area. To do the job, there were two water sampling campaigns of all deep wells used by the City of Americana public water supply. From the results of hydrochemical, classification of water was made by Piper and Stiff diagrams as well as geostatistical data using cluster analysis of principal components. Based on information from the profiles obtained from the survey SIAGAS as well as in geological profiles provided by the city of Americana, we sought to detail the subsurface geology of the Subgroup Itararé in the city of Americana. The results obtained allowed the identification of three hydrochemical types in the study area: Bicarbonated calcium-sodium (1), bicarbonate sodium (2) and sodium chloride (3). The waters have bicarbonate alkaline pH to alkaline and can be considered weakly saline, with electrical conductivity values of around 161 mS / cm. Samples classified as sodium bicarbonate average of 174.99 mS / cm. The pH values ranging from 6.74 to 7.99, averaging 7.52. For the group of waters classified as sodium chloride, conductivity average is 164.32 mS / cm and pH values ranging from 5.08 to 7.13. These samples showed high concentrations of nitrate associated with chloride, it is usually indicative of contamination of the aquifer by human activities.

Keywords: hydrogeochemical. Tubarão Aquifer System. Americana.

1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse por recursos hídricos subterrâneos em áreas onde existe alta concentração populacional é motivado pelas vantagens econômicas que a captação subterrânea oferece quando comparadas às águas superficiais. Além disso, deve-se considerar a progressiva degradação dos rios, que é provocada pela elevada carga de dejetos industriais, esgotos urbanos e efluentes domiciliares sem tratamento adequado.

O sucesso exploratório da água subterrânea está relacionado principalmente ao conhecimento do arcabouço geológico da região onde se pretende perfurar um poço tubular profundo, uma vez que a complexidade geológica da área tende a dificultar a tarefa da locação dos poços e o planejamento da exploração.

O município de Americana, onde foi desenvolvido este trabalho, está situado na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos nº 5 (UGRHI 5), fazendo parte da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, a qual é composta por três sub-bacias dos rios Jaguari, Atibaia e Piracicaba. O balanço hídrico da UGRHI 5 é crítico devido à grande exploração das águas superficiais. A disponibilidade hídrica nesta bacia é de 67 m³/s, representando uma disponibilidade per capita de 429 m³/hab.ano, a segunda menor do Estado de São Paulo (SMA/CRH, 2009).

Em função da pequena disponibilidade hídrica superficial, um grande número de poços foi perfurado no Sistema Aquífero Tubarão (SAT) na cidade de Americana, em parte para complementar o abastecimento público, em parte para o abastecimento do parque industrial instalado na cidade.

Entretanto, a natureza heterogênea do SAT dificulta a exploração do recurso e a obtenção de vazões importantes. Essa heterogeneidade advém da diversidade e descontinuidade de suas litofácies, com alternância entre sedimentos grossos e finos e camadas de espessuras variadas, prejudicando a circulação da água subterrânea.

Essas especificidades acabam refletindo-se na qualidade e na variabilidade de tipos hidroquímicos das águas subterrâneas encontradas no SAT, conforme já apontado por Vidal (2002) e Ezaki (2011). Sendo assim, a necessidade de integrar as informações de subsuperfície e a distribuição das diferentes fácies hidroquímicas e características hidráulicas do SAT na cidade de Americana, motivaram o desenvolvimento do presente trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi a caracterização hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Tubarão no município de Americana.

Dentre os objetivos específicos, os principais foram:

- ✓ Identificar e avaliar a distribuição espacial das diferentes fácies hidrogeoquímicas do SAT presentes na área;
- ✓ Compreender a interação rocha-fluido por meio da construção de um modelo hidrogeoquímico conceitual, com base no reconhecimento das possíveis reações químicas que imprimem as características químicas da água subterrânea na área.

1.2 Localização e caracterização da área de estudo

O município de Americana localiza-se na porção centro-leste do estado de São Paulo (Figura 1) e ocupa uma área de aproximadamente 135 km² (IBGE, 2011). Possui grande densidade demográfica (1572 habitantes/km² - IBGE, 2011). Sua área territorial é coberta pelas folhas topográficas do IBGE 1975, em escala 1:50.000, de Americana (SF-23-Y-A-V-3), Campinas (SF-23-Y-A-V-4), Cosmópolis (SF-23-Y-A-V-2) e Limeira (SF-23-Y-A-V-1).

O padrão climático da cidade de Americana pode ser definido como tropical mesotérmico, com duas estações bem definidas: chuvas de verão (de novembro a abril) e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (sendo julho o mês mais seco), segundo a classificação de Koppen (1964).

Nos meses de outubro a abril há predomínio de temperaturas mais elevadas, atingindo o máximo em janeiro e fevereiro, enquanto que de maio a julho as temperaturas são sensivelmente mais baixas, atingindo o mínimo em junho e julho.

A avaliação da pluviometria no município de Americana entre os anos de 1992 a 2011 indica que as maiores precipitações concentram-se entre os meses de outubro a março, e os meses com menor precipitação ocorrem de abril a setembro (CIIAGRO, 2010).

Segundo a divisão dos domínios geomorfológicos do estado de São Paulo, proposta por Almeida (1964), o município de Americana está inserido na Depressão Periférica Paulista, próximo à província das Cuestas Basálticas localizada a oeste da região.

A Depressão Periférica marca uma acentuada mudança do relevo mais montanhoso do Planalto Atlântico para um relevo mais colinoso, caracterizado por colinas amplas e médias, morrotes alongados e espigões.

O município de Americana está situado na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, que drena uma área de 12.400 km². Esse rio é formado pelo encontro dos rios Jaguari e Atibaia, na divisa dos municípios de Americana e Limeira. Forma a represa do Salto Grande, já no município de Americana, cuja barragem eleva em aproximadamente 20 metros o leito do rio Atibaia e constitui reservatório de 106 x 10⁶ m³ de volume mínimo, inundando uma área de 13 km² (COELHO, 1993).

No município, os principais mananciais são o rio Piracicaba e seu afluente, o ribeirão Quilombo, que corta a zona urbana no sentido N-S. O maior problema destes mananciais é a poluição, enquanto o rio Piracicaba recebe elevada carga de despejos industriais, o ribeirão Quilombo recebe esgotos urbanos e industriais das cidades de Campinas, Sumaré, Nova Odessa e Americana (DAEE, 1981).

O padrão da drenagem nessa bacia é subdentrítico, com baixa densidade de drenagens, principalmente onde se encontram os sedimentos cenozoicos e os arenitos do Subgrupo Itararé. No entanto, o controle estrutural segundo fraturas conjugadas ou isoladas e falhas de direções NW-SE, NE-SW e EW confere padrões locais de caráter subparalelo – treliça, angular ou retangular (IG, 1995).

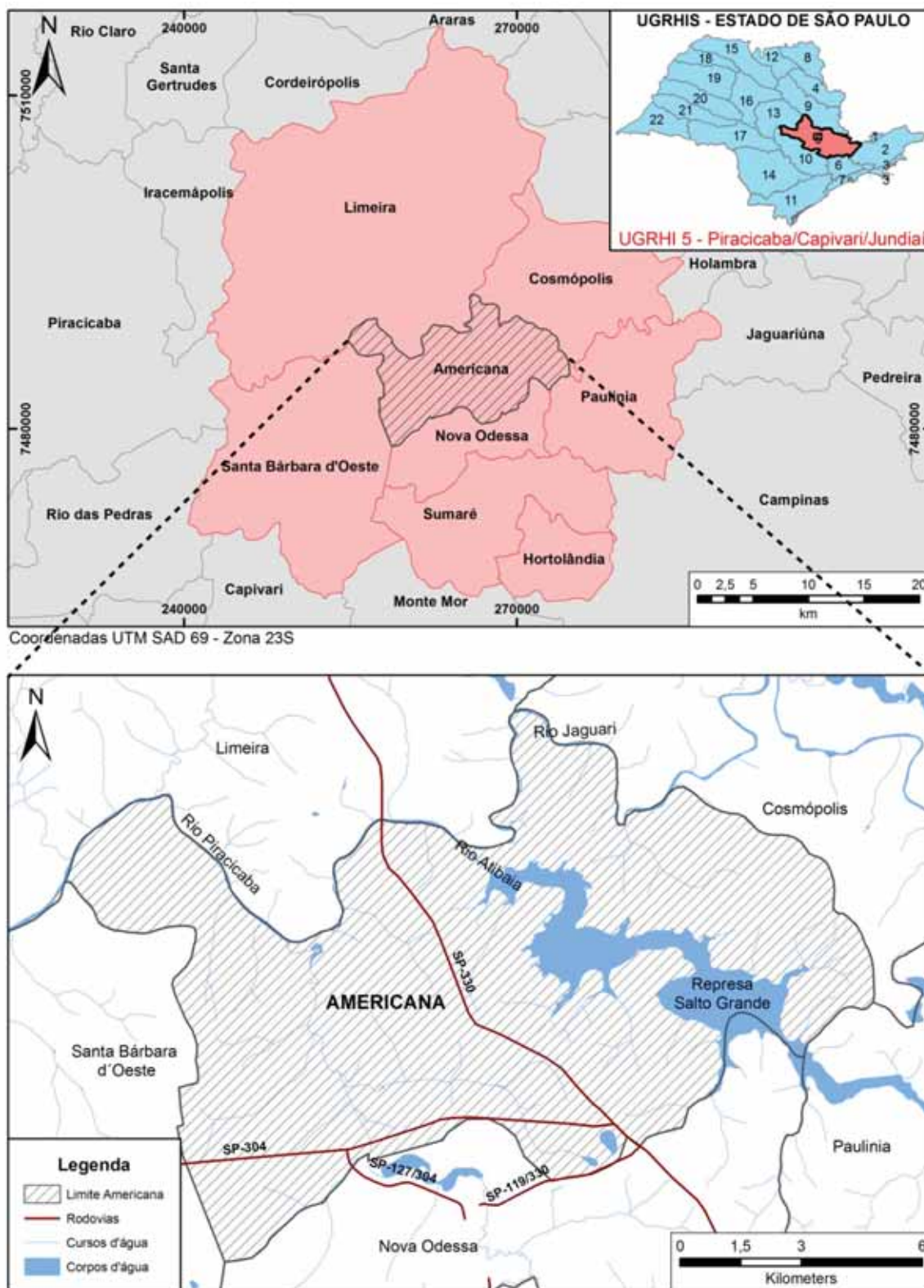


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. (Fonte: modificado de IBGE, 2007)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento, preparação e elaboração final deste trabalho foram cumpridas algumas etapas básicas (Figura 2), que podem ser resumidas da seguinte forma:

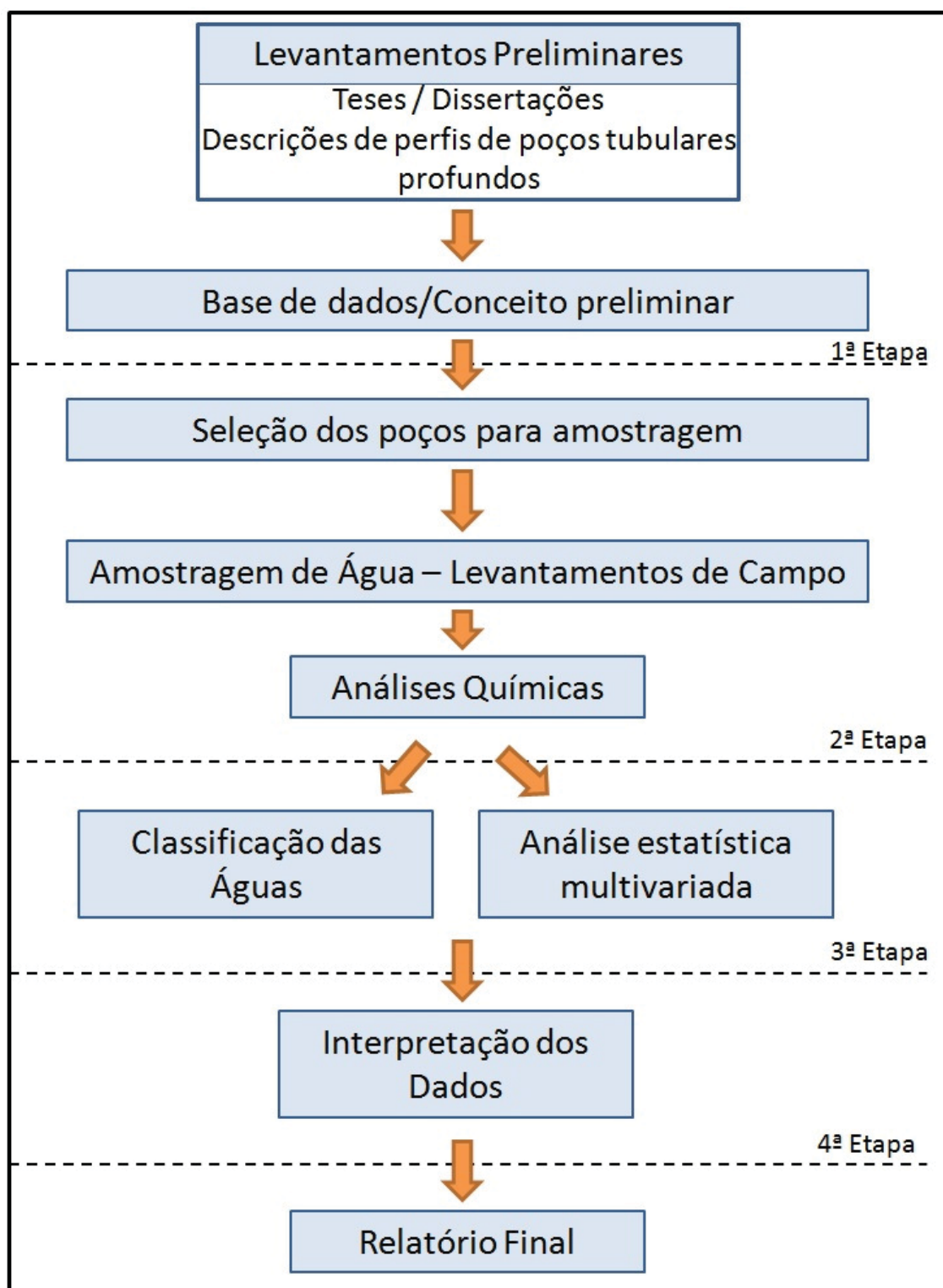


Figura 2. Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.

