

Trabalho de Conclusão de Curso
Curso de Graduação em Geologia

ANÁLISE HIDROLÓGICA E MODELAGEM GEOLÓGICA EM SUB-BACIA
HIDROGRÁFICA NA BACIA DE TAUBATÉ (SP)

Isabella Gumiero Lee

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-orientador: Prof. MSc. Roger Dias Gonçalves

Rio Claro (SP)

2018

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

ISABELLA GUMIERO LEE

ANÁLISE HIDROLÓGICA E MODELAGEM GEOLÓGICA EM
SUB-BACIA HIDROGRÁFICA NA BACIA DE TAUBATÉ (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Geóloga.

Rio Claro - SP

2018

L478a	Lee, Isabella Gumiero ANÁLISE HIDROLÓGICA E MODELAGEM GEOLÓGICA EM SUB-BACIA HIDROGRÁFICA NA BACIA DE TAUBATÉ (SP) / Isabella Gumiero Lee. -- Rio Claro, 2018 71 f. : il., tabs., mapas + 1 CD-ROM Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Chang Hung Kiang Coorientador: Roger Dias Gonçalves 1. Modelagem geológica. 2. Fluxo de base. 3. Separação de escoamentos. 4. Método de filtros digitais. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ISABELLA GUMIERO LEE

ANÁLISE HIDROLÓGICA E MODELAGEM GEOLÓGICA EM
SUB-BACIA HIDROGRÁFICA NA BACIA DE TAUBATÉ (SP)

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Prof. Dr. Elias Hideo Teramoto

Geól. MSc. Bruno Zanon Engelbrecht

Rio Claro, 29 de novembro de 2018.

Assinatura da aluna

Assinatura do orientador

Aos meus pais, Tânia e Sang

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser a base da minha vida e por me amparar nas minhas dificuldades para que eu conseguisse ter sucesso em minha caminhada.

Agradeço aos meus pais, Tânia e Sang, por todo amor e carinho e pelo esforço incessante para me oferecer as melhores oportunidades da vida, essas, que culminaram na minha formação nesta universidade. Essa vitória é nossa! Obrigada mãe, por sempre estar presente para que eu pudesse me sentir amada nesses longos anos longe de casa, não teria conseguido nem metade de tudo isso se você não estivesse comigo, obrigada por todo esse amor, que é maior que eu. Como eu já disse outras vezes, somos o encontro de almas mais perfeito que poderia existir! Obrigada pai, por esse amor que transborda e por ter confiado em mim e convencido a todos de que esta universidade era a melhor opção para minha vida! Agradeço ao meu irmão, Felipe, por sempre saber fazer eu me sentir extraordinária! Igualmente agradeço aos meus avós, por toda ajuda que me deram durante a minha vida e a toda a minha família que me acompanhou ao longo desses anos e me apoiou das mais variadas formas. Agradeço ao Vitor, meu amor, por toda ajuda que me deu durante a graduação, principalmente por ter tornado a vida incrivelmente mais leve quando eu me sentia sufocada durante as madrugadas inteiras estudando ou fazendo trabalhos. Não consigo imaginar como teria sido minha vida sem você nesses últimos anos!

Um agradecimento especial ao professor Chang, por ter confiado em mim e me permitido estagiar no LEBAC nesses quatro anos de muito aprendizado, obrigada pela oportunidade! Agradeço a todos os parceiros e amigos do LEBAC, por toda ajuda que recebi e todos os ensinamentos que vou levar para sempre em minha memória! Agradeço, sobretudo, ao Roger pela incrível paciência que teve comigo durante todos esses anos juntos, por todas as horas dedicadas a me ensinar inúmeras coisas e por ser um excelente co-orientador! Sem você, nada disso seria possível! Agradeço a Geologia 014 por ser uma sala tão maravilhosa que me fez feliz demais nesses cinco anos junto com vocês, obrigada por todas as aulas, campos, aventuras e festas. Em especial, agradeço aos integrantes do Bonde que me acolheram com tanto amor e se tornaram meus grandes amigos que quero levar para toda a vida. Agradeço aos amigos que fiz na Comissão de Formatura, principalmente aos três que se tornaram minha segunda família aqui em Rio Claro, com quem pude dividir minhas aflições e multiplicar alegrias nesse último ano tão conturbado.

E por último, mas certamente não menos importante, agradeço a minha filhinha cachorrinha Susi, por me ensinar o amor mais puro e lindo que eu poderia sentir nessa vida!

“Sonho que se sonha só é só mais um sonho que se sonha só. Mas sonho que se sonha junto é realidade”

Raul Seixas

RESUMO

O estudo da variação do escoamento subterrâneo juntamente com a análise de dados pluviométricos ao longo de uma série histórica, em conjunto com a modelagem geológica e observação de dados de vazão específica permite inferir impactos causados pelas variações climáticas e exploração de água subterrânea em um aquífero, assim como auxilia projetos de locação de novos poços. O presente trabalho analisou a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins, uma sub-bacia hidrográfica da Bacia de Taubaté, próxima a cidade de São José dos Campos, visto sua importância por se encontrar em uma região vizinha a cidades de médio a grande porte que necessitam de água em abundância. O Ribeirão dos Putins é um afluente da margem direita do principal rio do Vale do Paraíba, o Rio Paraíba do Sul. Foram analisadas séries históricas de vazões, calculadas a partir de equações de curva-chave, de 1960 a 1978 e de pluviometria no período de 1942 a 2003. O método utilizado para a separação dos escoamentos superficiais e subterrâneos foi o método dos filtros digitais, mais precisamente os métodos de Intervalo Fixo, Intervalo Móvel e Mínimos Locais. O modelo geológico foi gerado a partir de dados de furos de sondagem obtidos nos *sites* do SIAGAS e da SABESP, compondo dados litológicos e hidrológicos. O modelo foi confeccionado no *software* Earth Volumetric Studio 2017.3. O trabalho permitiu concluir que o fluxo de base é o principal responsável pela manutenção da vazão do ribeirão, sendo responsável por 56,53% a 74,77% do escoamento total. O método dos filtros digitais se mostrou rápido, eficiente e preciso no que tange a separação dos escoamentos, e, para a bacia estudada, o método dos Mínimos Locais se mostrou o método mais apropriado, uma vez que apresentou pouca variação e oscilação em virtude do aumento das vazões totais e da precipitação. O fluxo de base da bacia representa 21% a 27% da precipitação, valores que ajudam a estimar a reserva explorável do aquífero. A modelagem geológica se mostrou uma ferramenta útil que auxilia a compreensão do meio físico e, consequentemente, no projeto de poços para exploração de águas subterrâneas, e permitiu inferir que a vazão específica dos poços já perfurados está relacionada aos tipos litológicos presentes. A bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins pode ser dividida em duas regiões contrastantes: uma com maior volume de arenito e valores mais altos de vazão específica, e outra com maior volume de argilito, com menores valores de vazão específica. O fluxo de base se apresenta com tendência crescente nas décadas de 1960 e 1970, e aparentemente não está atrelado às variações pluviométricas observadas. Esse aumento na contribuição do fluxo de base pode ser explicado pelas incertezas das curvas chaves, causadas pela aproximação dos parâmetros de ajuste das mesmas. Com isso, o aumento do fluxo de base provavelmente não continuou em crescimento até os dias atuais.

Palavras-chave: Modelagem Geológica. Fluxo de base. Separação de escoamentos. Método de filtros digitais.

ABSTRACT

The study of baseflow variation together with the analysis of pluviometric data in a times series, along with geological modeling e observation of specific flow rate data allows inferring impacts caused by climatic variations and exploitation of groundwater in an aquifer, as well as helps projects for locating new wells. The present work has analised the hydrographic basin of Ribeirão dos Putins, a hydrographic sub-basin of the Taubaté Basin, near São José dos Campos city, seen its importance due to been in a region arround medium to large cities that need water in abundance. The Putins riverside is a affluent from the left margin of the main river of Vale do Paraíba, the Paraíba do Sul River. Time series of flows from 1960 to 1978 were analyzed as well as pluviometric time series from 1942 to 2003. The method used to calculate the separation of baseflow and superficial flow was the digital filter method, more precisely the Fixed Range, Sliding Interval and Local Minimum methods. The geological model was generated from drilling holes data, obtained from SIAGAS and SABESP, being litological and hydrological data, on Earth Volumetric Studio 2017.3 software. The study allowed to conclude that the base flow is the main responsible for the maintenance of the river's flow, being responsible for between 56,53% and 74,77% of the total flow. The digital filter method proved to be fast, efficient and accurate in terms of the separation of flows, and, for the studied basin, the Local Minimum method was the most appropriated, once it has shown little variation due to the increase of total flow and precipitation. The baseflow of the basin represents between 21% and 27% of precipitation, values that help the estimation of the exploitable reservoir of the aquifer. The geological modeling proved to be a useful tool that aids the understanding of the physical environment and consequently helps the project of underground water exploitation wells, and allowed to infer that the specific flow rate of already drilled wells is related to the litological types. The hydrographic basin of Ribeirão dos Putins can be divided in two contrasting regions: one with higher volume of sandstones and higher values of specific flow, and the other with higher volume of claystones, with lower values of specific flow. The baseflow presents with increasing tendency in the decades of 1960 and 1970, and apparently is not tied to the observed pluviometric variations. The increasing contribution from the baseflow can be explained by the uncertainties of the rating curves, caused by the approximation of the adjustment parameters of the same ones. Thus, the increasing baseflow rate probably hasn't continued in growth until nowadays.

Keywords: Geological modeling. Baseflow. Hydrographs separation. Digital filter methods.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	11
2. CONCEITOS GERAIS	12
2.1. Conceitos básicos em hidrogeologia	12
2.1.1. <i>Aquíferos</i>	12
2.1.2. <i>Vazão e vazão específica</i>	13
2.1.3. <i>Precipitação e recarga</i>	14
2.1.4. <i>Métodos de estimativa de recarga</i>	15
2.2. Modelagem geológica	16
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	17
3.1. Contexto geológico regional	19
3.1.1. <i>Evolução da área</i>	23
3.2. Geomorfologia	25
3.3. Análises Climáticas	27
3.4. Hidrografia e Hidrogeologia	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Revisão bibliográfica	31
4.2. Controle de qualidade das informações e confecção de banco de dados	31
4.3. Cálculo da vazão	33
4.4. Separação do escoamento superficial e subterrâneo	35
4.4.1. <i>Método de filtros digitais</i>	35
4.5. Quantificação dos escoamentos	39
4.6. Confecção do modelo geológico tridimensional	40
4.7. Confecção do mapa de vazão específica	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. Caracterização geológica local	42
5.2. Modelagem geológica	45
5.3. Análise hidrológica	48
5.3.2. <i>Análise fluviométrica</i>	49
5.3.2.1. <i>Curva chave</i>	49
5.3.2.2. <i>Hidrograma</i>	50
5.3.3. <i>Separação do fluxo de base</i>	51

5.4. Análise da vazão específica	58
6. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	70

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são de extrema importância para a sociedade, pois representam 22,4% de toda a água doce do planeta, e, descontando a porcentagem de água aprisionada em calotas polares, perfazem 98% de toda a água doce disponível (ROMERA e SILVA, 2003). Portanto, uma gestão de recursos hídricos consciente é essencial para o desenvolvimento sustentável de uma localidade, e para que isso ocorra se faz necessário o entendimento do funcionamento do aquífero, que possibilita a esquematização de cenários de exploração e devido planejamento econômico.

Compreender a contribuição das águas subterrâneas para os cursos d'água é essencial na gestão de águas. A análise de hidrogramas de vazões, especificamente para separar o escoamento de base do escoamento superficial, é um método reconhecido e sólido na compreensão da dinâmica das águas subterrâneas.

Águas superficiais e águas subterrâneas têm sido tratadas de maneira isolada, historicamente. Recentemente, nota-se um maior reconhecimento por parte dos gestores de que a água subterrânea dos aquíferos é responsável por uma parcela da vazão dos rios.

Quantificar e analisar as entradas de água subterrânea em canais de drenagem é fundamental quando se refere a questões como confiabilidade de abastecimento e distribuição de água e dos impactos de contaminação (BRODIE e HOSTETLER, 2005).

O trabalho baseia-se na caracterização de águas subterrâneas por meio da análise do meio físico através do modelo geológico e da análise hidrológica para a bacia estudada. A área de estudo está situada na região do Vale do Paraíba que, por ser um importante eixo econômico entre São Paulo e Rio de Janeiro, possui grande demanda por recursos hídricos, visto abranger cidades de médio a grande porte, tais como Jacareí, Taubaté, Aparecida e São José dos Campos.

A região está inserida no contexto da Bacia de Taubaté, a qual apresenta-se como uma bacia do tipo rift, de sedimentação caracteristicamente continental e sintectônica, associada a ambientes fluviais e lacustres (APPI *et al.*, 1986; CHANG *et al.*, 1989; RICCOMINI, 1989).

Segundo estudos da CETESB (2016), metade do município de São José dos Campos é abastecido com as águas do Sistema Aquífero Taubaté (SATA). O Sistema Aquífero Taubaté representa um aquífero sedimentar com porosidade granular e sedimentação representada, da base para o topo, pelo Grupo Taubaté, Formação Pindamonhangaba e sedimentos coluviais e aluviais quaternários (RICCOMINI, 1989). O SATA possui alta variedade litológica resultante

dos ambientes deposicionais (fluvial e lacustre). Além disso, configura-se como um aquífero do tipo livre e localmente semi-confinado (DAEE, 1972).

1.1. Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal a confecção de um modelo geológico e a análise hidrológica da bacia, a fim de proporcionar uma compreensão integrada da dinâmica de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Taubaté, no Estado de São Paulo, mais precisamente na região do município de São José dos Campos.

Conforme proposto acima, o trabalho visa assistir os estudos de recursos hídricos pertencentes a Bacia de Taubaté, o qual permite uma análise da sustentabilidade destes recursos e ainda, auxilia na devida gestão integrada dos mesmos.

2. CONCEITOS GERAIS

2.1. Conceitos básicos em hidrogeologia

2.1.1. Aquíferos

O aquífero pode ser entendido como uma unidade geológica capaz de armazenar e transmitir água em condições naturais, propiciando a movimentação de significativa quantidade de água (FETTER, 2000). Existem diversos tipos de aquíferos (Figura 2.1), que são classificados com relação a capacidade de transmissão de água das camadas que o limitam e com relação com a pressão atingida pelo sistema (MANOEL FILHO, 2000)

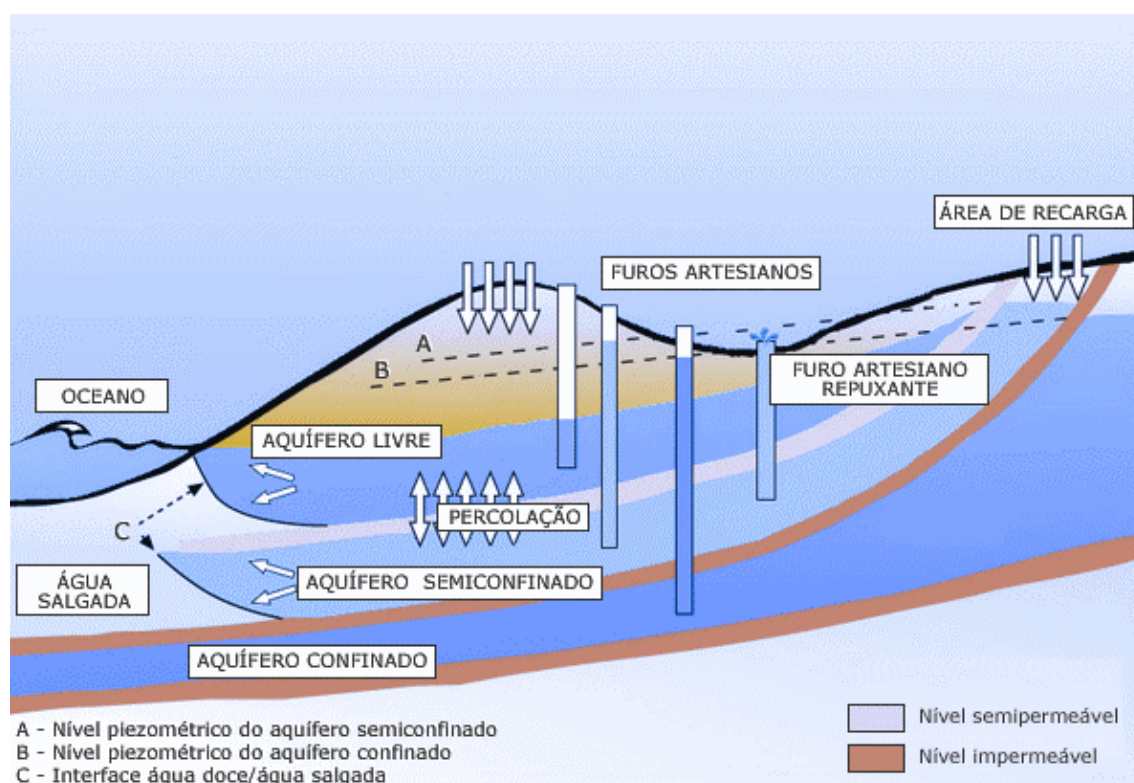


Figura 2.1. Tipos de aquíferos e os componentes dos sistemas. Fonte: SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, *website*.

O aquífero livre (Figura 2.1), também conhecido como freático ou aquífero não confinante, é o aquífero em que seu limite superior é a superfície de saturação em contato direto com a atmosférica (FETTER, 2000). O aquífero confinado (Figura 2.1), por sua vez, ocorre quando tanto seu limite superior quanto seu limite inferior estão restritos a camadas impermeáveis (BEAR & VERRUIJT, 1987). Fetter (2000) diz que o nível que a água atinge

devido a pressão exercida no aquífero é representado pela superfície potenciométrica. O aquífero confinado é classificado como artesiano quando a superfície potenciométrica é mais elevada do que a superfície rochosa (BEAR & VERRUIJT, 1987).

O aquífero semiconfinado (Figura 2.1) ocorre quando um aquífero confinado ou livre perde ou ganha água de outras camadas através do processo de drenança (*leakage*) (BEAR & VERRUIJT, 1987). Para os autores, esse tipo de aquífero é constituído de camadas confinantes de material semipermeável.

Outro tipo de aquífero é o aquífero suspenso, que ocorre devido a existência de uma camada impermeável ou semipermeável de um aquífero livre, na região entre a superfície freática e a superfície terrestre (BEAR & VERRUIJT, 1987).

2.1.2. Vazão e vazão específica

No planejamento e gerenciamento do uso dos recursos hídricos, o conhecimento das vazões é necessário para se fazer um balanço de disponibilidades e demandas ao longo do tempo.

O conceito de vazão pode ser definido como o volume de água escoado por unidade de tempo (CARVALHO e SILVA, 2006). É usualmente expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s) ou em litros por segundo (L/s). Ela é a principal grandeza para a caracterização de um escoamento (CARVALHO e SILVA, 2006).

Os valores de vazão são obtidos nas estações fluviométricas e são normalmente dados em vazão média diária, que é simplesmente a média aritmética das vazões ocorridas durante o dia. São registradas de várias formas, porém a mais comum é por meio do uso de linígrafos. Os dados são frequentemente encontrados como a média das vazões das 7 e das 17 horas de cada dia.

Outro parâmetro importante para a avaliação de recursos hídricos é a vazão específica. A vazão específica (Q_{esp}) é a razão entre vazão de bombeamento (Q) e o rebaixamento (s) produzido no poço em função do bombeamento, para um determinado tempo (CPRM, 1998).

A vazão específica, portanto, permite quantificar qual foi o rebaixamento do nível d'água num poço quando aplicado uma determinada vazão de bombeamento e,

consequentemente, estimar o valor máximo da vazão que pode ser bombeada em um determinado poço para que o bombeamento não comprometa o fluxo de base do aquífero.

2.1.3. Precipitação e recarga

A recarga pode ser definida como o fluxo descendente de água que, ao infiltrar, alcança o sistema aquífero, resultando em um volume adicional ao reservatório subterrâneo (LERNER *et al.*, 1990). Ela pode se originar de diversas fontes, como, por exemplo, precipitação, contribuição de rios, lagos e canais, irrigação e recarga artificial (EILERS, 2004). De maneira geral, a precipitação é o principal responsável pela recarga. Entretanto, não existe uma ligação direta e simples entre esses dois fenômenos, ainda mais no caso de aquíferos livres, devido à complexidade do processo de recarga. Esse processo envolve o fluxo na zona não-saturada, que está sujeita à evapotranspiração e aos fluxos de subsuperfície, e, além disso, a taxa de infiltração depende de parâmetros que possuem grande variância no espaço e tempo.