2.1. Levantamentos preliminares

Inicialmente foi realizado um levantamento das informações existentes sobre a área em estudo e o tema do trabalho. Nessa fase foram consultados artigos científicos, dissertações e teses, bem como efetuou-se a compilação de informações cartográficas como mapas geológicos e cartas topográficas. Posteriormente, para a caracterização da geologia de subsuperfície do município, foram levantadas informações referentes a poços tubulares de água subterrânea na base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e na Prefeitura Municipal de Americana.

Especial atenção foi dada aos poços com informações consistentes, particularmente quanto à descrição dos perfis litológicos, aos ensaios de bombeamento e às análises hidroquímicas. De posse dessas informações foi organizado um banco de dados contendo em seu cadastro coordenadas, perfil geológico, profundidade, aquífero explorado, além de outras informações relevantes, que serviram de base para a seleção dos poços a serem amostrados na etapa de campo.

2.2 Amostragem e análises de água subterrânea

Após contato prévio com a Prefeitura Municipal de Americana, foi efetuada a seleção de pontos de interesse para coleta de amostras de água, pontos estes escolhidos em função de sua importância (vazão dos poços) ou seu posicionamento geográfico (obtenção de malha de amostragem regular).

Foram realizadas duas campanhas para amostragem de água subterrânea nos meses de março e junho, totalizando coletas em 22 poços tubulares profundos utilizados pela Prefeitura Municipal de Americana para abastecimento público. Em todos os pontos coletados foram obtidas as coordenadas geográficas, com a utilização de GPS.

As amostras de água foram coletadas diretamente no cavalete dos poços ou na entrada dos reservatórios (Figura 3), evitando-se, dessa maneira, a alteração das propriedades químicas das águas subterrâneas representativas do aquífero. Em cada poço foram coletados dois frascos de polietileno, com volumes de 300 ml cada, e em seguida conservados sob refrigeração à temperatura de aproximadamente 4° C. As amostras foram encaminhadas ao laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, *câmpus* de Rio Claro.

Ainda em campo, foram medidos os seguintes parâmetros físico-químicos: pH, condutividade elétrica e temperatura das amostras. As medidas de condutividade foram

realizadas com condutivímetro DIGIMED, modelo DM-3P. O pH e a temperatura foram medidos com aparelho DIGIMED, modelo DM-3P (Figura 4).



Figura 3. Amostragem de água no Poço Antonio Zanaga da Prefeitura Municipal.



Figura 4. Equipamentos de medição dos parâmetros físico-químicos em campo.

As amostras de água coletadas em campo foram submetidas a análises físico-químicas, para determinar as concentrações de cátions e ânions principais.

Para a quantificação dos cátions metálicos Na^+ , K^+ , Li , NH_4^+ utilizou-se a Cromatografia de Íons. Os demais cátions (Ca^{2+} , Fe^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Sr^{+2} , Ba^{+2} , Zn^{+2} , Pb^{+2} , Si , Al^{+3} , Ni^{+2} , Cr^{+2} , P^{+3} e Cd^{+2} , foram analisados por Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma e Argônio Induzido (ICP-AES marca ARL, modelo 3410, com sistema de mini tocha e nebulização ultrassônica, marca CETAC, modelo U5000AT+).

Os ensaios por ICP foram realizados no laboratório do Centro de Estudos Ambientais (CEA/UNESP). Já para a determinação dos cátions metálicos por cromatografia foram realizados no laboratório de Hidrogeoquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, Câmpus de Rio Claro.

A análise da alcalinidade compreende a determinação de carbonatos, bicarbonatos e hidroxila (HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^-). Para efetuar essas análises, foi utilizada titulação potenciométrica empregando um eletrodo indicador de pH. Estas espécies químicas são de fundamental importância, pois determinam reações de equilíbrio que envolvem espécies carbonáticas, ácidos orgânicos e reações bioquímicas. As determinações dos ânions (F^- ,

CH_3COO , BrO_3 , ClO_2 , Cl^- , NO_2 , Br , NO_3 , PO_4 , SO_4 e C_2O_4) foram efetuadas no laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, *Câmpus* de Rio Claro. A metodologia empregada foi a cromatografia de íons com cromatógrafo de marca METROHM.

2.3 Processamento dos dados hidroquímicos

A partir dos resultados das análises hidroquímicas procedeu-se à interpretação e classificação das amostras por meio dos diagramas *Piper* e *Stiff*, utilizando o *software* RockWorks 1999.

O diagrama de Piper (Figura 5) é utilizado para classificar águas quanto aos seus íons dominantes. A classificação da água é baseada no ânion ou cátion, cuja concentração, expressa em meq/L, ultrapassa em 50% suas respectivas somas. Se nenhum deles ultrapassa este valor, a água é classificada segundo os ânions ou cátions mais abundantes. Para plotar no diagrama, transforma-se separadamente o valor de cada íon, expresso em meq/L, em percentagem dos totais de ânions e de cátions.

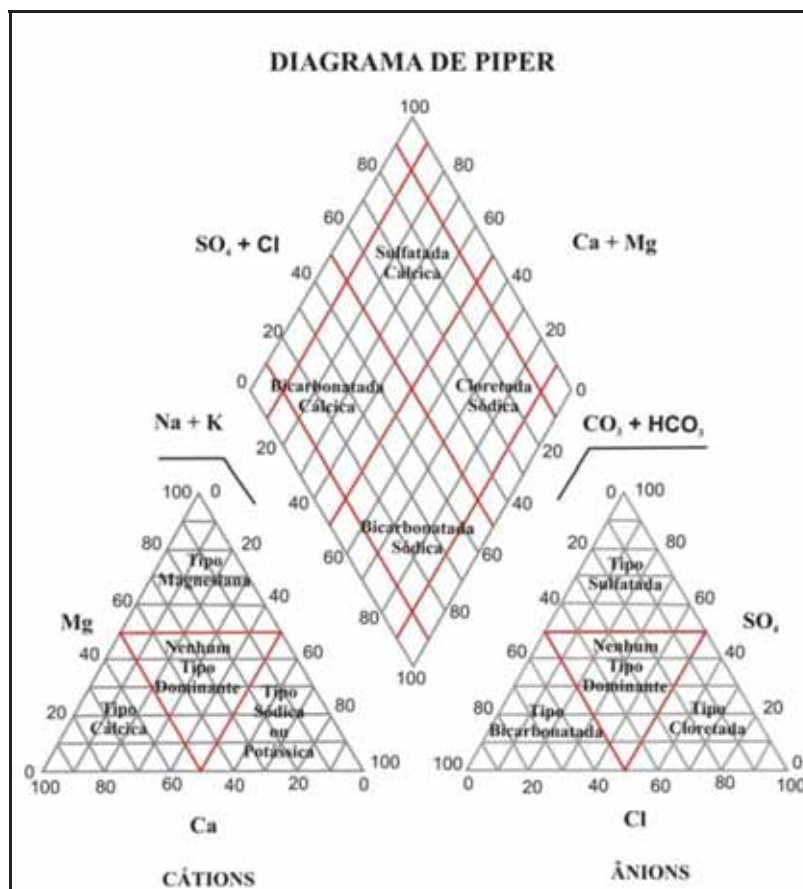


Figura 5. Diagrama de *Piper* com classificação dos tipos hidroquímicos.

O diagrama de *Stiff* (Figura 6) é a representação gráfica da composição química de uma amostra de água, permitindo uma rápida comparação entre diferentes amostras. As concentrações iônicas são expressas em miliequivalentes por litro (meq/L), sendo representadas por linhas dispostas à esquerda e à direita de uma linha vertical que representa o valor zero de concentração. Os cátions (Ca^{2+} , Mg^{+2} , Na^{+2} , K^{2+} , Fe^{+2}) são plotados à esquerda dessa linha, enquanto os ânions (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) são plotados à direita. Os pontos gerados são interligados resultando numa figura geométrica característica para cada amostra de água analisada, facilitando sua classificação.

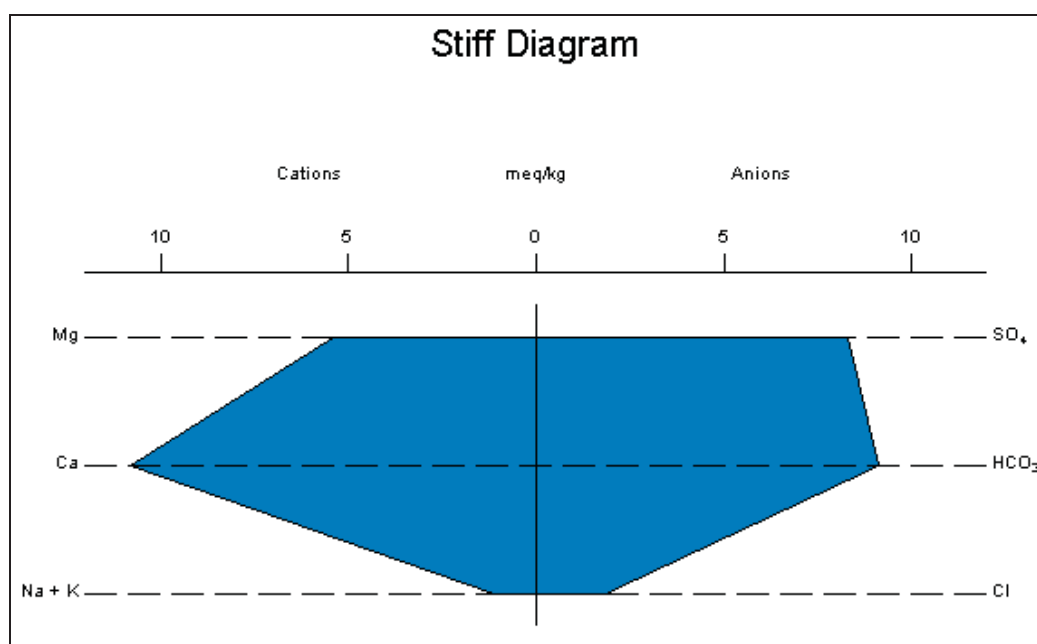


Figura 6. Diagrama representativo de *Stiff*.

2.4 Análise estatística multivariada dos dados hidroquímicos

Baseado nos resultados hidroquímicos foi feita uma análise estatística visando relacionar os grupos hidroquímicos encontrados a partir dos diagramas *Piper* e *Stiff* com o dendrograma estatístico. Para tanto, foi feita análise de agrupamento (*cluster analysis*) e análise de componentes principais utilizando o *software* Xlstat e considerando uma estrutura multidimensional, tanto sob o enfoque clássico como espacial.

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

3.1. Geologia Regional

O município de Americana está situado no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, a qual compreende uma área de aproximadamente 1.500.000 km², ocupando parte dos territórios do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (Figura 7). Dentro do território brasileiro, a Bacia do Paraná ocorre nos estados de Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Trata-se de uma bacia intracratônica do tipo sinéclise, de forma ovalada, com eixo principal de direção N-S, e mergulho centrípeto das camadas, atingindo uma espessura máxima de 7000 m em seu depocentro, localizado próximo à tríplice fronteira Brasil-Argentina-Paraguai (Milani, 2004).



Figura 7. Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul (MELO, 1997).

Os sedimentos foram depositados diretamente sobre o embasamento cristalino pré-cambriano (Cráton Rio de la Plata) e apresenta contatos erosivos a leste, resultantes do soerguimento crustal relacionado ao rifteamento que deu origem ao Atlântico Sul, enquanto a

borda norte-nordeste, de natureza arenosa, aparenta demarcar um limite deposicional original. É limitada a oeste por uma feição positiva conhecida como Arco de Assunção, estendendo-se ainda a sul-sudoeste para a Argentina e Uruguai (MILANI *et al.*, 2007).

Seu registro sedimentar compreende depósitos que se estendem desde o Ordoviciano ao Neocretáceo, sendo subdivididos por Milani (2004) em seis supersequências (Figura 8). Tais sequências são definidas por discordâncias erosivas, sendo denominadas, da mais antiga para a mais recente: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso-Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo).