Uma das primeiras tentativas de relacionar a precipitação com o nível da superfície freática foi realizada por Rennolls *et al.* (1980) através de um método auto-regressivo linear. Os autores afirmaram que o método ignora fatores relevantes, como por exemplo a evapotranspiração, a interceptação e a precipitação efetiva, e concluíram que a aplicação de parâmetros lineares não é condizente com a realidade. Posteriormente, Viswanathan (1983) propôs um modelo que relaciona a precipitação e o nível potenciométrico. Ele relaciona esses dois fenômenos a três parâmetros: um relacionado com o fator de drenagem, outro relacionado à “distúrbios externos” e outro relacionado à infiltração devido à precipitação. Viswanathan constata que os dois últimos parâmetros são muito variáveis no tempo. Em contrapartida, o primeiro parâmetro permaneceu constante. Ele conclui também que durante períodos secos, são os dois primeiros parâmetros que determinam a flutuação do nível do aquífero.

Contin Neto (1987) verificou uma forte correlação entre a precipitação e a recarga na bacia do Ribeirão da Onça. O estudo foi feito durante um período chuvoso de 100 dias, onde o intervalo máximo sem chuvas foi de 3 dias e a correlação obtida entre o nível do aquífero e a precipitação foi de 0,99. Porém, é muito provável que o alto índice de correlação se deve ao aumento da umidade na região não-saturada, que favorece a conexão entre água infiltrada e a superfície do aquífero.

Há algum tempo pesquisadores buscam entender a associação entre precipitação e recarga, mas sua relação é complexa devido a interferência de diversos fatores que são de grande variação no tempo e espaço.

2.1.4. Métodos de estimativa de recarga

São diversos os métodos utilizados para a estimativa de recarga. Autores como Lerner *et al.* (1990), Kinzelbach (2002), Scanlon *et al.* (2002), e Healy & Cook (2002) apresentam trabalhos sobre estes métodos. Apesar de os métodos fornecerem valiosas informações sobre a recarga, eles não são sempre diretamente aplicáveis.

Existem situações em que se faz necessário a estimativa da recarga de uma maneira eficiente, considerando vários parâmetros climáticos e hidrogeológicos e também considerando os dados e tecnologias disponíveis para a realização do estudo (BARRETO *et al.*, 2010).

De uma maneira simplificada, os métodos podem ser classificados em: (i) métodos empíricos, que relacionam a precipitação com a recarga; (ii) métodos baseados em medidas diretas de determinados processos físicos, e; (iii) modelos numéricos baseados na solução da Lei de Darcy (EILERS, 2004).

O melhor método a ser utilizado depende principalmente dos objetivos a serem alcançados no estudo, que estão intrinsicamente relacionados com o nível de precisão pretendido para os resultados, com a dimensão da área de estudo e com características hidrogeológicas particulares do local.

O grau de confiabilidade das estimativas de recarga é frequentemente questionado. Isso se dá devido à incerteza de alguns parâmetros necessários e também é resultado de hipóteses simplificadoras.

A estimativa de recarga também é comumente feita pela análise de hidrogramas, método onde é necessária a separação dos escoamentos superficial e subterrâneo. A separação desses dois componentes pode ser feita por métodos que utilizam de traçadores químicos e/ou isotópicos, aproximação gráfica e utilização de filtros digitais (GONÇALVES *et al.*, 2016).

O método de separação por análise gráfica é o mais utilizado devido a sua praticidade. Aplicado manualmente, o método consiste no ajuste de curvas focando pontos de inflexão do hidrograma afim de melhor representar o comportamento das águas subterrâneas e superficiais. Esse método possui uma subjetividade associada a metodologia manual e implica em um grande consumo de tempo para realizar a análise de séries históricas.

Já, o método por traçadores químicos e isotópicos é o de mais alto custo, possui pouca praticidade e análise histórica limitada, porém apresenta bons resultados e pode ser utilizado na calibração de demais métodos.

O método de filtros digitais, por sua vez, é padronizado e sistemático, permitindo o uso de *softwares* computacionais para mecanizar o trabalho manual e evitar inconsistências relacionadas ao método manual, aferindo assim uma grande vantagem ao método. Dentre os diversos métodos de filtros digitais, um dos mais comumente utilizados é o método desenvolvido por Pettyjohn e Henning (1979), que será utilizado nesse estudo e melhor abordado posteriormente.

2.2. Modelagem geológica

Para Rosembueth & Weiner (1945), nenhuma parte substancial do universo é tão simples que possa ser compreendida e controlada sem abstração. A abstração consiste em substituir a parte do universo em estudo por um modelo semelhante, porém de estrutura mais simples. Os modelos constituem, portanto, uma necessidade primordial de qualquer procedimento científico. Um modelo deve reunir duas qualidades conflitantes: o realismo e a simplicidade. O realismo confere precisão à abstração do modelo real, enquanto que a simplicidade permite sua manipulação experimental (SAWAKUCHI & GIANNINI, 2006).

Um modelo geológico é criado a partir da compilação de dados geológicos que são submetidos a fórmulas matemáticas que buscam uma representação aproximada da realidade, e, portanto, é imprescindível o uso de *softwares* em sua confecção. O modelo geológico, portanto, constitui-se de uma representação tridimensional simplificada dos litotipos das formações geológicas de uma determinada área.

A aplicação de modelos em hidrogeologia é de extrema importância, uma vez que se faz necessário um entendimento avançado sobre as características do meio físico, para melhor interpretação dos resultados das análises hidrogeológicas e, conseqüentemente, uma melhor gestão dos recursos hídricos.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo (Figura 3.1 e 3.2) é a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins, uma sub-bacia hidrográfica da Bacia de Taubaté, localizada na zona sudeste do município de São José dos Campos. O ribeirão é um dos afluentes da margem direita do Rio Paraíba do Sul.

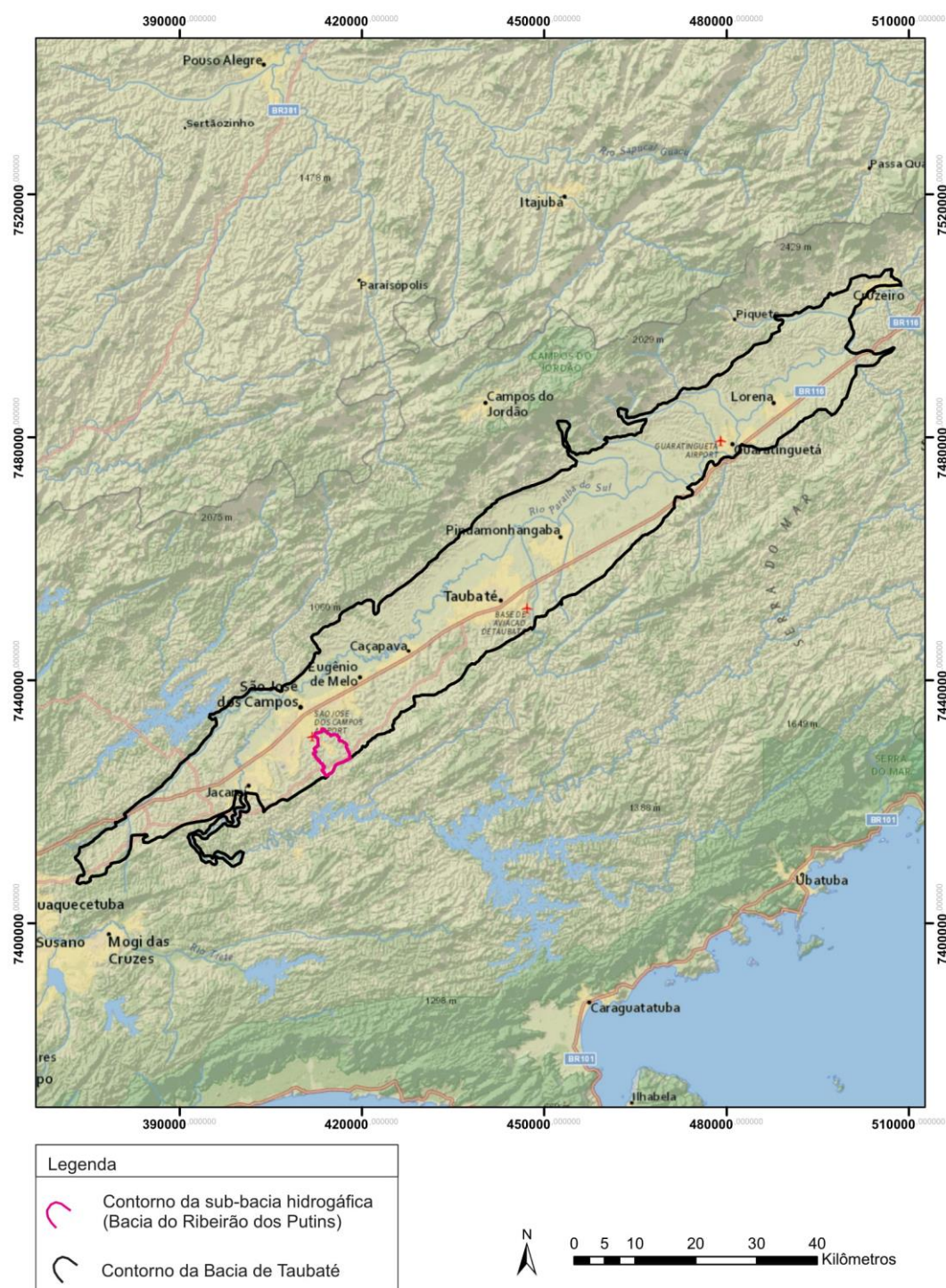


Figura 3.1. Localização da área de estudo em relação a Bacia do Taubaté. Elaborado pela autora.