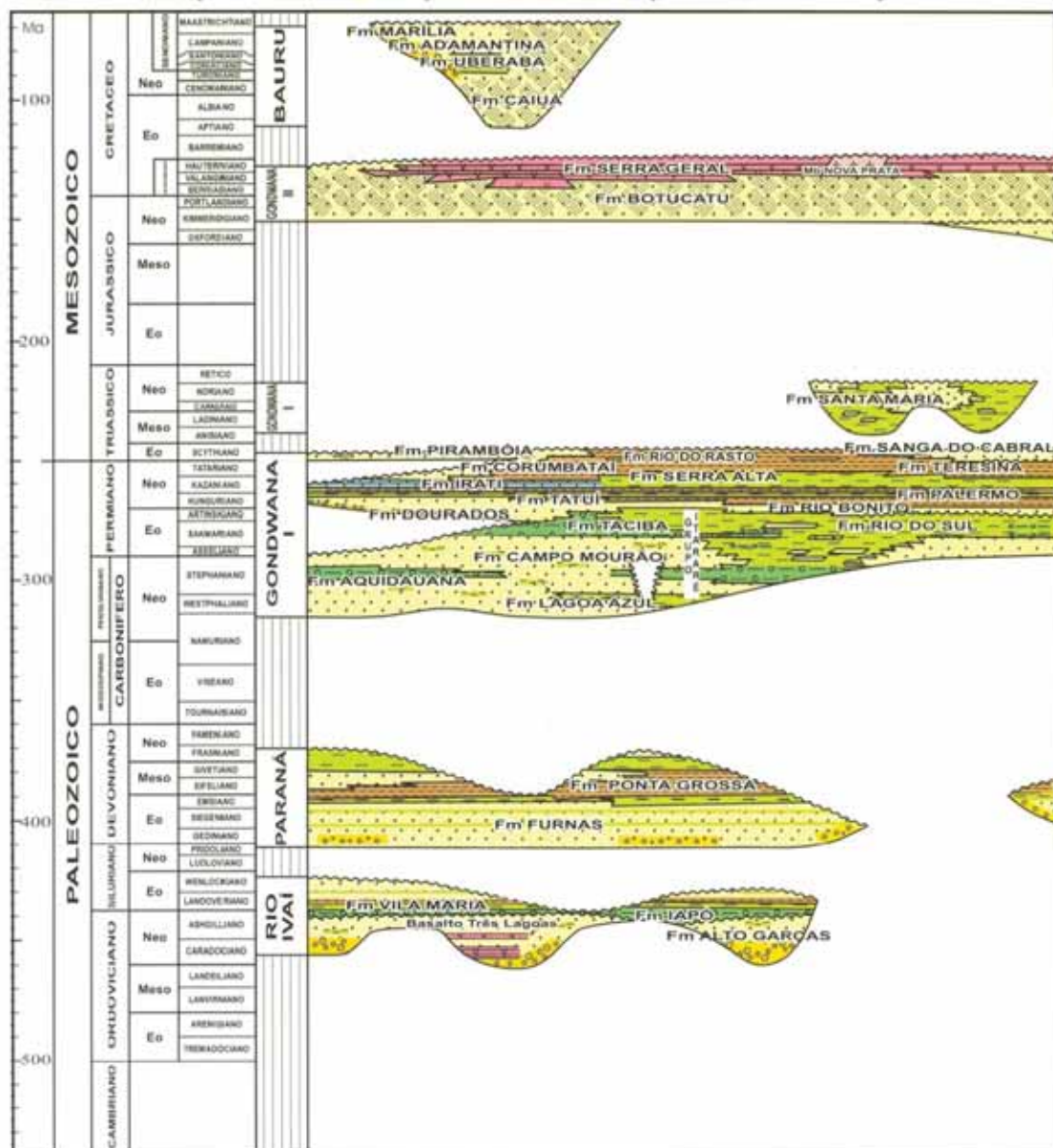


Figura 8. Coluna cronoestratigráfica da Bacia do Paraná (Milani, 2004).

No Eocretáceo, a crosta terrestre foi submetida a um grande fissuramento, associado a magmatismo basáltico de grandes proporções. Neste evento rompeu-se o megacontinente Gondwana e iniciou-se a abertura do oceano Atlântico Sul. O magmatismo Serra Geral marcou o fim de eventos de sedimentação na grande área interior do megacontinente (MILANI *et al.*, 2007).

A bacia é dominada por estruturas geológicas lineares em três direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W (ZALÁN *et al.*, 1990). As principais feições NW-SE são representadas pelo Arco de Ponta Grossa, o Sinclinal de Torres e o Arco do Rio Grande. As falhas de Guaxupé, Taxaquara e Lancinha-Cubatão compreendem três importantes exemplos de estruturas NE-SW, enquanto os lineamentos de Mogi Guaçu-Dourados, São Sebastião e Bento Gonçalves caracterizam elementos de direção E-W.

3.2. Geologia Local

No município de Americana são encontradas rochas pertencentes à supersequência Gondwana I de Milani (2004) (Carbonífero-Eotriássico), representada pelos grupos Tubarão e São Bento, recobertos por sedimentos quaternários pouco consolidados.

3.2.1 Grupo Tubarão

O Grupo Tubarão é formado por sedimentos permocarboníferos da Bacia do Paraná, apresentando área aflorante de 22.000 km² no estado de São Paulo. Esta unidade constitui uma das mais expressivas da Bacia do Paraná, atingindo espessuras superiores a 1000 m na porção central da bacia.

No estado de São Paulo, este grupo é subdividido em dois pacotes: o inferior, depositado sob condições glaciais, constituído por rochas do Subgrupo Itararé e Formação Aquidauana; e o superior, de origem pós-glacial, representado pelos sedimentos da Formação Tatuí (ROCHA-CAMPOS, 1967; LANDIM & FULFARO, 1972; SOARES, 1972; LANDIM, 1973 apud VIDAL, 2002),

França & Potter (1988), com base em testemunhos de sondagens e perfis geofísicos de poços perfurados para a pesquisa de petróleo, utilizam a denominação de Supergrupo Tubarão, subdividindo-o em Grupo Itararé, na base, e Grupo Guatá, no topo.

Desde os primeiros estudos envolvendo a subdivisão do Subgrupo Itararé, a falta de continuidade lateral dos pacotes rochosos e de camadas guias representou uma grande dificuldade para o reconhecimento de subdivisões na unidade. Esta situação está condicionada, em parte, à variabilidade dos ambientes de sedimentação que presidiram a deposição desse conjunto de rochas na porção norte da Bacia do Paraná (CAETANO-CHANG, 1984).

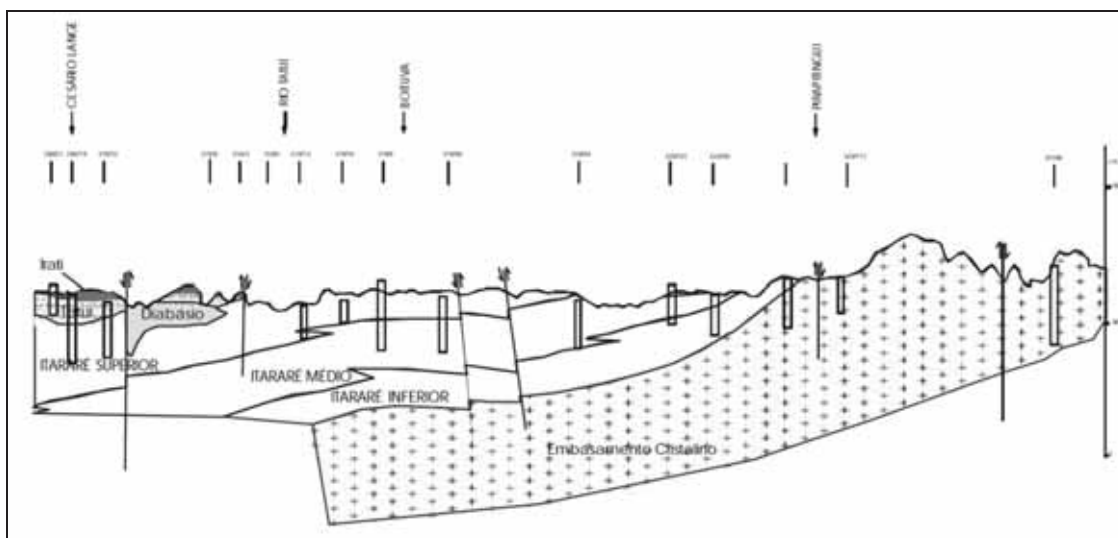
Em uma das inúmeras tentativas de subdivisão do Subgrupo Itararé, DAEE-UNESP (1979) o subdivide em três unidades: Inferior, Médio e Superior (Figura 9). De forma geral, as unidades, Inferior e Superior, são mais arenosas, enquanto a unidade Média apresenta predomínio de sedimentos finos.

A unidade superior do Subgrupo Itararé é caracterizada pela predominância de diamictitos de matriz argilosa e/ou arenosa, com seixos de tamanhos e formas variadas; os corpos de diamictitos são maciços, apresentando frequentes intercalações de arenitos e siltitos, estes últimos com abundantes estruturas sedimentares. Interpretando a disposição das litologias da unidade superior é possível notar uma gradual diminuição de seixos para norte, tanto em tamanho quanto em quantidade; paralelamente, tornam-se cada vez menos frequentes as intercalações de corpos arenosos para norte.

A unidade média do Subgrupo Itararé é caracterizada por uma ampla distribuição granulométrica dos arenitos, desde muito finos a grossos, com frequentes intercalações de siltitos e argilitos. Tanto os siltitos quanto os arenitos mostram variações laterais e verticais bastante significativas; estruturas sedimentares são abundantes, dominando a estratificação cruzada acanalada e a estratificação planoparalela.

Na unidade inferior do Subgrupo Itararé predominam diamictitos de matriz argilosa, siltitos, argilitos e arenitos, sendo a estratificação planoparalela a estrutura sedimentar mais comum. São também frequentes nessa associação ocorrências de camadas de arenitos e siltitos, dobradas e contorcidas, evidenciando fenômenos de escorregamento. A unidade inferior encontra-se em grande parte recoberta pelos litotipos das unidades superior ou média do Subgrupo Itararé.

A região de Americana apresenta falhas que se dispõem, de maneira geral, em duas direções preferenciais: N30-50E e N20-40W (COTTAS *et al.*, 1981).



Em estudos conduzidos na região de Americana, IG/SMA (1995) divide o Subgrupo Itararé em quatro associações faciológicas, correspondentes às unidades de mapeamento dentro da área de estudo (Figura 10). Essas unidades são descritas a seguir.

➤ **Iam** – Constituídos por arenitos médios a grossos, bem selecionados, subarcoseanos, com estratificações cruzadas de médio a grande porte e planoparalelas; apresentam granodecrescência ascendente ou descendente, ocorrendo em pacotes de espessura métrica. Associados, ocorrem arenitos finos a médios, bem selecionados, maciços e com estruturas de fluidização (*dish*), conglomerados polimíticos, grossos, que ocorrem preenchendo estruturas de corte; arenitos conglomeráticos estratificados e com granodecrescência ascendente.

➤ **Iaf** – Predominam arenitos finos ou muito finos (silto-argilosos), esbranquiçados, com grande variedade de laminações (ondulada, acanalada, planoparalela ou cruzada de baixo ângulo, *climbing ripple*, *hummocky*) com intercalações de arenitos finos maciços.

➤ **Ira** – É representado por associação de ritmitos e arenitos finos, com alternância de lâminas ou camadas argilosas (até 0,5 cm) e arenosas (de 1 mm até 20 cm), que podem apresentar laminações do tipo *climbing ripple-drift* ou onduladas. Intercalam-se com camadas métricas até decimétricas de arenitos muito finos ou laminados, argilitos laminados ou siltosos com laminação incipiente e ocasionais lamitos maciços com seixos. Apresentam muitas dobras convolutas e o acamamento mergulha ao redor de 20° para SW, S ou W.

➤ **Ils** - Lamitos (50% a 75% de silte+argila e 50% a 25% de areia) e arenitos pelíticos (25% a 50% de silte+argila e 75% a 50% de areia), ambos maciços, com grânulos e seixos esparsos, além de ocasionais blocos e raros matacões (todos de litologia muito variada). Alguns são facetados e estriados. Contêm corpos disformes e esparsos de arenitos finos, cuja frequência aumenta em direção ao topo da unidade. O acamamento está bastante deformado e mergulha entre 15° e 40° para SW, S ou W.

3.2.2 Grupo São Bento

O Grupo São Bento é representado pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. Entretanto, na área de estudo afloram somente rochas intrusivas da Formação Serra Geral (Figura 10), à qual será dado maior destaque.

A Formação Serra Geral está associada a um evento magmático que resultou nas rochas intrusivas básicas que são formadas por diabásios, em formas de diques e *sills*. Os corpos mais alongados podem se orientar segundo as direções NE, NW ou EW acompanhando zonas de fraturamento anteriores e/ou contemporâneos ao magmatismo (IG/SMA, 1995).

Os diabásios apresentam granulação fina a média, maciços, por vezes com forte magnetismo e raramente com fenocristais pretos de piroxênios. Os solos derivados desses corpos básicos apresentam coloração vermelho-escura, indicando alto teor de ferro e argila, característico dessa litologia.

Seignemartin *et al.* (1979) discorrem sobre a ocorrência de um grande *sill* de diabásio exposto pela erosão em algumas áreas do município de Americana, especialmente onde está localizada boa parte do sítio urbano, além da existência de pequenos diques.

Cessadas as atividades vulcânicas e promovidos os ajustes isostáticos, definiu-se uma depressão sobre o pacote basáltico, onde, durante o Neocretáceo, viria a se acumular a derradeira supersequência na área ocupada pela Bacia do Paraná. O material siliciclástico proveniente de alteração e erosão de rochas paleozoicas e pré-cambrianas, expostas nas bordas, alcançou o interior da bacia após erosão e transporte por centenas de quilômetros, depositando-se assim a sequência sedimentar denominada Bauru (MILANI, 2007).

3.2.3 Depósitos Cenozoicos

Esses depósitos ocupam grandes extensões do município de Americana (Figura 10), recobrando os sedimentos do Subgrupo Itararé e as rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, sendo correlacionados à Formação Rio Claro por Landim & Soares (1979), que associam sua origem ao soerguimento continental e à implantação de novas bacias hidrográficas regionais (LANDIM & SOARES, 1979).