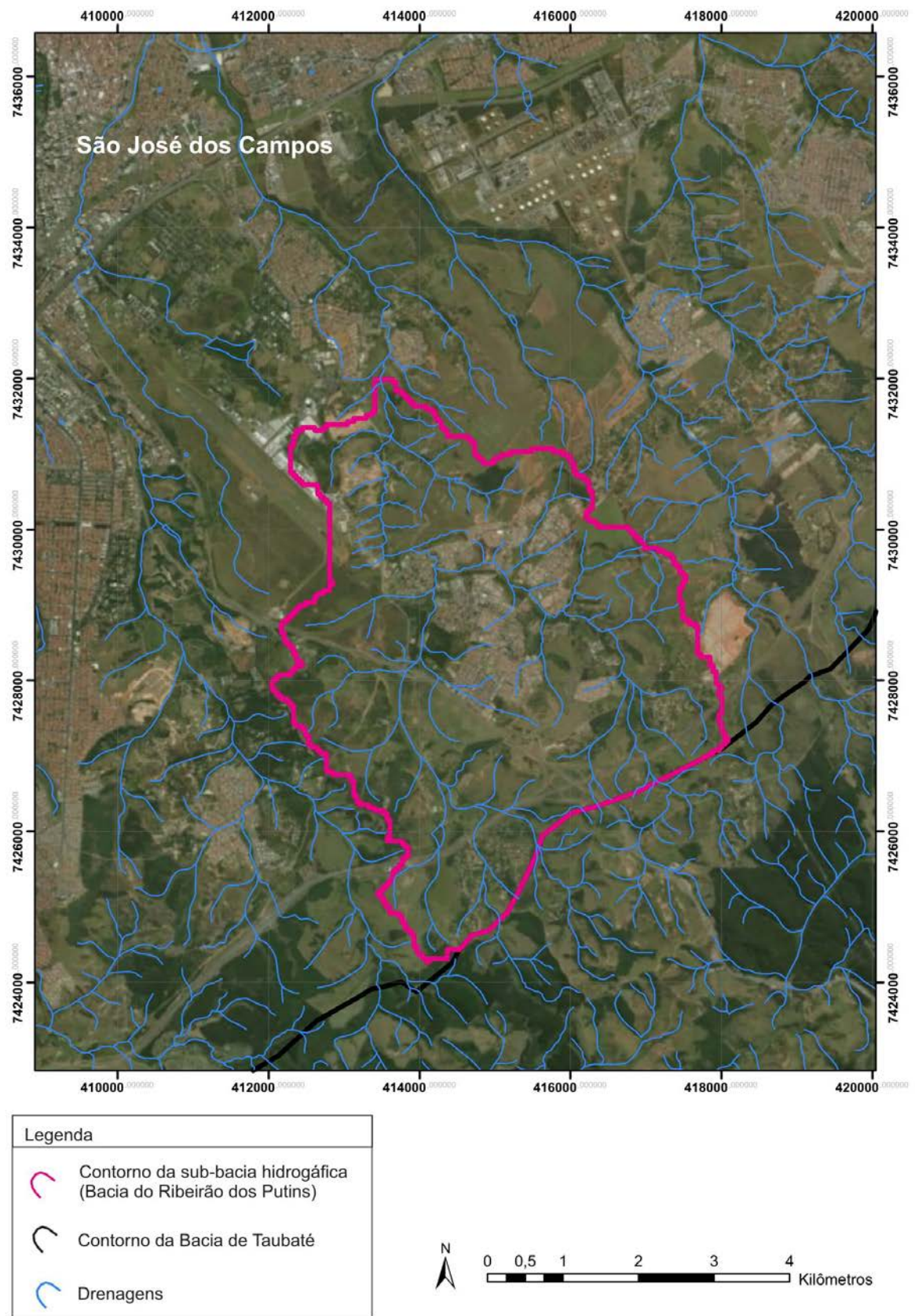


Figura 3.2. Localização da área de estudo, com drenagens em detalhe. Elaborado pela autora.

Cabe dizer que só foi considerada a área da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins em que afloram rochas sedimentares, que estão dentro dos limites da Bacia de Taubaté, descartando assim a área de afloramento das rochas do embasamento.

3.1. Contexto geológico regional

A área de estudo insere-se no contexto da Bacia de Taubaté, situada na região sudeste do Brasil, a leste do Estado de São Paulo. Geomorfologicamente, se encontra no Vale Rio Paraíba do Sul entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar. A Bacia de Taubaté possui uma forma alongada na direção ENE-WSW com largura de 20 km e comprimento de aproximadamente 170 km, com cerca de 3200 km² de área (VIDAL *et al.*, 2004; RICCOMINI, 2004) (Figura 3.3).

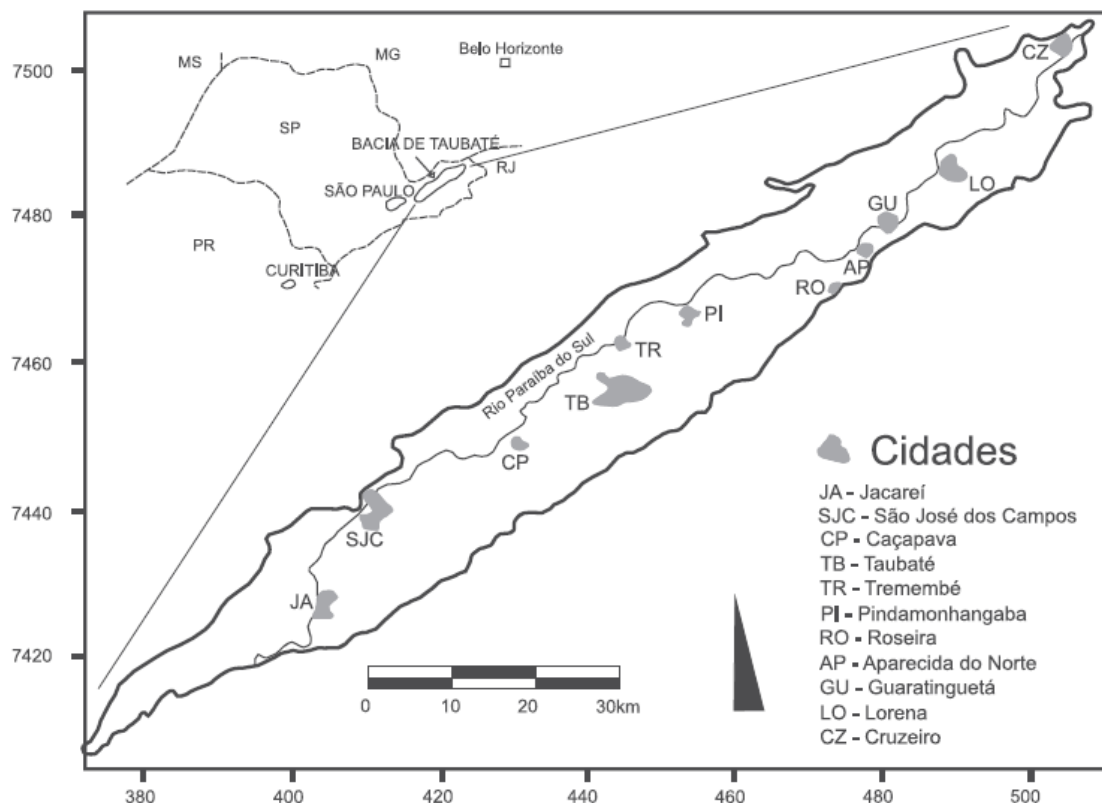


Figura 3.3. Mapa de localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo e principais cidades. Fonte: Carvalho *et. al.*, 2011.

A Bacia de Taubaté pertence à um conjunto de bacias tafrogênicas cenozoicas denominado por Riccomini (1989) de *Rift* Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB), uma feição tectônica de idade cenozoica, que se estende entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro. Essas bacias tafrogênicas (Taubaté, São Paulo, Curitiba,

Resende e Volta Redonda) constituem uma única depressão alongada na direção ENE-WSW, e acompanham as principais estruturas do embasamento da região (RICCOMINI *et. al.*, 2004).

Localizada no segmento central do RCSB, a Bacia de Taubaté está associada à tectônica distensiva de idade paleógena. Para Fernandes (1993), sua forma alongada está condicionada por antigas descontinuidades de direção geral ENE-WSW do embasamento, fator que favorece a atuação de uma tectônica ressurgente.

O embasamento da bacia é composto por rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, com idades que vão desde o Paleoproterozoico até o Neoproterozoico (HASUI E POÇANO, 1978). Seu arcabouço é formado por hemigrábens separados por zonas de acomodação, com depocentros invertidos, em típica geometria de bacia do tipo rifte (HASUI E POÇANO, 1978).

As rochas que compõem o embasamento pré-cambriano da Bacia de Taubaté são correspondentes às rochas do Grupo Açungui, este que é dividido em Complexo Embu e Complexo Pilar. O Complexo Embu é que mais representa o substrato da bacia, composto principalmente por migmatitos homogêneos, oftálmicos, neolíticos e facoidais, com intercalações de metassedimentos do Complexo Pilar, com a presença de corpos metabásicos (FERNANDES, 1993)

A estruturação do embasamento da Bacia de Taubaté foi proposta por diversos autores que estudaram a profundidade e a morfologia do embasamento (MARQUES, 1990; PADILHA *et al.*, 1991; FERNANDES, 1993), porém estudos mais recentes de Fernandes e Chang (2001, 2003) sugerem uma subdivisão da bacia em três compartimentos denominados, de sudoeste para nordeste, como São José dos Campos, Taubaté e Aparecida. Os altos estruturais reconhecidos por esses autores são o Alto de Caçapava e Alto de Pindamonhangaba (Figura 3.4).

A sedimentação da Bacia de Taubaté é tipicamente continental e esse preenchimento pode ser separado em duas fases: a primeira corresponde a uma fase sin-tectônica ao rifte, com deposição de sedimentos do Grupo Taubaté, composto pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo; a segunda está relacionada a uma fase posterior à tectônica diastrófica, com a deposição da Formação Pindamonhangaba e de depósitos aluviais e coluviais (Figura 3.5) (RICCOMINI, 1989).

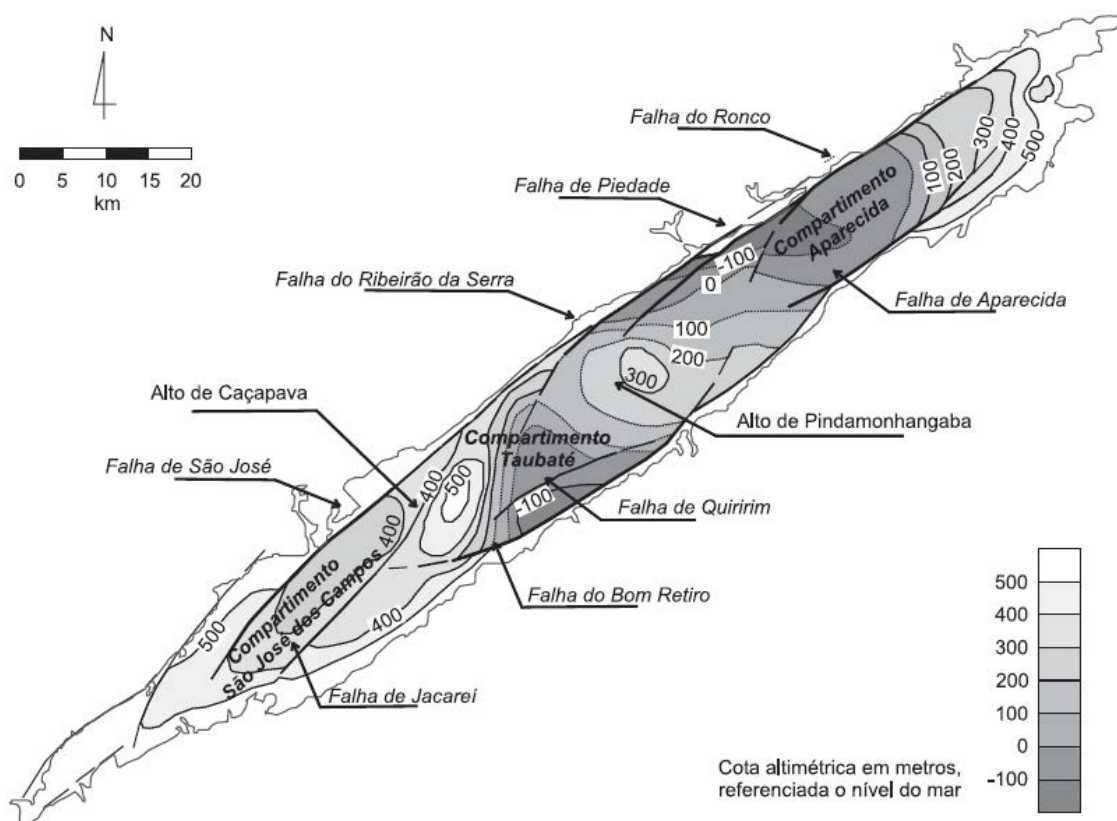


Figura 3.4. Mapa do arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté. Fonte: Fernandes e Chang, 2003.

A evolução sedimentar da primeira fase compreende um sistema de leques aluviais relacionados à planície fluvial de rios entrelaçados inseridos na base e nas porções laterais da bacia, representado pela Formação Resende, assim como um sistema lacustre com registro na porção central da bacia, representado pela Formação Tremembé (CARVALHO *et al.*, 2011). Também são reconhecidos depósitos associados a um sistema fluvial meandrante, referentes à Formação São Paulo (CARVALHO *et al.*, 2011).

A fase pós tectônica diastrófica é representada por um sistema fluvial meandrante que se dispôs na porção central da bacia, e é referente às rochas da Formação Pindamonhangaba e também à uma diversidade de depósitos aluviais e coluviais pleistocênicos.

A Formação Resende é constituída de orto e para conglomerados nas áreas proximais e de arenitos intercalados por lamitos nas porções medianas e distais dos leques aluviais, além de arenitos fluviais em rios entrelaçados axiais às bacias (FERRARI, 2004; RICCOMINI, 2004; VIDAL *et al.*, 2004). Ela compreende a maior porção do pacote sedimentar paleogênico.

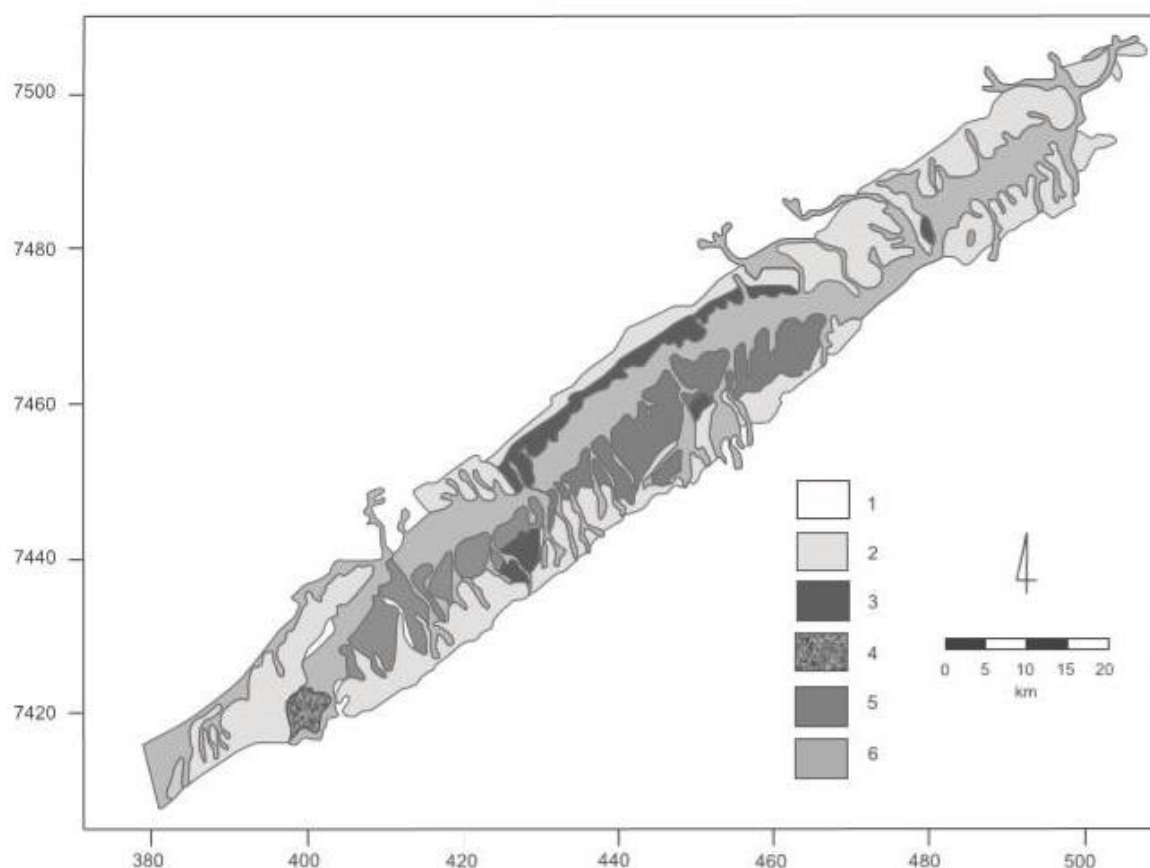


Figura 3.5. Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté. 1: Rocha do embasamento; 2: Formação Resende; 3: Formação Tremembé; 4: Formação São Paulo; 5: Formação Pindamonhangaba; 6: Sedimentos Quaternários. Fonte: Carvalho *et al.*, 2011.

O sistema de leques aluviais da Formação Resende grada vertical e lateralmente para um sistema tipo *playa-lake* lacustre da Formação Tremembé, esta que é presente na porção central da Bacia de Taubaté (RICCOMINI E COIMBRA, 1992).

Estudos de Riccomini (2004) e Vidal *et al.* (2004) permitem o reconhecimento das principais litofácies da Formação Tremembé: argilitos verdes maciços, ritmitos formados pela alternância de folhelhos e margas, dolomitos tabulares e arenitos com estratificação cruzada sigmoidal e granodecrescência de areia média até silte, além de arenito grosso arcoseano.

A unidade de topo do Grupo Taubaté, a Formação São Paulo, tem ambiente deposicional fluvial meandrante, e tem ocorrência restrita na porção sudoeste da Bacia de Taubaté (RICCOMINI, 2004).

A Formação São Paulo é composta por arenitos grossos conglomeráticos, com abundante estratificação cruzada, siltitos e argilitos laminados e arenitos médios e grossos gradando para sedimentos mais finos (VIDAL *et al.*, 2004).

Um novo sistema fluvial meandrante se desenvolve nas porções central e sudoeste da bacia, e deposita, em contato angular com o Grupo Taubaté (principalmente Formação Tremembé), os sedimentos da Formação Pindamonhangaba (MANCINI, 1995). A Formação Pindamonhangaba foi proposta informalmente por Ricomini (1989), que apresentou o primeiro mapeamento da unidade. Esta unidade foi dividida por Mancini (1995) em dois membros interdigitados, o membro Rio Pararangaba e o membro Presidente Dutra. O primeiro representa fácies de canal de sistema fluvial meandrante de granulação grossa enquanto que o segundo é relacionado à deposição em planícies de inundação de sistema fluvial meandrante de granulação fina.

O pacote areno-argiloso da Formação Pindamonhangaba se encontra recoberto por sedimentos coluviais e aluviais datados do Quaternário (RICCOMINI, 1989, MANCINI, 1995).

3.1.1. *Evolução da área*

O rifteamento da Bacia de Taubaté está associado a tectônica ressurgente instalada devido às descontinuidades do embasamento cristalino pré-cambriano (RICCOMINI, 1989). A tectônica extensional resultou no desenvolvimento de grábens assimétricos, limitados por falhas que mudam de vergência ao longo da bacia, formando um padrão alternado (FERNANDES & CHANG, 2001)

Os estudos geofísicos de Padilha *et al.* (1991) propõem um modelo transtensional para a tectônica da bacia. Para Hasui & Poçano (1978), estruturas rúpteis se desenvolveram durante o Ciclo Brasileiro e posteriormente essas estruturas foram reativadas durante o período do Terciário Superior.

Entretanto, Riccomini *et al.* (2004) atrela a formação da bacia a um rifteamento ocorrido no Paleógeno de extensão NW-SE. E ainda, afirma que o desenvolvimento desse rift gerou uma série de bacias separadas (São Paulo, Taubaté Resende e Volta Redonda), que antes pertenciam a uma mesma bacia deposicional, durante a reativação do Neógeno, devido a tectônica deformadora do rift.