Tais sedimentos são pouco compactados com elevada porosidade texturalmente imaturos; os solos derivados são arenosos e argilosos. Fernandes & Ferreira (1994) subdividem os depósitos cenozoicos em duas unidades de mapeamento, diferenciadas com base nos litotipos que as compõem. A unidade mais antiga é representada por depósitos fluviais do tipo meandrante, ocupando posição no topo das colinas ou em meia encosta, que correlacionam à Formação Rio Claro. A outra unidade é representada por depósitos coluvionares sobrepostos.

Associados à rede de drenagem atual, são reconhecidos depósitos quaternários formados por arenitos médios a grossos, subordinadamente arenitos finos, com estratificação planoparalela e cruzada, e cascalheira na base (IG/SMA, 1995).

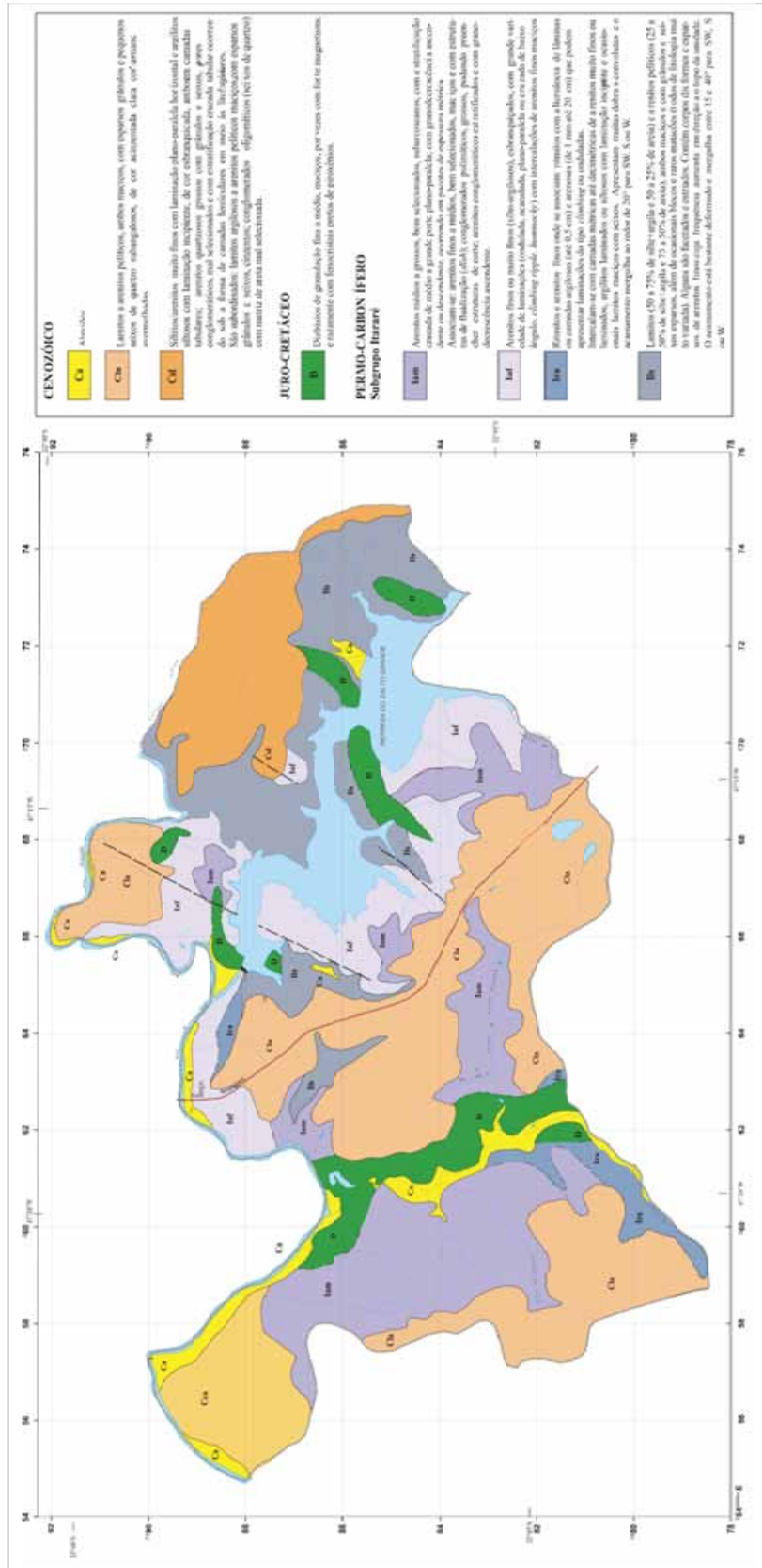


Figura 10. Mapa geológico do município de Americana (IG/SMA, 2009).

4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

No estado de São Paulo são reconhecidos dois grandes compartimentos hidrogeológicos: Domínio Cristalino e Domínio Sedimentar. O primeiro caracteriza-se pelo fluxo de água através de descontinuidades como falhas, juntas e fraturas nas rochas do Embasamento Cristalino e o outro através dos poros das rochas sedimentares.

O município de Americana está localizado sobre o Sistema Aquífero Tubarão, de extensão regional, e que aflora em uma faixa estreita de aproximadamente 20.700 km², que se estende de nordeste a sul do estado de São Paulo, passando por cidades como Casa Branca, Americana, Itapetininga, Itu e Itararé (Figura 11). Essa unidade é caracterizada por apresentar uma produtividade baixa, com vazões geralmente, abaixo de 10 m³/h (IRITANI & EZAKI, 2009).

Massoli *et al.* (1986) executaram análises granulométricas, por meio de pipetagem e peneiramento em 55 amostras do Subgrupo Itararé, coletadas nas proximidades de Cerquilha. Entre as amostras analisadas, os autores concluíram que os arenitos não constituem bons aquíferos, por apresentarem altos teores de finos (silte + argila), predominância da fração areia fina a muito fina e ocorrência em corpos de pequenas espessuras. Segundo esses autores, os arenitos apresentam composição média de 62% de areia, 19% de silte e 19% de argila.

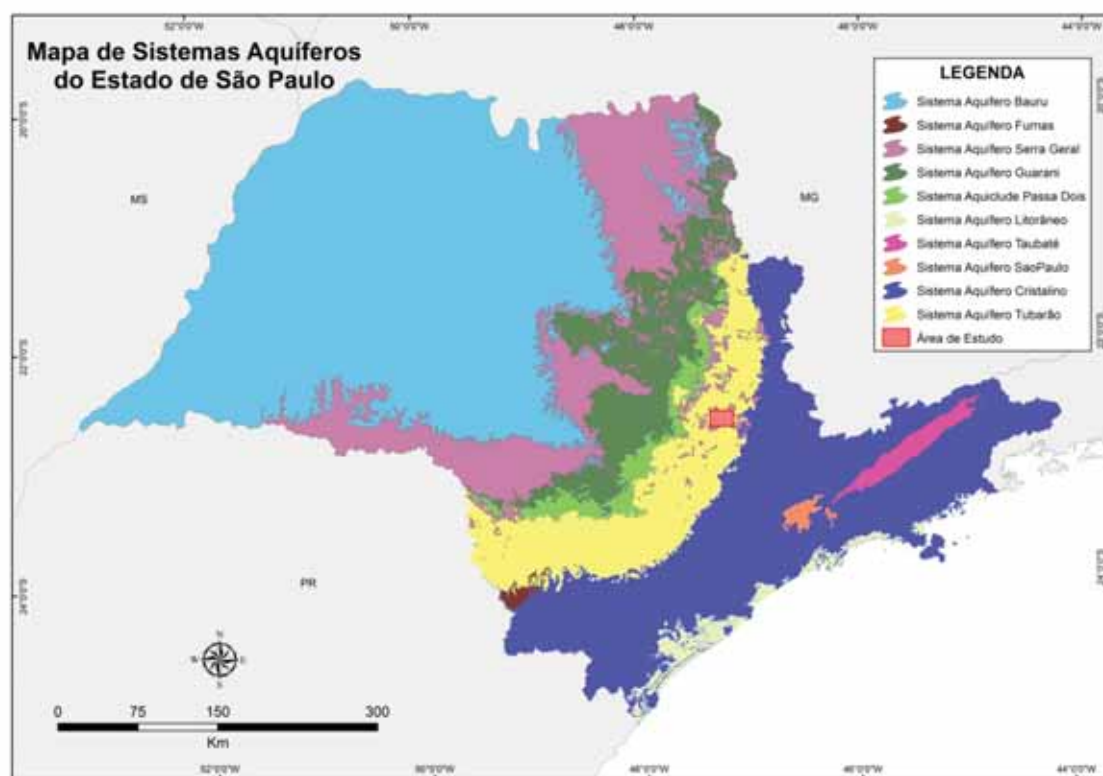


Figura 11. Mapa das Unidades Aquíferas do estado de São Paulo (Fonte: Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, 2009)

Apesar de apresentar maior teor de sais em comparação com outros aquíferos do estado de São Paulo, devido principalmente ao enriquecimento de suas águas em sódio, fluoreto e sulfato, o SAT apresenta características apropriadas para o consumo humano e outros usos em geral (IRITANI & EZAKI, 2009).

A heterogeneidade é uma característica marcante deste aquífero, sendo comum encontrar poços próximos com vazões bem diferentes. Essa particularidade é resultado da alternância entre sedimentos grossos e finos com espessuras variadas, o que se reflete na circulação de água subterrânea, tornando a pesquisa e exploração do recurso extremamente difíceis (STEVAUX *et al.*, 1987).

Complementando o arcabouço complexo do SAT, inúmeras intrusões de diabásio localmente, ou mesmo regionalmente, interrompem a continuidade do reservatório. Nesses corpos de diabásio podem ocorrer acúmulo e transmissão de água, associados a sistemas de fraturamento existentes nestas rochas, caracterizando assim aquíferos localizados, descontínuos e heterogêneos (DAEE, 1981).

Vidal (2002), avaliando os dados de produção de poços perfurados no SAT na região de Campinas, encontrou vazões médias de 9,42 m³/h, com variação de 1 m³/h a

140 m³/h. Esse autor indicou fluxo regional das águas subterrâneas, de leste para oeste, ou seja da borda para o interior da Bacia do Paraná, podendo apresentar direções N-S próximo a vales dos principais rios da região.

No município de Americana foram cadastrados 249 poços tubulares profundos, dos quais 216 exploram água somente do SAT, 21 exploram água dos SAT e de corpos de diabásio, e outros 12 não informam o aquífero explorado; o volume atual extraído é da ordem de 5×10^6 m³/ano, sendo que 50% desse volume é destinado a uso industrial (BIAZZI, 2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Arcabouço geológico

Com base nas informações dos perfis de sondagem obtidas do SIAGAS, bem como nos perfis geológicos fornecidos pela Prefeitura Municipal de Americana, buscou-se detalhar a geologia de subsuperfície do Subgrupo Itararé no município de Americana. Para tanto, foram avaliadas as descrições de amostras de calha provenientes dos poços levantados, o que permitiu apenas uma visão geral da distribuição das fácies do Subgrupo Itararé em subsuperfície. Para uma análise mais detalhada, que ressalte os aspectos geométricos dos corpos sedimentares, seria recomendada a avaliação de perfis geofísicos, não disponíveis para este estudo.

A partir dessas informações, foi calculada, para cada poço, a porcentagem relativa de sedimentos finos (siltitos, argilitos, folhelhos) e sedimentos grossos (arenitos finos a grossos, diamictitos), excluindo-se as rochas intrusivas básicas. Foi então calculada a relação entre os sedimentos grossos e finos, a partir da qual foi gerado mapa de isovalores, com interpolação por análise de superfície de tendência de 2º grau, com auxílio do *software* ArcGis (Figura 12).

A partir da avaliação dessa superfície de tendência, é possível notar uma maior porcentagem de sedimentos grossos na área central do município, com tendência de aumento dos sedimentos finos para norte e sul, enquanto que para leste e oeste predominam sedimentos grossos.