Estudos mais recentes retratam que a Bacia de Taubaté foi originada durante o Paleógeno por extensão pura (bacia tipo rift) ou por extensão transtensional (bacia *pull-apart*), e que foi reativada no Neógeno por compressão ou transpressão (COGNÉ *et al.*, 2013).

O nome de Sistema de Riftes Cenozoicos de Sudeste do Brasil (SRCSB) foi proposto por Zalán e Oliveira (2005) para denominar o RCSB, afim de definir um modelo de evolução genética. Os autores sugerem que as altitudes atuais das montanhas que circundam o SRCSB são resultado de dois eventos de alçamento. O primeiro pulso ocorre entre 85 e 65 Ma e tem natureza regional e epirogenética, associado à um momento em que a Placa Sul Americana passa sobre uma anomalia térmica, soerguendo a Serra do Mar Cretácea de maneira maciça e uniforme. Esse soerguimento constituiu um megaplanalto de cerca de 300 mil km² de extensão, afirmam os autores. No período pós-soerguimento, este megaplanalto é então nivelado por uma superfície de aplainamento.

O segundo evento tem natureza de colapso. A Serra do Mar Cretácea constituía um planalto desnivelado em relação às bacias adjacentes, com flanco leste abrupto. Com o avanço da subsidência da bacia, a estabilidade isostática instalada acarretou em um colapso gravitacional do megaplanalto no fim do paleoceno.

Zalán e Oliveira (2005) interpretam que os falhamentos do megaplanalto atingiram grandes profundidades, fazendo com que material mantélico juvenil viesse à superfície, e então se inicia o aprisionamento de depósitos clásticos nas regiões onde houve formação de grábens. Este colapso continua no Neo-eoceno, Oligoceno e Eomioceno, idade da maior parte dos depósitos do SRCSB (ZALÁN E OLIVEIRA, 2005).

A Figura 3.6, adaptada por Vidal *et al.* (2004) dos trabalhos de Riccomini (1989, Salvador (1994) e Mancini (1995), sintetiza a litoestratigrafia e a evolução tectono-sedimentar do RCSB.

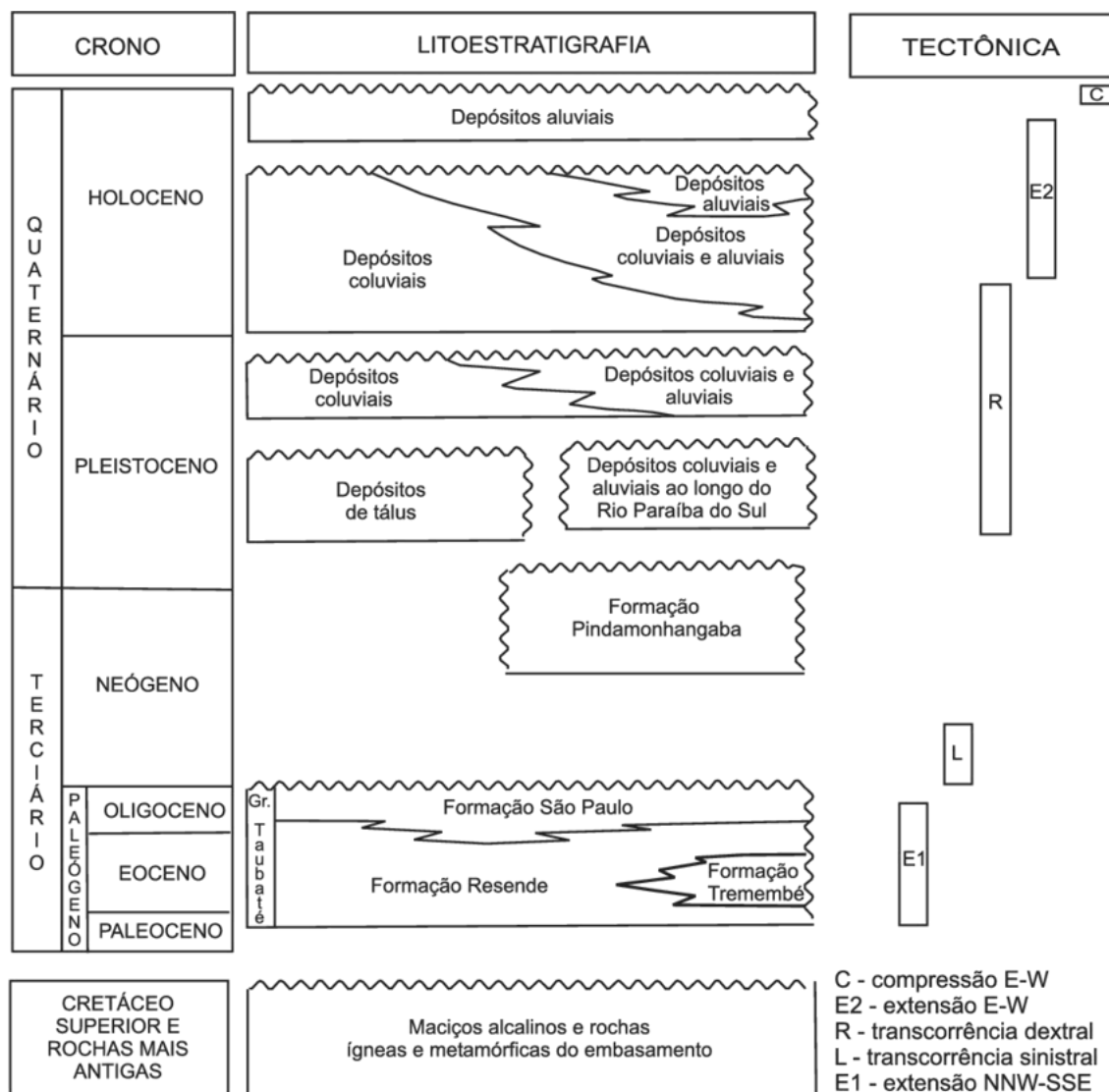


Figura 3.6. Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do RCSB. Fonte: Vidal *et al.*, 2004.

3.2. Geomorfologia

O Vale do Paraíba caracteriza-se por uma superfície muito rebaixada embutida em rochas Pré-Cambrianas, limitada pelas serras da Mantiqueira a nordeste e do Mar a sudeste. No Pré-Cambriano (Ciclo Brasileiro), a movimentação tectônica produziu um relevo formado por dobras, falhas e intrusões, o qual, posteriormente, nos períodos Paleo-Mesozóico, passou por sucessivos ciclos erosivos. Esses processos erosivos denudacionais esculpiram formas de relevo predominantemente aplainadas, provavelmente, retilinizadas e colinosas (NASCIMENTO, 2005).

Assim, nesta superfície erosiva, após milhões de anos sem atividade tectônica significativa, ocorreu uma nova movimentação (Reativação Waldeniana), denominada de

Sistema de Rifts da Serra do Mar (ALMEIDA, 1967) ou Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI, 1989), que produziu o abatimento escalonado através de falhas normais gerando as escarpas da Serra da Mantiqueira e da Serra do Mar. Em paralelo formou-se o Vale do Paraíba do Sul, situado sobre uma fossa ou vale tectônico, preenchido por sedimentos (HASUI e ALMEIDA, 1978).

No que tange a geomorfologia do município de São José dos Campos (Figura 3.7), área de estudo do presente trabalho, está intimamente condicionada à tectônica e foi esculpida por processos erosivos e de aggradação (NASCIMENTO, 2005). A malha urbana de São José dos Campos está concentrada em uma superfície muito rebaixada em relação ao limite total do município.

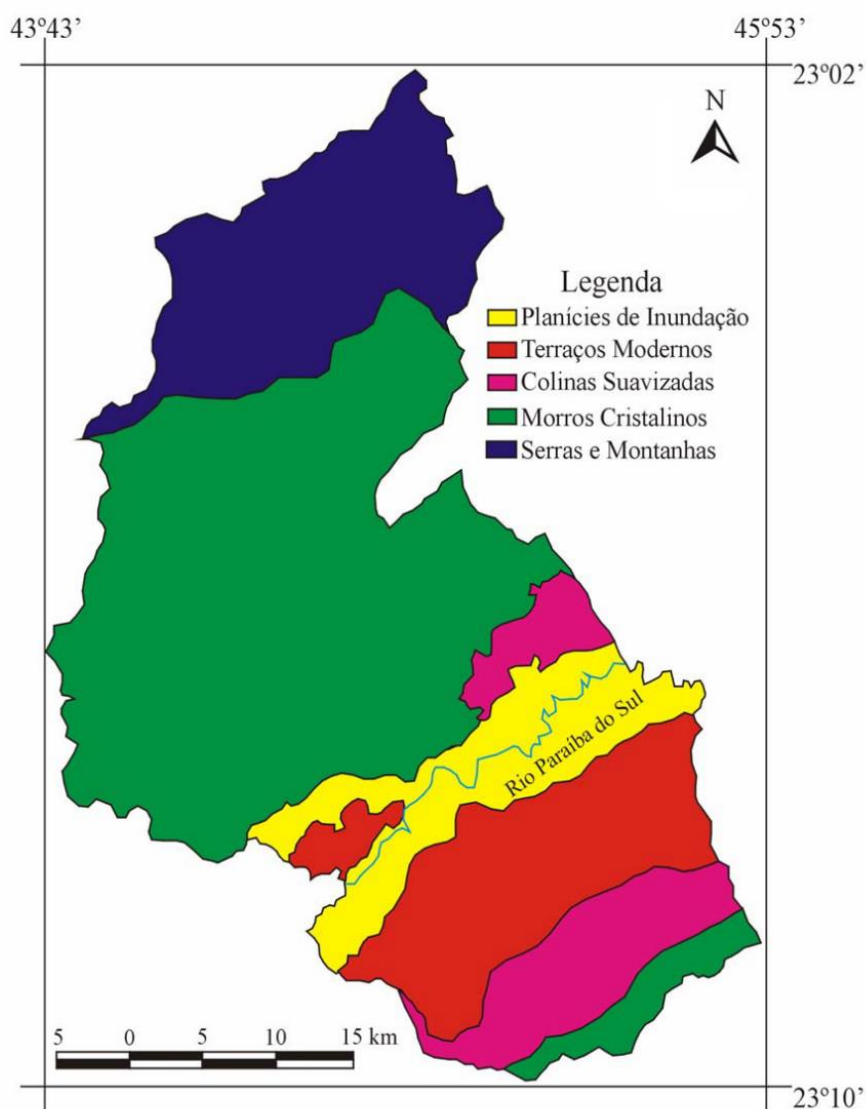


Figura 3.7. Carta geomorfológica do Município de São José dos Campos. Fonte: Nascimento, 2005.