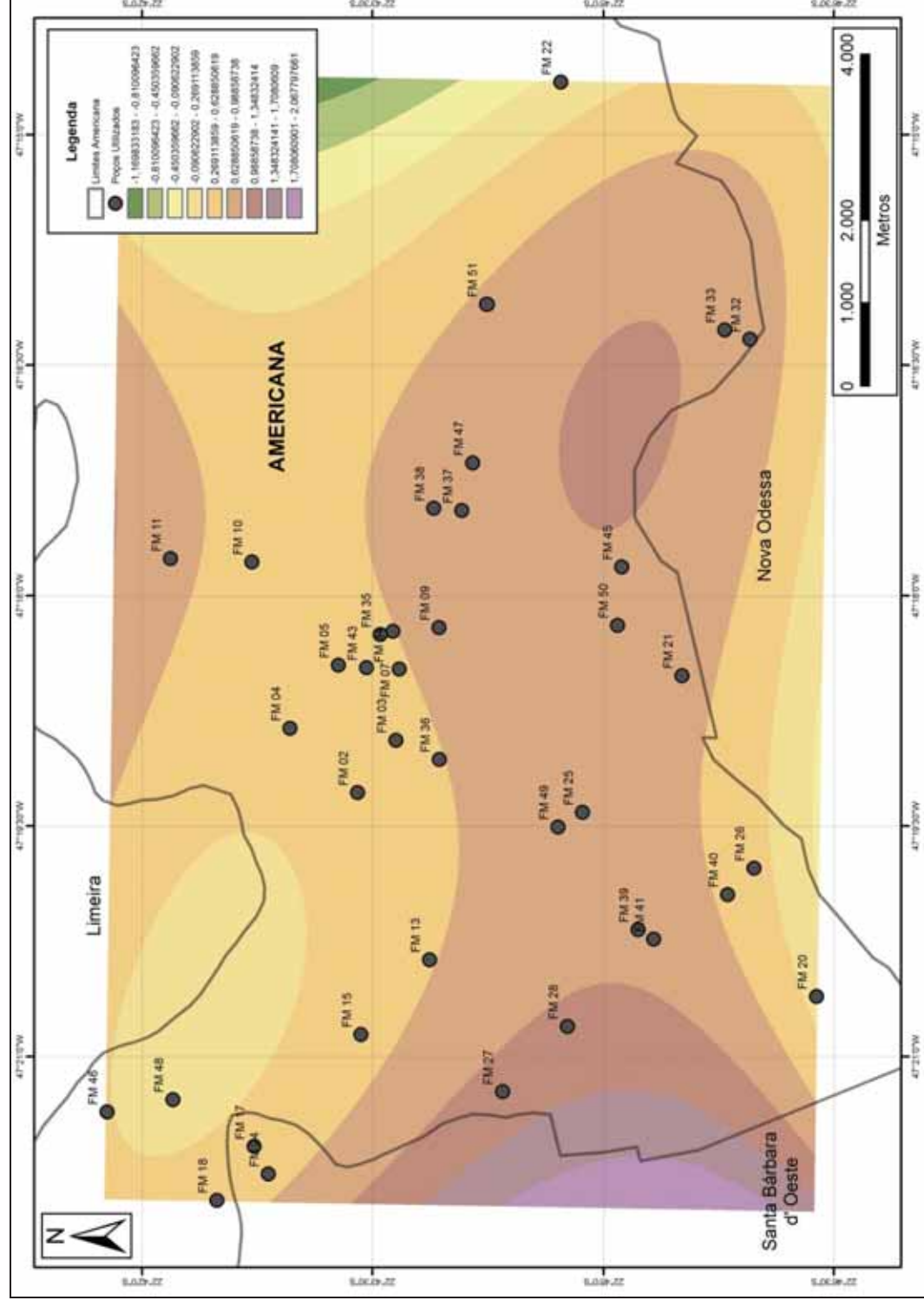


Figura 12. Mapa de distribuição da proporção dos sedimentos grosso-finos.

5.2. Hidroquímica

Para a classificação hidroquímica do Sistema Aquífero Tubarão no município de Americana foram realizadas duas campanhas de amostragem (nos meses de maio e junho/2011) de água subterrânea, em 22 poços tubulares profundos utilizados pela Prefeitura Municipal para abastecimento público. A distribuição espacial das amostras está apresentada na figura 13 e sua composição na tabela 1.

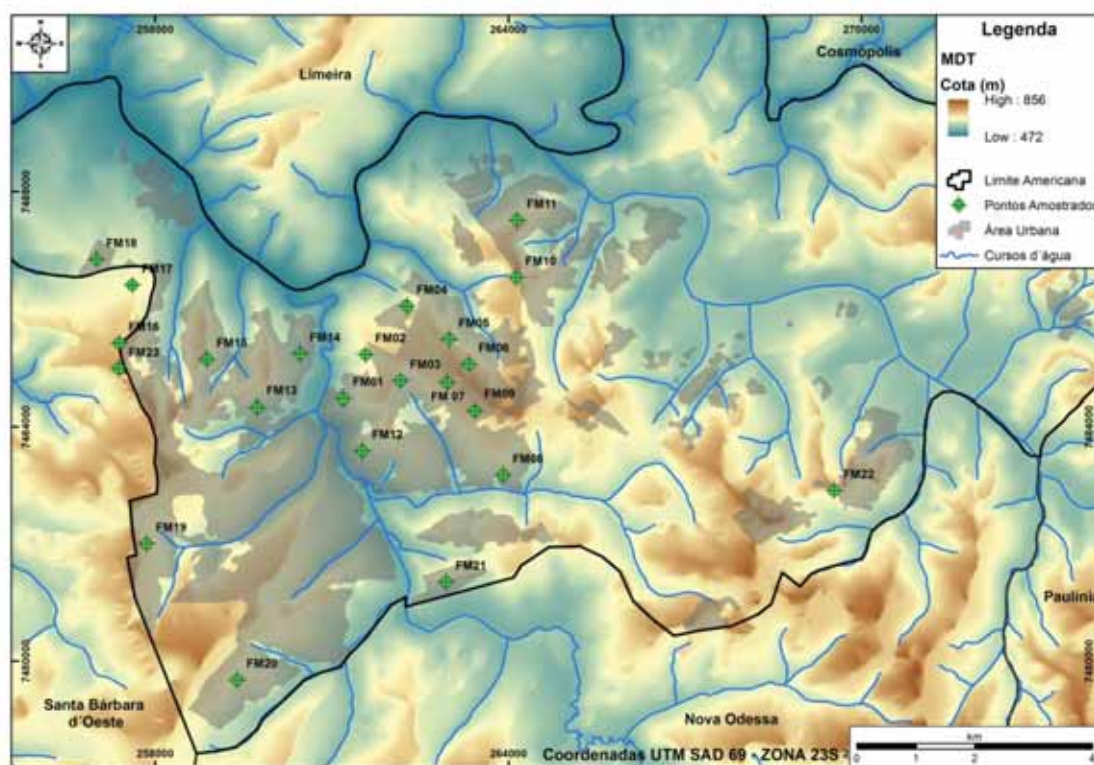


Figura 13. Localização espacial dos pontos amostrados.

Tabela 1. Parâmetros físicos e composição química das águas subterrâneas do SAT.

Identificação da amostra	Coordenadas		T (°C)	CE (µS/cm)	pH	HCO ₃ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Na (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	K (mg/L)	Ba (mg/L)	Ca (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)	Zn (mg/L)	Erro	Na/Ca
	X	Y																					
FM 01	261195	7484475	20,2	225	6,4	21	0,041	20,8	0	43,4	0	19	2,92	0,35	0,033	7,14	0	3,64	0,019	9,47	3,96	4,2	2,66
FM 02	261575	7485224	20,3	153,8	7,88	97,7	0,086	0,046	0	0	0,83	23,3	0,63	0,45	0,03	11,2	0	0,078	0	12,4	0	0,24	2,08
FM 03	262166	7484773	20,4	213	7,27	131	0,046	0,14	0	0	1,98	19,8	0,2	1,93	0,26	20	0,5	3,47	0,17	19,6	0	1,25	0,99
FM 04	262279	7486048	22	175,6	7,16	108	0,059	0,46	0	0	1,41	11,8	0,53	1,78	0,09	20,2	0	2,99	0	24,6	0,42	1,47	0,58
FM 05	262992	7485478	21,9	205	7,62	127	0,057	0,13	0	0	3,35	35,5	0,25	0,75	0,27	10,6	0	0,48	0	10,4	0,071	0,08	3,35
FM 06	263328	7485057	21,9	157,8	7,13	42,6	0,045	15,9	0,064	6,98	3,21	20,8	0,13	1,96	0,15	5,69	0	0,89	0,01	9,35	0,035	-0,15	3,66
FM 07	262962	7484745	21,9	206	7,99	120	0,057	0,18	0,087	0,63	5,45	35	0,09	0,66	0,24	10,3	0	0,42	0	10,3	0,037	0,1	3,4
FM 08	263913	7483180	21,9	122,3	6,92	66,1	0,028	0,041	0	0	1,57	8,2	0,68	3,08	0,13	9,87	0	2,06	0,08	25	0,66	2,01	0,83
FM 09	263429	7484276	22	239	7,68	150	0,032	0,058	0	0	2,44	38,7	0,28	0,93	0,32	14,5	0	0,99	0	15,7	0,036	0,64	2,67
FM 10	264127	7486535	22	136,4	7,19	75,1	0,046	1,53	0,048	2,4	2,56	10,7	1,53	1,46	0,016	13,6	0,035	1,94	0	17,2	1,62	4,34	0,79
FM 11	264149	7487514	21,8	242	5,83	19	0,037	22,7	0,13	67,9	1,04	23,5	0,44	3,45	0,44	10	0	5,26	0,025	14,6	0,035	0,17	2,35
FM 12	261521	7483595	21,8	106,9	6,97	63,1	0,098	0,36	0	0,85	0,5	10,6	0,094	1,81	0,034	9,15	0	1,44	0	23,2	0,025	1,98	1,16
FM 13	259727	7484331	21,8	194,9	6,88	80,2	0,14	7,59	0	18	0,45	12,6	0	2,92	0,025	17,5	0	4,67	0	21,8	0,022	1,74	0,72
FM 14	260459	7485235	21,8	176,1	7,24	82,2	0,15	3,2	0	12,8	3,38	21,3	0,034	0,59	0,033	11,9	0	2,55	0	14,4	0,013	0,84	1,79
FM 15	258879	7485142	21,8	172	7,51	104	0,14	0,27	0	0	5,61	36,8	0,4	0,49	0,048	3,56	0	0,15	0	11,4	0,44	0,17	10,34
FM 16	257387	7485418	21,8	19,18	6,74	11,1	0,01	0,049	0	0,11	0,3	1,84	0,057	2,2	0,015	0,33	0	0,14	0	10,5	0,021	-6,36	5,58
FM 17	257612	7486407	21,8	129,6	5,08	2,12	0,058	10,9	0	38,9	0,094	17,6	0,057	1,75	0,18	1,14	0,12	0,62	0,061	5,65	0,023	-1,22	15,44
FM 18	257005	7486845	21,6	67,2	5,75	4,24	0	6,83	0	16,4	0,079	9,52	0,036	1,14	0,036	0,76	0,013	0,33	0,012	6,49	0,017	-1,56	12,53
FM 19	257848	7482009	21,6	202	7,21	96,9	0,27	10,7	0	0	3,83	37,2	1,64	1,51	0,06	1,85	0,016	1,55	0,092	3,71	0,16	-0,11	20,11
FM 20	259392	7479684	22	182,5	6,82	114	0,071	0,34	0	0,58	2,05	15,3	0,36	2,26	0,33	18,8	0	3,53	0	22,4	0,3	1,5	0,81
FM 21	262940	7481357	21,9	203	7,54	118	0,074	0,79	0	0	8,04	32,9	0,14	0,52	0,084	13,4	0,25	0,23	0	10,3	0,034	0,82	2,46
FM 22	269531	7482915	21,9	142,4	6,63	92,2	0,084	1,89	0,044	2,18	0,6	15,7	0,088	2,71	0,2	11,7	0	3,44	0	22	0	0,63	1,34

A validação das análises químicas realizadas foi definida a partir do cálculo de erro de balanço iônico, que se presta a verificar a qualidade dos resultados, utilizando-se a equação:

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

onde $\Sigma \hat{Anions}$ ou $\Sigma \hat{Cations}$ representam a somatória das concentrações dos ânions e cátions, respectivamente, em meq/L.

A avaliação do balanço iônico das análises mostrou que, dentre as amostras analisadas, 77% apresentaram erros positivos, indicando concentrações superiores de ânions, enquanto que 23% apresentaram erros negativos. Todos os resultados apresentaram erros inferiores a 5%, exceto a amostra FM-16, com erro de 6,36 %, valor este dentro do permitido.

As amostras coletadas apresentam pH neutro a alcalino, com valores que oscilam entre 5,08 a 7,99, enquanto a condutividade elétrica média é de 166,89 $\mu\text{S/cm}$, com alto valor de desvio padrão provocado por baixos valores de até 19,18 $\mu\text{S/cm}$. A tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados mínimo, máximo e médio obtidos das análises químicas e o respectivo desvio padrão.

Esses resultados estão de acordo com o observado por DAEE (1981a), que para a região de Americana registra valores de condutividade elétrica inferiores a 350 $\mu\text{S/cm}$ e pH com variação entre 5,6 e 8,9, com maior frequência de valores alcalinos.

Tabela 2. Estatística básica das variáveis envolvidas na análise físico-química.

	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
CE ($\mu\text{S/cm}$)	166,89	19,18	242,00	55,03
pH	6,97	5,08	7,99	0,71
HCO₃ (mg/L)	78,43	2,12	150,00	44,52
F (mg/L)	0,07	0,00	0,27	0,06
Cl (mg/L)	4,77	0,04	22,70	7,09
NO₂ (mg/L)	0,02	0,00	0,13	0,04
NO₃ (mg/L)	9,60	0,00	67,90	17,99
PO₄ (mg/L)	0,06	0,00	0,69	0,19
SO₄ (mg/L)	2,22	0,00	8,04	2,11
Li (mg/L)	0,01	0,00	0,02	0,01
Na (mg/L)	20,80	1,84	38,70	10,90
NH₄ (mg/L)	0,48	0,00	2,92	0,70
K (mg/L)	1,58	0,35	3,45	0,93
Al (mg/L)	0,01	0,00	0,18	0,04
Ca (mg/L)	10,15	0,33	20,20	6,11
Fe (mg/L)	0,04	0,00	0,50	0,12
Mg (mg/L)	1,86	0,08	5,26	1,60
P (mg/L)	0,06	0,00	0,30	0,10
Si (mg/L)	14,57	3,71	25,00	6,50

Com base nos resultados analíticos (Tabela 1), foi feita a classificação hidroquímica com auxílio do diagrama Piper (Figura 14). A partir da análise dos resultados, é possível classificar as águas subterrâneas do SAT em três grupos hidroquímicos principais: bicarbonatadas cálcio-sódicas (Grupo 1), que corresponde a 41% das amostras, bicarbonatadas sódicas (Grupo 2), correspondente a 36% das amostras e cloretadas sódicas (Grupo 3), que corresponde a 23% das amostras coletadas. A figura 15 apresenta a distribuição espacial dos tipos hidroquímicos na área de estudo, utilizando diagramas de Stiff.

Essa distribuição é concordante com a observada por outros autores, que classificam as águas do SAT como fracamente salinas e essencialmente bicarbonatadas sódicas e cálcicas (TALTASSE, 1968; DIOGO *et al.*, 1981; DAEE, 1984).

Diogo *et al.* (1981) apontam que, de forma geral, as águas provenientes da Unidade Inferior do Subgrupo Itararé são bicarbonatadas sódicas, e aquelas provenientes da Formação Aquidauana ou das unidades Superior e Média do Subgrupo Itararé, apresentam-se como bicarbonatadas cálcicas. As águas da Formação Aquidauana, por sua vez, apresentam menores concentrações salinas em relação às águas do Subgrupo Itararé, entretanto para a região de Americana não é possível fazer essa distinção.

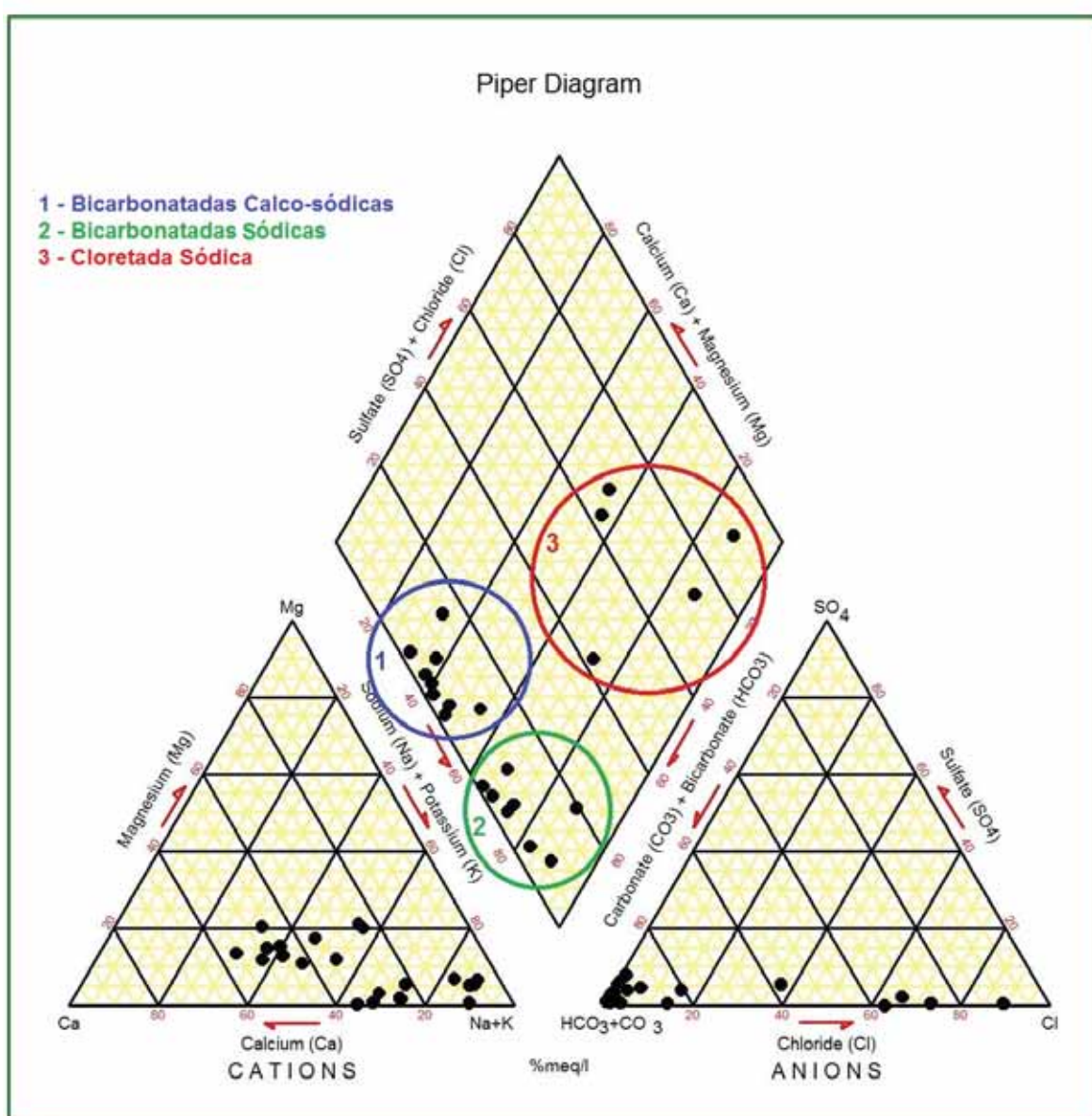


Figura 14. Classificação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Tubarão no município de Americana, SP.

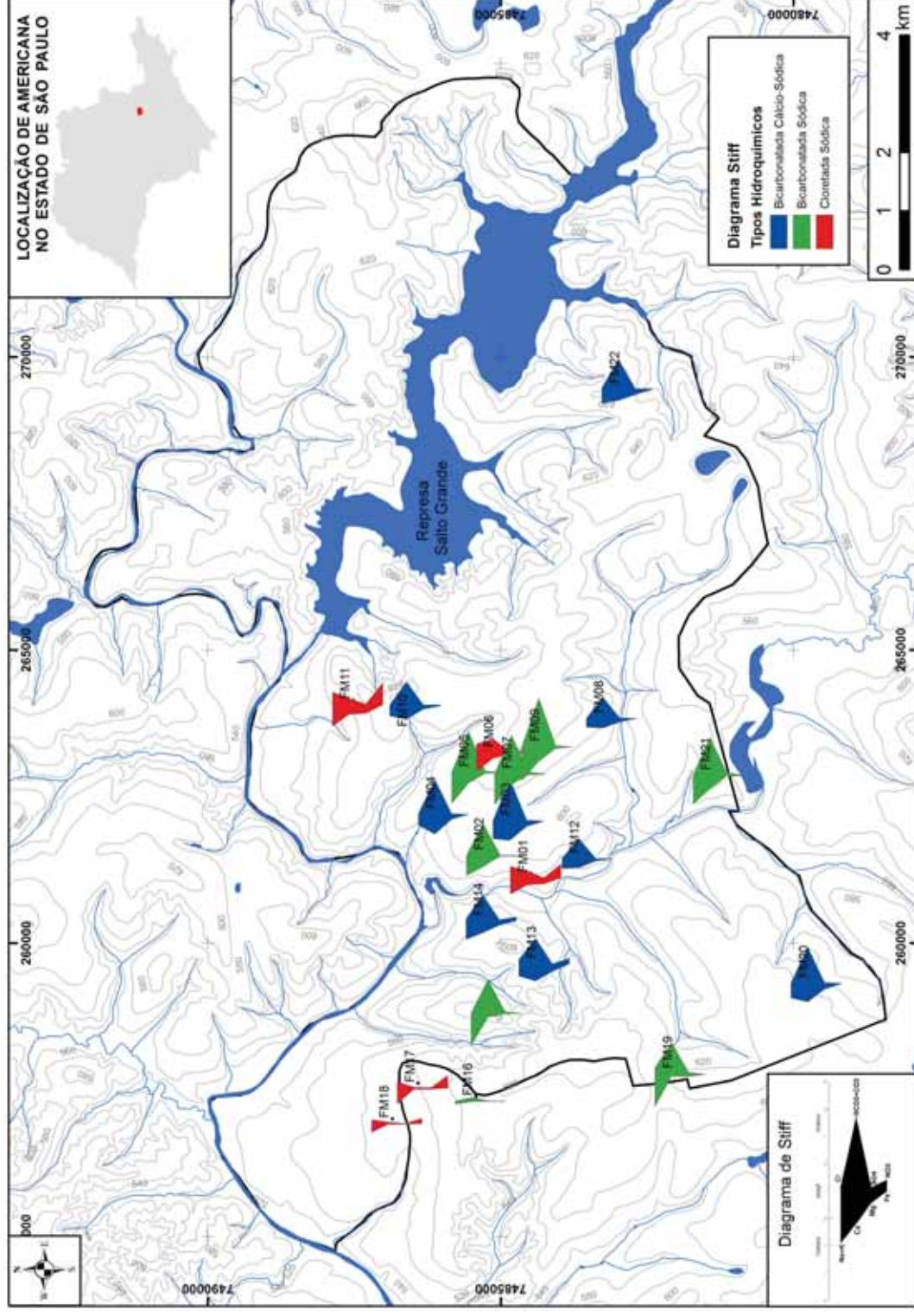


Figura 15. Distribuição dos tipos hidroquímicos do SAT na área de estudo.

Para as amostras classificadas como cloretadas sódicas (grupo 3) observa-se uma boa correlação ($R^2 = 0,7183$) entre as concentrações de Nitrato (NO_3) e Cloreto (Figura 16). Normalmente, concentrações elevadas de nitrato associadas às de cloreto em águas subterrâneas são indicativas de contaminação dos aquíferos pela ação antrópica. Classificam-se nesse grupo as amostras FM-01, FM-06, FM-11, FM-17 e FM-18. O teor médio de nitrato encontrado foi de 34,71 mg/L, apresentando valores que oscilam entre 6,98 e 67,9 mg/L. Essas altas concentrações, como no caso da amostra FM-11, está acima do padrão de potabilidade (Portaria 518/04 do Ministério da Saúde).

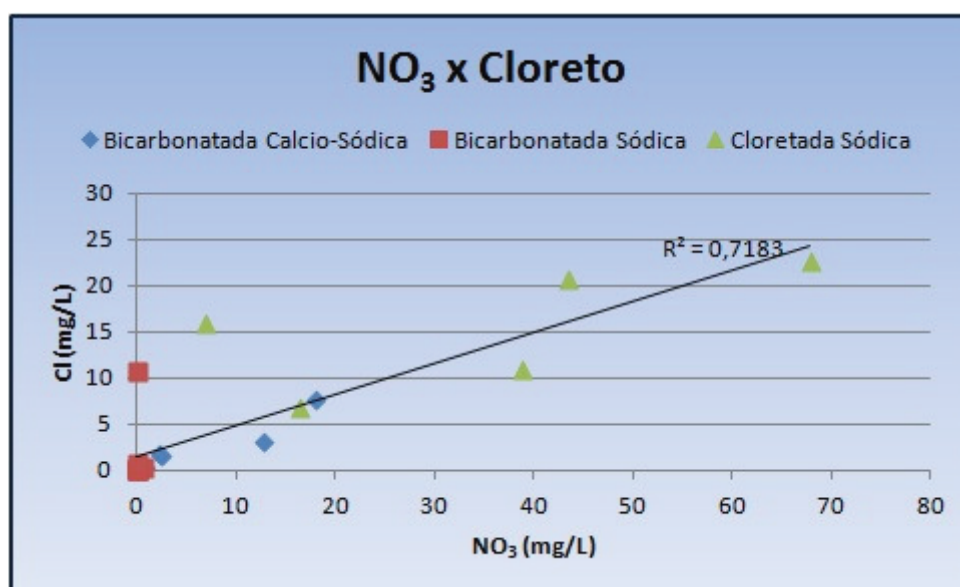


Figura 16. Correlação entre Nitrato (NO_3) e Cloreto (Cl^-) nas águas do SAT, em Americana.

Reforçando a hipótese da contaminação do aquífero, observa-se correlação positiva ($R^2 = 0,9428$) entre as concentrações de nitrato+cloreto e condutividade elétrica para as águas cloretadas sódicas (Figura 17), indicando que para essas águas a salinidade é proveniente principalmente desses ânions, enquanto que para os outros tipos hidroquímicos essa correlação não é observada.

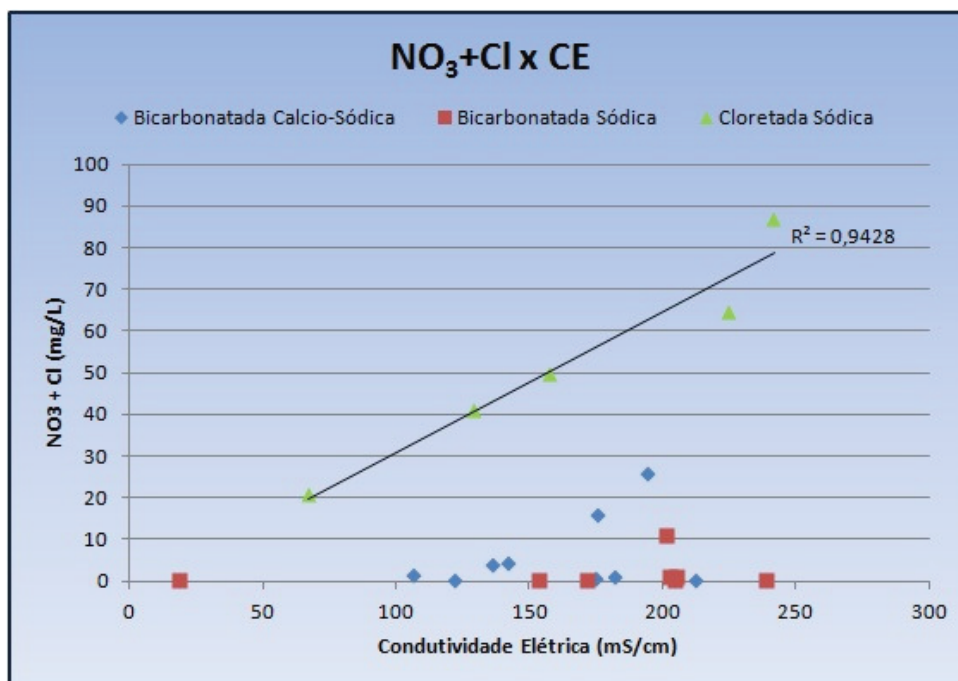


Figura 17. Correlação entre nitrato+cloreto e condutividade elétrica nas águas do SAT, em Americana.