Desta forma, a morfografia determinou o desenvolvimento urbano, a qual se concentrou, inicialmente, nas áreas planas e suavizadas dos terraços e das colinas. Entretanto, o avanço acelerado deste crescimento urbano tem causado problemas estruturais do espaço urbano, como a utilização de encostas e várzeas para fins de urbanização (NASCIMENTO, 2005).

3.3. Análises Climáticas

São variados os tipos climáticos presentes na bacia do Rio Paraíba do Sul devido a sua heterogeneidade topográfica e variação latitudinal. Para Hirata (1994), os três principais tipos climáticos da região são: o clima subtropical, típico de áreas de serras e morros, que é representado por temperaturas médias de 18°C e chuvas pouco intensas na faixa de 1000 mm ao ano; o clima tropical, identificado no fundo do vale do rio Paraíba do Sul, representado por temperaturas médias anuais superiores a 18°C e por invernos secos e verões úmidos, bem definidos; e o clima tropical úmido, com temperaturas médias elevadas e maior média pluviométrica dentre os tipos, sendo característico da região da Serra do Mar.

De acordo com Marengo e Alves (2005), a temperatura média anual para a região da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul oscila entre 18°C e 24°C. Com base em dados climáticos coletados entre 1992 e 2005, Folhes & Fisch (2006) puderam observar uma média de 21,9°C de temperatura para a região de Taubaté, sendo considerada uma média amena, próxima a normal climatológica.

Com relação ao regime de chuvas, os índices de precipitação variam entre 1200 e 1300 mm/ano no vale do rio Paraíba do Sul (SOARES *et al.*, 2008). Para as regiões da Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar, os índices de precipitação são maiores atingindo valores entre 1300 a 2800 mm/ano (SOARES *et al.*, 2008).

Essa pluviosidade está fortemente controlada pela variação sazonal na região. No verão, ocorrem 44% das chuvas, enquanto que somente 7% ocorrem no inverno. Os 49% restantes são divididos de maneira aproximada entre as estações de outono e primavera (FOLHES & FISCH, 2006).

O período de verão é caracterizado como chuvoso e tem uma precipitação acumulada entre 200 e 250 mm ao mês nos meses de máxima precipitação (dezembro e janeiro), enquanto que no inverno, o intervalo entre os meses de maio a agosto corresponde ao período mais seco do ano, com precipitação acumulada inferior a 50 mm ao mês. (MARENGO e ALVES, 2005)

Hirata (1994) afirma que a atuação do relevo no clima é nítida: o vale situa-se entre duas serras escarpadas de direção preferencial SW-NE, fator que determina a gênese das precipitações do tipo orográfica. Portanto, os índices pluviométricos da bacia apontam para maiores volumes de chuvas nas faces escarpadas voltadas para o oceano e menores quando associadas ao fundo de vale, onde se localiza a cidade de São José dos Campos.

Na região de São José dos Campos, o clima é tido como quente e temperado, e existe uma pluviosidade significativa ao longo do ano. De acordo com a Köppen e Geiger o clima é classificado como Cfa, com 19.4 °C de temperatura média e 1269 mm de pluviosidade média anual (dados do Climate-Data, 2018).

3.4. Hidrografia e Hidrogeologia

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, que se estende por territórios pertencentes a três estados da região sudeste, perfazendo uma rede de drenagem de aproximadamente 57.000 km², sendo 24% dessa área em São Paulo, 36% em Minas Gerais e 40% no Rio de Janeiro.

A Bacia do Rio Paraíba do Sul tem como principal rio o Rio Paraíba do Sul, que é formado pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna e banha os três estados que a bacia abrange. Seus principais afluentes são os rios Jaguari, Paraibuna, Pomba e Muriaé, pela margem esquerda, e os rios Piraí, Piabanha e Dois Rios, pela margem direita. Deságua no Oceano Atlântico, em São João da Barra, após ter percorrido 1180 km (AMORIM e FERREIRA, 2000).

Comumente as vazões fluviais apresentam uma alta variabilidade sazonal. Porém, na região do Vale do Paraíba, as vazões apresentam certa regularidade, sofrendo menor efeito da sazonalidade, garantida pelos reservatórios de cabeceira (rios Paraitinga/Paraibuna e Jaguari) (MARENGO e ALVES, 2005).

O rio Paraíba do Sul é responsável pelo abastecimento de cerca de 15 milhões de pessoas, das quais 87% residem em regiões metropolitanas (IBGE, 1996). Considerando o aumento da população e o aumento da concentração da população residente em áreas urbanas (Tabela 3.1), a tendência é que seja ainda mais necessária uma inteligente gestão de recursos hídricos para abastecer novas indústrias e residências urbanas.

Tabela 3.1. Crescimento populacional no Vale do Paraíba nas décadas de 1970, 1980 e 1990.

População	1970	1980	1991	1996
Total	3.341.854	4.096.138	4.944.056	5.246.066
Urbana	2.197.643	3.164.317	4.231.244	4.560.231
Rural	1.144.211	931.821	712.812	685.835
% Urbano	66	77	86	87

Fonte: IBGE.

A bacia do Rio Paraíba do Sul é subdividida em quatro sub-bacias, a saber: bacia do Baixo Paraíba Sul, bacia Muriaé/Pomba, bacia Paraibuna e bacia do Alto Paraíba Sul. A estação fluviométrica analisada neste trabalho está localizada na bacia do Alto Paraíba Sul, mais precisamente na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins, um dos afluentes da margem direita do Rio Paraíba do Sul.

A região de São José dos Campos (área de estudo) juntamente com a região de Lorena, são as mais favoráveis para a exploração de recursos hídricos, devido às suas altas taxas de vazões (10 a 200 m³/h), em contraposição a região central da bacia, que apresenta características menos promissoras para a exploração com vazões entre 20 e 30 m³/h (DAEE, 1977; TEISSEDRE e MARIANO, 1978).

Contudo, a área da Bacia de Taubaté, é bastante estudada. Mais de 700 poços já foram catalogados na bacia (CAMPOS, 1993) e novos estudos surgem a fim de melhor entender as condições dos aquíferos, dado o seu grande potencial de exploração e sua heterogeneidade geológica.

Os aquíferos da Bacia do Taubaté são em sua maior parte, caracterizados pela interdigitação de arenitos e lamitos e estão sob condições freáticas ou pouco confinadas, onde a pressão só ultrapassa a hidroestática em áreas limitadas (DAEE 1977; VIDAL e CHANG, 2004). O fluxo de água subterrânea acompanha, em geral, as cotas topográficas, em direção a principal drenagem da bacia (Rio Paraíba do Sul) (VIDAL e CHANG, 2004).

O Sistema Aquífero Taubaté é classificado por Carvalho & Hirata (2012) como livre a semiconfinado, granular, com extensão limitada, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Os mesmos autores trazem as seguintes características para o SATA: área de 2200 km²; vazão média de 107,5 m³/h; porosidade total de 0,12%; espessura saturada de 200m; gradiente

hidráulico de 0,02; condutividade hidráulica de 1,5 m/d; porosidade efetiva de 0,12% e; recarga de 350 mm/ano.

Estudos hidroquímicos de Vidal & Chang (2004) apontam a maior ocorrência de águas de baixa salinidade no SATA, com mediana dos valores STD (Sólidos Totais Dissolvidos) de 134mg/L e 75% dos dados com valores inferiores a 214 mg/L.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho se deu nas etapas descritas a seguir:

4.1. Revisão bibliográfica

Esta etapa se baseia na consulta bibliográfica e se prolonga do início ao fim do projeto. Consiste na caracterização regional geológica do Sistema Aquífero Taubaté, de modo a fornecer dados sobre a distribuição litológica referente aos litotipos pertencentes ao SATA e; compilação de dados hidrológicos e climatológicos da região de estudo.

4.2. Controle de qualidade das informações e confecção de banco de dados

A segunda etapa baseia-se na compilação dos dados adquiridos e durante ela é feita a seleção de estações fluviométricas e pluviométricas pertencentes à área de estudo. Estas informações foram adquiridas no banco de dados *online* Hidroweb - Sistemas de Informações Hidrológicas – da Agência Nacional de Águas – ANA, onde foi possível obter, juntamente com os dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), diversas informações, tais como a localização das estações, cotas do nível d'água, vazão, vazão específica e precipitação.

A porção hidrográfica do rio Paraíba do Sul situada sobre o SATA foi dividida em diversas sub-bacias hidrográficas, delimitadas a partir da área de drenagem das estações fluviométricas analisadas.

A partir das cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), obtidas no site do IBGE, foi possível adquirir dados topográficos e hidrográficos que foram tratados no *software* ArcGIS 10.0 e possibilitaram a delimitação das sub-bacias hidrográficas mensuradas pelas suas respectivas estações fluviométricas.

No presente estudo, a estação fluviométrica de código 58146000 e sua respectiva sub-bacia foram escolhidas a fim de quantificar o fluxo de base do aquífero na região (Figura 4.1). Para seleção da estação fluviométrica buscou-se uma que estivesse localizada nos rios que cortam o SATA e próxima aos limites do aquífero, com a finalidade de analisar e quantificar o fluxo de base do SATA, da maneira mais fidedigna possível, e minimizar a influência de outras unidades aquíferas. Além disso, procurou-se escolher uma estação fluviométrica que apresentasse dados consistidos de maneira mais contínua possível.