A alcalinidade (HCO_3) apresenta boa correlação ($R^2=0,854$) com a condutividade elétrica para as águas bicarbonatadas, de maneira distinta ao que ocorre com as águas cloretadas sódicas, conforme representado na figura 18.

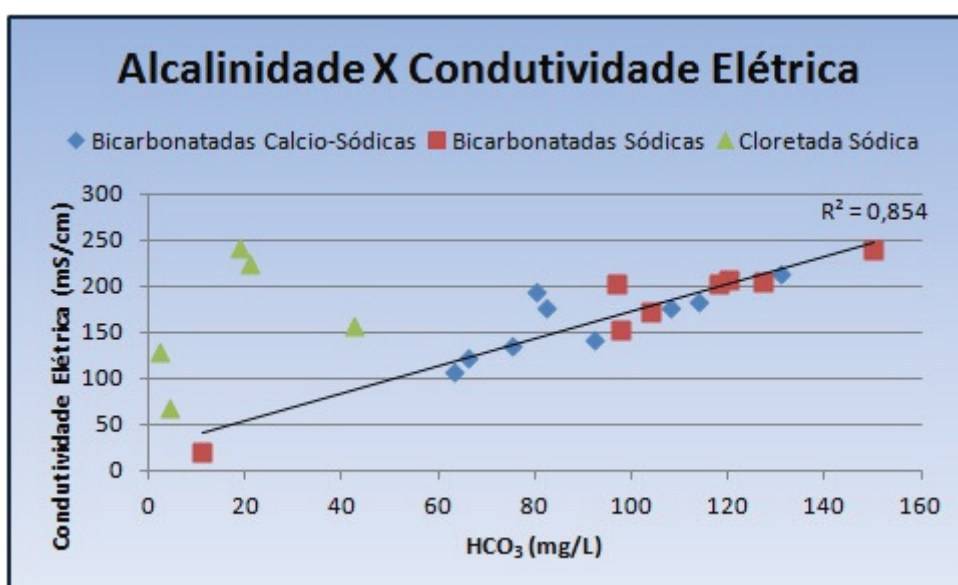


Figura 18. Correlação entre alcalinidade (HCO_3) e condutividade elétrica nas águas do SAT, em Americana.

A análise das razões iônicas Na/Ca mostra que as águas bicarbonatadas cálcio-sódicas apresentam razões próximas a 1, enquanto as águas bicarbonatadas sódicas e cloretadas sódicas apresentam razões iônicas maiores do que 2 (Tabela 1, Figura 19).

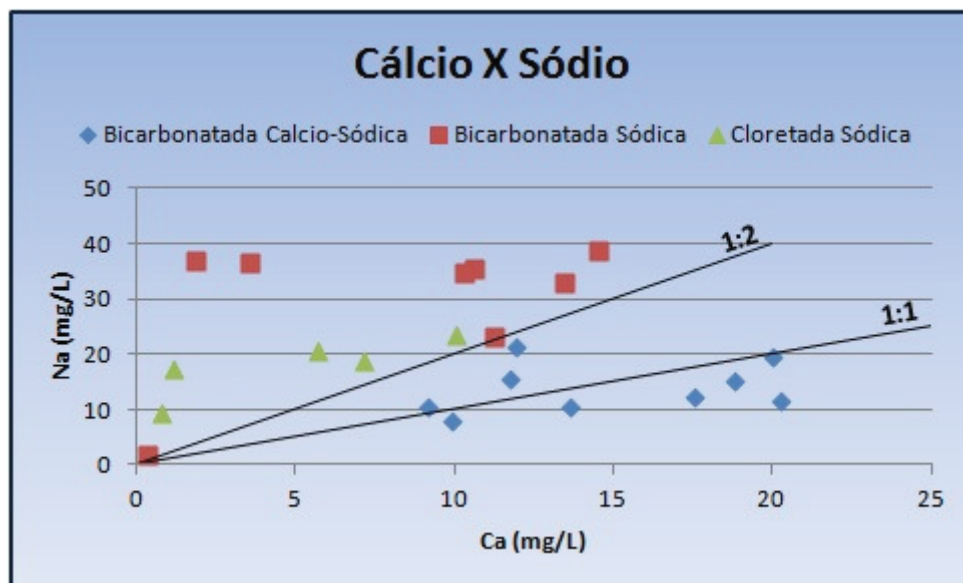
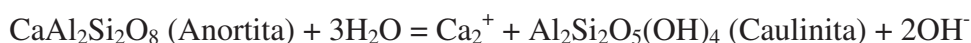


Figura 19. Correlação entre cálcio e sódio em águas do SAT, em Americana.

O alto teor de cálcio e sódio das águas pode estar relacionado com a dissolução de plagioclásios. A percolação de água meteórica nas áreas de recarga propicia reações de hidrólise envolvendo água e ácido carbônico. A hidrólise promove a desintegração do mineral sob influência dos íons H^+ e OH^- da água (Mathess, 1982). Este tipo de reação no SAT é caracterizado pela alteração de minerais como Albita e Anortita, que se transformam em argilominerais como a caulinita, de acordo com as reações abaixo:



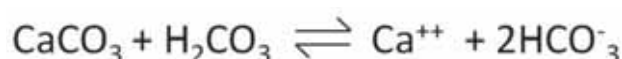
O ataque ácido das águas pluviais a estes silicatos (hidrólise) é irreversível e ocasiona uma dissolução dita incongruente, já que tem como produtos novos minerais e substâncias sólidas amorfas (FREEZE & CHERRY, 1979).

A velocidade de dissolução da albita indica forte dependência do pH, com a menor taxa entre pH 6 e 7. Para soluções ácidas e alcalinas, a taxa de dissolução será maior. No entanto, este tipo de reação é influenciado pela concentração de alumínio,

que em pequenas concentrações inibe a dissolução. Nas soluções alcalinas, o Na^+ influencia na reação quando presente em altas concentrações (CHOU & WOLLAST, 1985).

A origem do ânion bicarbonato e do cátion cálcio nas águas bicarbonatadas cálcio-sódicas e bicarbonatadas sódicas pode estar relacionada, em grande parte, ao processo de dissolução de calcita.

A reação de dissolução da calcita é dada por:



Sendo assim, a dissolução da calcita consome íons H^+ , causando aumento do pH da água, com valores em média de 7,01. Segundo Plummer *et al.* (1978), a taxa de dissolução de calcita decresce com o aumento do pH, passando a diminuir drasticamente quando o pH é maior que 6. Nesta situação, os íons HCO_3^- e Ca^{2+} , liberados durante a dissolução, passam a apresentar concentrações significativas, fazendo com que ocorra o equilíbrio entre a solução alcalina, rica em bicarbonato e cálcio, com a fase carbonática presente na rocha (Figura 20).

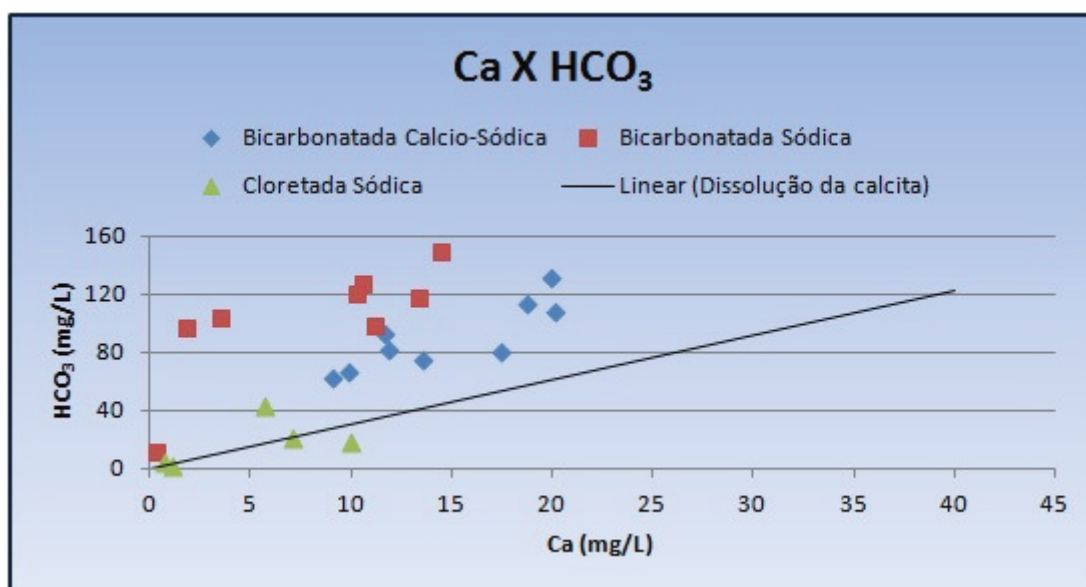


Figura 20. Correlação entre alcalinidade (HCO_3) e cálcio em águas do SAT, em Americana.

5.3. Análise de agrupamento dos dados hidroquímicos

Com base nos resultados hidroquímicos, foi feita uma análise estatística por agrupamento (Figura 21) utilizando o *software* XLSTAT, onde pode-se diferenciar três tipos hidroquímicos similares àqueles encontrados a partir dos diagramas piper e stiff. A distribuição espacial dos grupos pode ser observado na Figura 22.

O primeiro grupo identificado é representado pelas amostras FM-21, FM-07, FM-05, FM-09, FM-20, FM-04 e FM03, que englobam predominantemente as águas com alto valor de condutividade elétrica, na média 203,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo ao grupo das águas bicarbonatadas sódicas.

O segundo grupo é representado pelas amostras FM-14, FM-13, FM-22, FM-02, FM-19, FM-15, FM-12, FM-08, FM-10, FM-06, cujos valores de condutividade elétrica apresentam a média de 156,46 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo ser correlacionadas ao grupo das águas bicarbonatadas calco-sódicas.

O terceiro grupo é representado pelas amostras FM-01, FM-11, FM-16, FM-17 e FM-18, onde os valores de condutividade elétrica são baixos, com exceção das amostras que apresentam contaminação por nitrato e cloreto, que acarretam em altos valores de condutividade. A média da condutividade elétrica para essas amostras é de 136,59 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo correlacioná-las com as águas cloretadas sódicas.

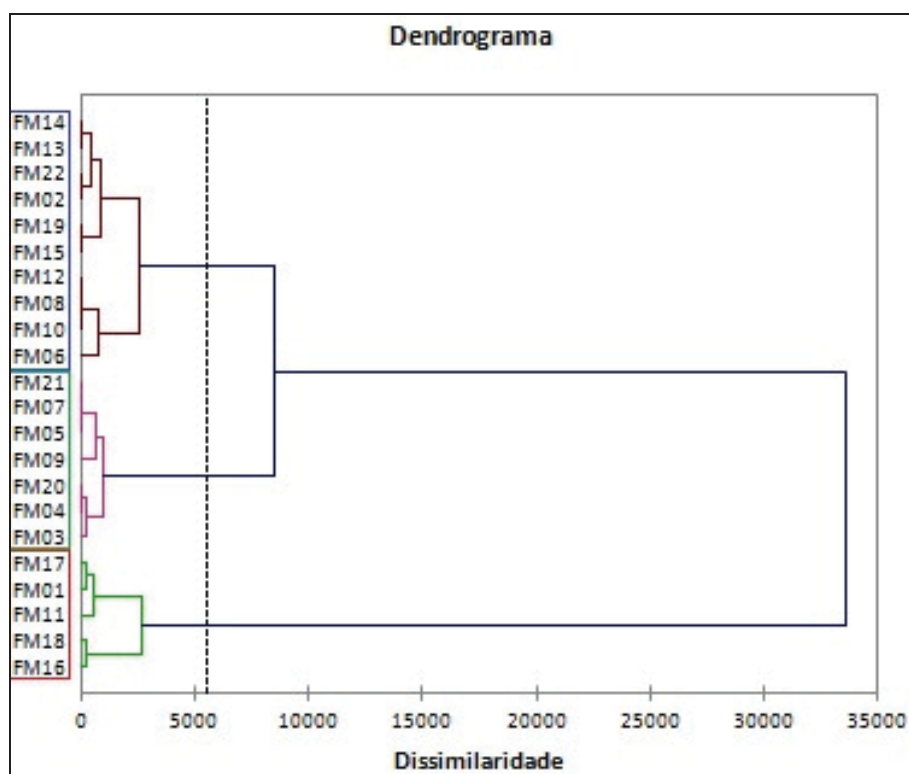


Figura 21. Dendrograma dos resultados das análises químicas das águas do Sistema Aquífero Tubarão no município de Americana/SP.

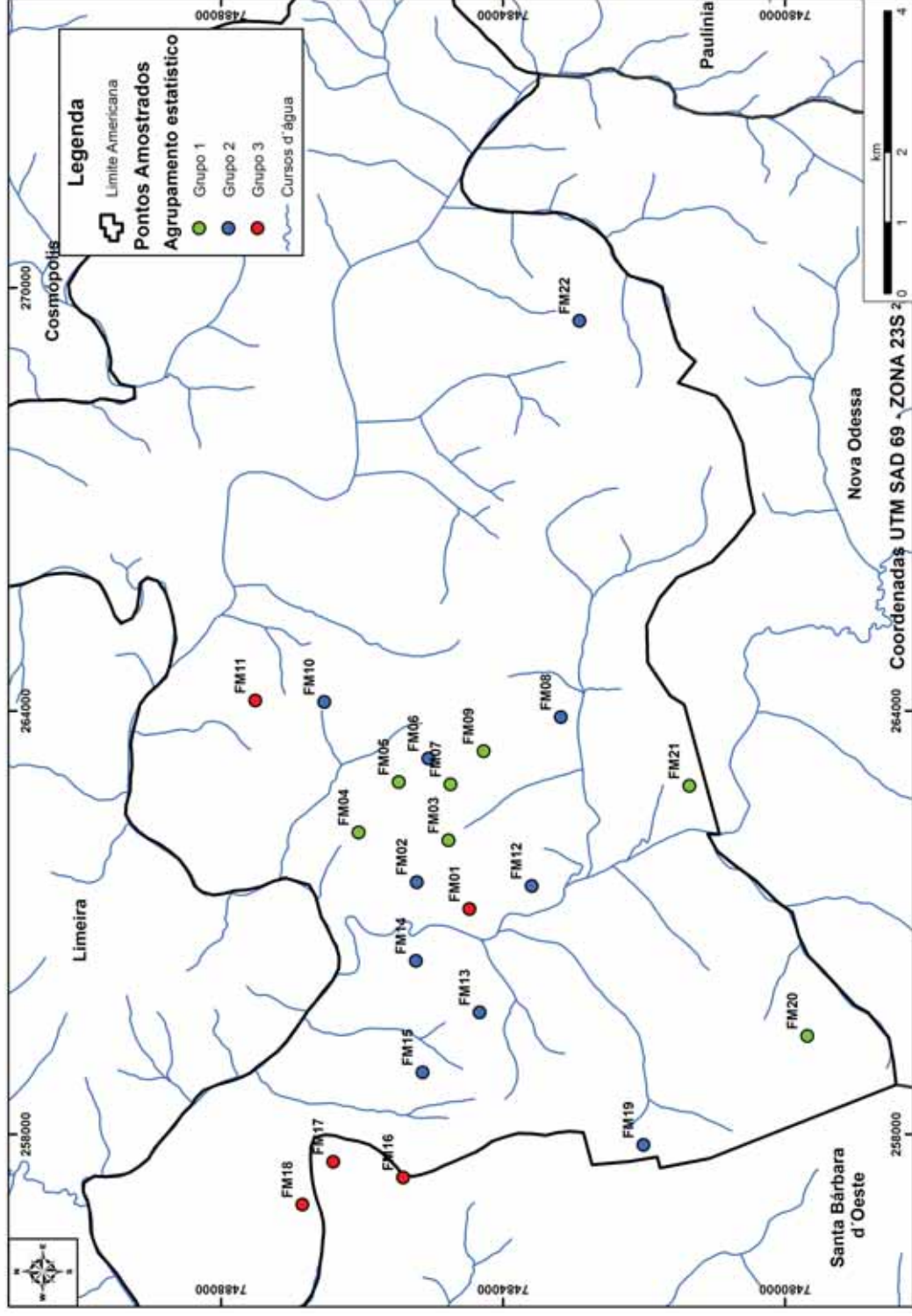


Figura 22. Distribuição espacial dos grupos hidroquímicos classificados a partir de análise por agrupamento.

Comparando as interpretações dos tipos hidroquímicos, é possível notar uma similaridade nos grupos gerados a partir dos diagramas *piper* e *stiff* com os tipos obtidos na análise por agrupamento (Figura 23).

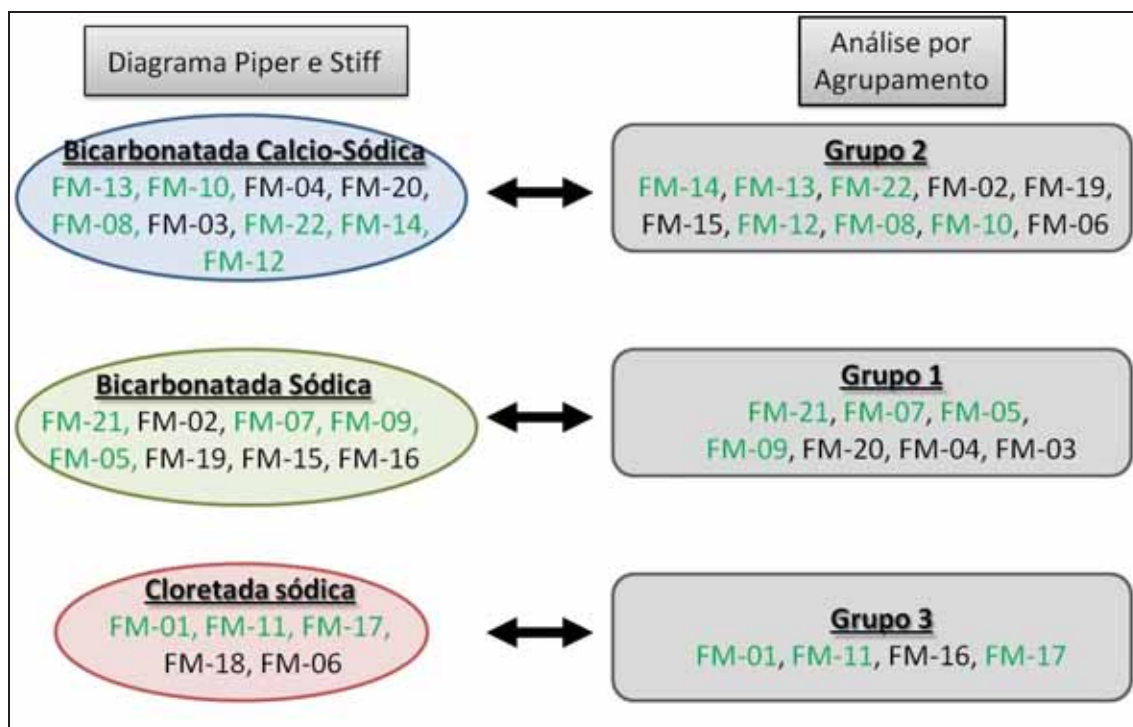


Figura 23. Comparação dos grupos hidroquímicos obtidos.

6. CONCLUSÕES

Com base nas informações dos perfis dos poços cadastrados, foi possível obter uma visão geral da geologia de subsuperfície da área de estudo. O Subgrupo Itararé é localmente representado por arenitos, siltitos e argilitos, havendo o predomínio de sedimentos grossos na área central, com tendência de aumento dos sedimentos finos pra norte e sul, seguindo os padrões de condutividade elétrica da água que apresentam valores elevados no centro, diminuindo em direção ao norte e a sul (Figura 12).

As águas subterrâneas do SAT na área de estudo podem ser classificadas em três grupos: Bicarbonatadas Cálcio-Sódicas (1), Bicarbonatadas Sódicas (2) e Cloretadas Sódicas (3).

As águas bicarbonatadas cálcio-sódicas abrangem 41% das amostras e apresentam pH ácido a alcalino, oscilando de 6,83 a 7,27 com valor médio de 7,01. Podem ser consideradas fracamente salinas, com valores de condutividade elétrica em torno de 161 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esse tipo hidroquímico pode ter o enriquecimento em cálcio relacionado, em grande parte, à dissolução de calcita e de feldspatos cálcicos e, eventualmente, por troca iônica.

As amostras classificadas como bicarbonatadas sódicas representam 36% do total amostrado. A salinidade apresenta valor médio de 174,99 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com alto desvio padrão, causado por uma amostra anômala que apresentou condutividade elétrica de 19,18 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de pH variam de 6,74 a 7,99, com média de 7,52.

Para o grupo de águas classificadas como cloretadas sódicas, que representam 23% do total amostrado, a condutividade média é de 164,32 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e os valores de pH oscilam de 5,08 a 7,13. Essas amostras apresentaram elevadas concentrações de nitrato associado a cloreto, sendo isso geralmente indicativo de contaminação do aquífero por ação antrópica. A susceptibilidade à contaminação por nitrato é elevada em aquíferos rasos e/ou poços tubulares mal construídos, principalmente em regiões com grande densidade demográfica, como é o caso do município de Americana.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. de 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Boletim Instituto Geográfico e Geológico, 41: 169-263.

BIAZZI, E. 2007 - Estudo temporal do nível potenciométrico no Aquífero Tubarão, no município de Americana – SP, Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Geologia, UNESP-RIO CLARO/SP.

CAETANO-CHANG, M. R. 1984. Análise ambiental e estratigráfica do Subgrupo Itararé (PC) no sudoeste do Estado de São Paulo. Inst. Geociências, USP. São Paulo (Tese Doutorado).

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEREOLÓGICAS 2010 Boletim Agrometereológico do Estado de São Paulo. Disponível em <<http://www.ciiagro.sp.gov.br>>. Acesso em jul. 2011.

COELHO, M.P. 1993 Análise do processo de assoreamento do reservatório de Americana – SP. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

COTTAS, L.R., FIORI, A.P., LANDIM, P.M.B. 1981 Divisão faciológica do Subgrupo Itararé e da Formação Aquidauana no nordeste do Estado de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Atas...São Paulo:SBG, 2v, p. 103-115.

DAEE-UNESP, 1979. Mapa Geológico: divisão faciológica do Super-Grupo Tubarão, escala 1:50.000.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) 1981a. Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP. São Paulo, SP. DAEE, 2v.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) 1981 - Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa Nº 5 - Campinas, São Paulo.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) 1984. Caracterização dos recursos hídricos no Estado de São Paulo. São Paulo, SP. DAEE, 175p.

DIOGO, A.; BERTACHINI, A.C.; CAMPOS, H.C.N.S.; ROSA, R.B.G.S. 1981. Estudo preliminar das características hidráulicas e hidroquímicas do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: 3º SIMP. REG. GEOL., Curitiba, PR. Atas...SBG, Curitiba, 1:359-368.

FERNANDES, A.J., FERREIRA, C. 1994. Faciologia do Subgrupo Itararé e dos depósitos cenozóicos entre Jaguariúna e Americana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, CAMBORIÚ- SC. Anais ... Camboriú:SBG, v1.

FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. 1988. Estratigrafia, Ambiente Depositional e Análise de Reservatório do Grupo Itararé (Permo-Carbonífero), Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da PETROBRAS. Vol. 2, pg. 147-191.

FÚLFARO, V.J., BJORNBERG, A.J.S., 1993. Geologia: Solos do Interior de São Paulo. São Paulo: USP/EESC/ARMS, 1993 p 1-42.

INSTITUTO BRASILEIRO GEOGRÁFICO DE ESTATÍSTICA – IBGE. Tabela de População Residente, por sexo e situação de domicílio, população residente de 10 anos ou mais de idade, total, alfabetizada e taxa de alfabetização, segundo os municípios. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em jul. 2011.

INSTITUTO GEOLÓGICO/SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE (IG/SMA) 1995. Subsídios para o planejamento regional e urbano do meio-físico na porção média da Bacia do Rio Piracicaba, SP. v. 2 e 3.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1981. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. IPT/São Paulo. v.1, p. 28-72.

KÖPPEN, 1964. – Atlas Climatológico. Tentativa de classificação climática, segundo o método de Köppen, SUDAM.

LANDIM, P. M. B. & FULFARO, V. J. 1972. Trend-Surface Analysis of Carboniferous and Permian thickness data from Paraná Basin. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 44 (Supl.) p. 187- 196.

LANDIM, P. M. B. 1973. Contribuição ao estudo dos mistitos do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: ESC. ENG. SÃO CARLOS, Geologia. São Carlos, USP, p. 1-98 (Boletim Geologia n° 17).

LANDIM, P. M. B. e SOARES, P. C. 1979. Mapeamento faciológico do Subgrupo Tubarão. Convênio DAEE-UNESP Rel. final.

MASSOLI, M.; AZEVEDO, A. A. B.; ODA, G. H.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L. K.; PETRI, S. 1986. Contribuição à geologia do município de Cerquílho, SP. *Revista do Instituto Geológico*. São Paulo, 7:31-34.

MILANI, E.J. 2004. Comentários sobre a evolução e tectônica da Bacia do Paraná. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca. CD-Rom.

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

ROCHA-CAMPOS, A. C. 1967. The Tubarão Group in the Brazilian portion of the Paraná Basin. In: Bigarella, J. J.; Becker, R. D.; Pinto, J. D. ed. *Problems in Brazilian Gondwana Geology - Brazilian contribution to the I International Symposium on the Gondwana Stratigraphy and Paleontology*. Curitiba, Brasil, p. 119-166.

SEIGNEMARTIN, C.L. 1979. Geologia de áreas urbanas: o exemplo de Ribeirão Preto - SP. Tese de Doutorado apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2 v.

SOARES, P. C. 1972. O limite glacial/pós-glacial do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 44 (Supl.): p.333-342.

STEVAUX, J. C.; SOUZA E. E., F.O.; TEIXEIRA, J. A.; LANDIM, P. M. B. 1987. Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (P-C) na bacia hidrográfica do baixo Rio Capivari (SP): um modelo para prospecção de água subterrânea. In: SIMP. REG. GEOL., 6. Rio Claro, 1987. Atas... Rio Claro, SBG/NSP. V.1, p. 355-374.

TALTASSE, P. R. 1968. Os fácies hidroquímicos no Estado de São Paulo. In: 22º Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte, MG. Anais ...SBG, Belo Horizonte. 1:263-266.

VIDAL, A. C. 2002. Estudo Hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo. Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 122 p.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; SANTOS NETO, E. V.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J.(Ed.) Interior cratonic basins. Tulsa: American association of petroleum geologists. p.681-708. (AAPG. Memoir,51).