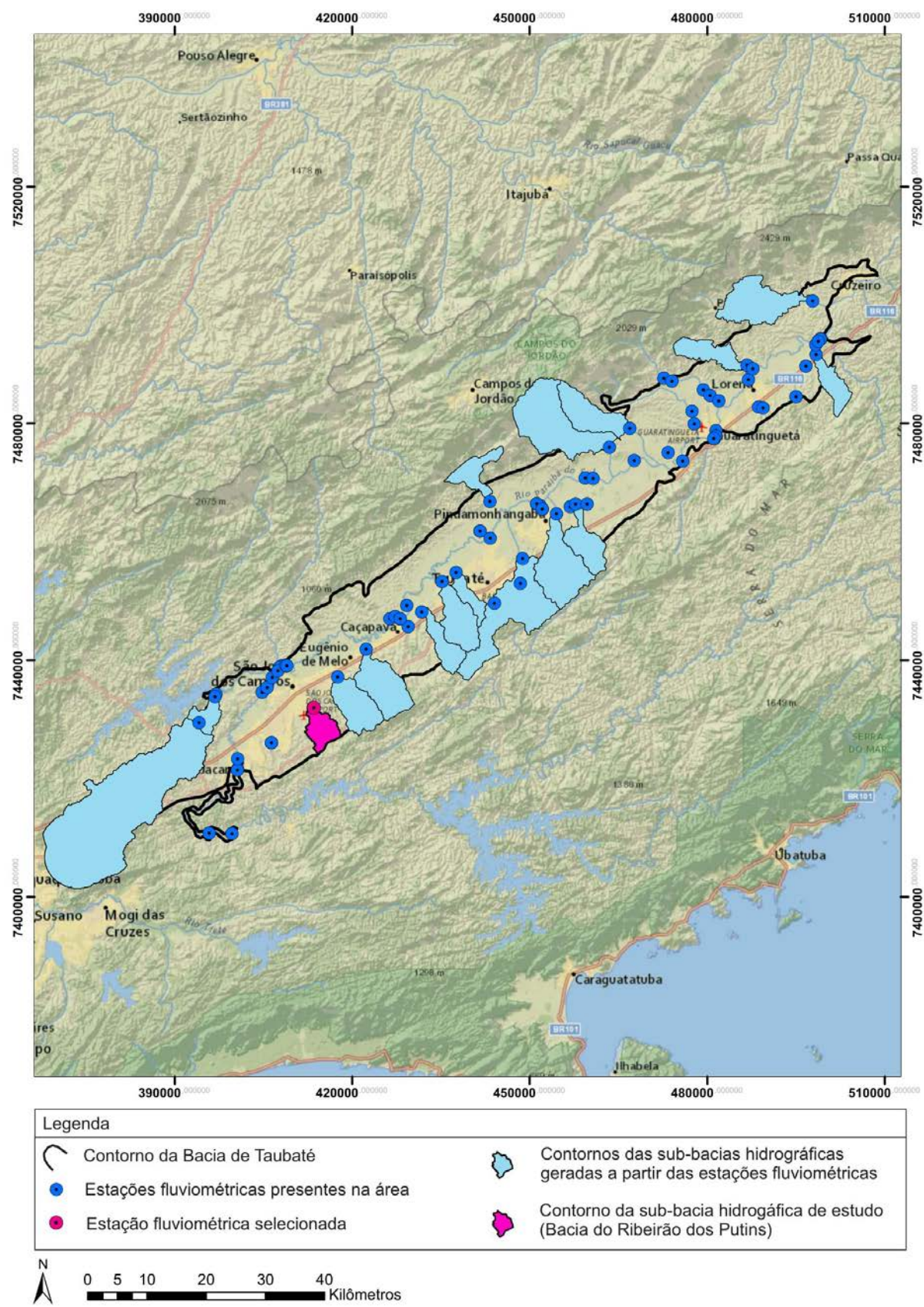


Figura 4.1. Sub-bacias hidrográficas geradas a partir das estações fluviométricas e sub-bacia escolhida para o estudo. Elaborada pela autora.

Uma vez determinada a área de drenagem da estação fluviométrica em questão, selecionou-se, dentre as estações pluviométricas presentes na região, a estação pluviométrica de maior influência na sub-bacia, representada pelo número 2345019. Esta estação pluviométrica foi escolhida por: sua localização (próxima a área da sub-bacia); ter uma série histórica longa, que abrange o período da série histórica da estação fluviométrica e; apresentar dados praticamente ininterruptos, principalmente durante o período que coincide com o de coleta de dados da estação fluviométrica.

Ademais, organizou-se os dados referentes aos poços tubulares distribuídos na área de estudo, os quais são fornecidos pelo Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Os dados referentes aos poços incluem informações como o perfil geológico descritivo e perfil construtivo do poço, coordenadas geográficas, cotas, nível d'água e testes de bombeamento.

4.3. Cálculo da vazão

Nesta etapa do trabalho obteve-se as vazões da estação fluviométrica analisada. As medições de vazão são feitas periodicamente em determinadas seções dos cursos d'água (estações fluviométricas), entretanto, para a estação fluviométrica escolhida, não há dados de medições de vazão diárias. Nos bancos de dados *online* do Hidroweb e do DAEE apenas foram encontradas medições de vazão mensal e vazão diária para apenas alguns dias da série histórica. Contudo, havia informações dos níveis d'água diários para toda a série histórica da estação fluviométrica.

Desta forma, calculou-se a vazão diária a partir da relação entre as vazões diárias disponíveis para alguns dias da série histórica e as cotas dos níveis d'água dos rios para esses mesmos dias, através da equação (4.1) denominada curva chave:

$$Q = a (H - H_0)^b \quad (4.1)$$

Onde: a, b e H_0 são parâmetros de ajuste; H é o nível do rio; Q é a vazão.

A curva chave é a relação nível-vazão numa determinada seção do rio. Vale ressaltar que, embora o nível d'água não seja o único fator com influência na vazão, variáveis como a declividade do rio e forma da seção são razoavelmente constantes ao longo do tempo

considerado (PORTO *et al.*, 2001). Com isso, foram considerados nesta etapa, somente os dados relacionados às cotas do nível d'água, que é a única variável temporal.

Como as cotas são tomadas com relação a um referencial arbitrário (fixado e materializado na superfície), H_0 consiste num parâmetro desconhecido, que pode ser entendido como a leitura do nível d'água na régua para o qual a vazão é nula. Deste modo, H_0 pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da posição do zero da escala com relação ao fundo do rio. É o valor para o qual a vazão calculada pela expressão é nula. (PORTO *et al.*, 2001).

Para determinar os parâmetros de ajuste a partir dos pares (Q,H), a equação 4.1 geral é linearizada (equação 4.2) e pode-se determinar a e b por regressão linear e H_0 por tentativa e erro. (PORTO *et al.*, 2001).

$$\log Q = \log a + \log b * (H - H_0) \quad (4.2)$$

Pode-se ainda determinar todos estes parâmetros por tentativa e erro, através de ferramentas interativas de planilhas eletrônicas. Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta interativa *Solver* do *Microsoft Excel*.

Desejou-se obter as constantes de forma que a soma dos quadrados dos desvios fosse mínima, aproximando ao máximo os valores de vazão calculados com os valores reais medidos.

A ferramenta *Solver* foi empregada e as seguintes condições foram determinadas para conduzir os cálculos:

- Minimizar o valor da soma dos desvios (célula destino);
- Valores de a , b e H_0 como células variáveis;
- Impor limite superior para o valor de H_0 (menor que o nível mínimo observado);

Desta forma, os valores das constantes a , b e H_0 foram ajustadas atendendo as condições impostas, o que permitiu a construção da equação da curva-chave. Entretanto, o resultado desta curva-chave no gráfico não atendeu às expectativas, uma vez que o valor da soma dos quadrados dos desvios entre vazão observada e vazão calculada estava alto.

Resolveu-se, portanto, fazer duas curvas chaves, uma que contempla o período entre 1960 e 1975 da série histórica da estação fluviométrica e outra, o período entre 1976 e 1978. Dividiu-se dessa forma devido ao notar dois grupos de padrões de vazão semelhantes, um até 1975 e outro posterior.

Logo, dois gráficos foram obtidos e consequentemente duas equações de curva chave, as quais foram utilizadas para identificar a vazão diária de cada ano.

4.4. Separação do escoamento superficial e subterrâneo

Para fazer a separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo foi aplicado o método de separação por filtros digitais. Para isso, foi utilizado o *software* BFI 3.0+, que aplica de maneira rápida e simples os filtros digitais para realização da separação dos escoamentos. De todos os métodos de filtros digitais existentes, três foram utilizados neste trabalho, e são melhor abordados no tópico seguinte.

4.4.1. Método de filtros digitais

Neste trabalho, os métodos de separação do escoamento superficial e subterrâneo utilizados foram métodos de filtros digitais, desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979) e intitulados: método do Intervalo Fixo (IF), método de Intervalo Móvel (IM) e método do Mínimo Local (ML). São métodos de separação que não envolvem limitações de ordem prática e econômica para a sua aplicação, como ocorre nos demais métodos de separação. Ademais, segundo Sloto e Crouse (1996) os métodos que utilizam filtros digitais apresentam resultados com boa aproximação dos resultados obtidos com processos manuais de separação e com o método dos traçadores (GONZALES *et al.*, 2009).

Na aplicação dos métodos de separação IF, IM e ML determina-se um intervalo de $2N^*$ dias (PETTYJOHN & HENNING 1979), que corresponde ao número inteiro imediatamente superior ao dobro de N (LINSLEY *et al.*, 1982), que é estimado adequadamente pela equação empírica 4.3:

$$N = 0,827 A^{0,2} \quad (4.3)$$

Onde: A é a área de drenagem, em km^2 .

Método do Intervalo Fixo

Neste método, seleciona-se a menor vazão dentro do intervalo de $2N^*$ dias, esta vazão é adotada como a descarga do escoamento subterrâneo, na qual esse valor é mantido constante durante todo o intervalo $2N^*$ dias.

A Figura 4.2 exemplifica intervalos fixos $2N^*$ de cinco dias. No primeiro intervalo fixo apresentado ($2N^*_{(i)}$), que equivale ao período entre o dia 5 e o dia 10, foi escolhida a menor

vazão dentro deste intervalo, representada pela vazão do dia 10. Desta forma, esta vazão foi empregada como o escoamento subterrâneo para todo o intervalo $2N^*_{(i)}$. No segundo intervalo fixo demonstrado ($2N^*_{(i+1)}$), que coincide com o intervalo entre o dia 10 e o dia 15, a menor vazão deste período foi selecionada e corresponde à vazão do dia 15. Com isso, essa vazão foi adotada como o escoamento subterrâneo de todo o intervalo ($2N^*_{(i+1)}$). O mesmo procedimento se aplica a todos os intervalos fixos $2N^*$ da série. (MIRANDA, 2012)

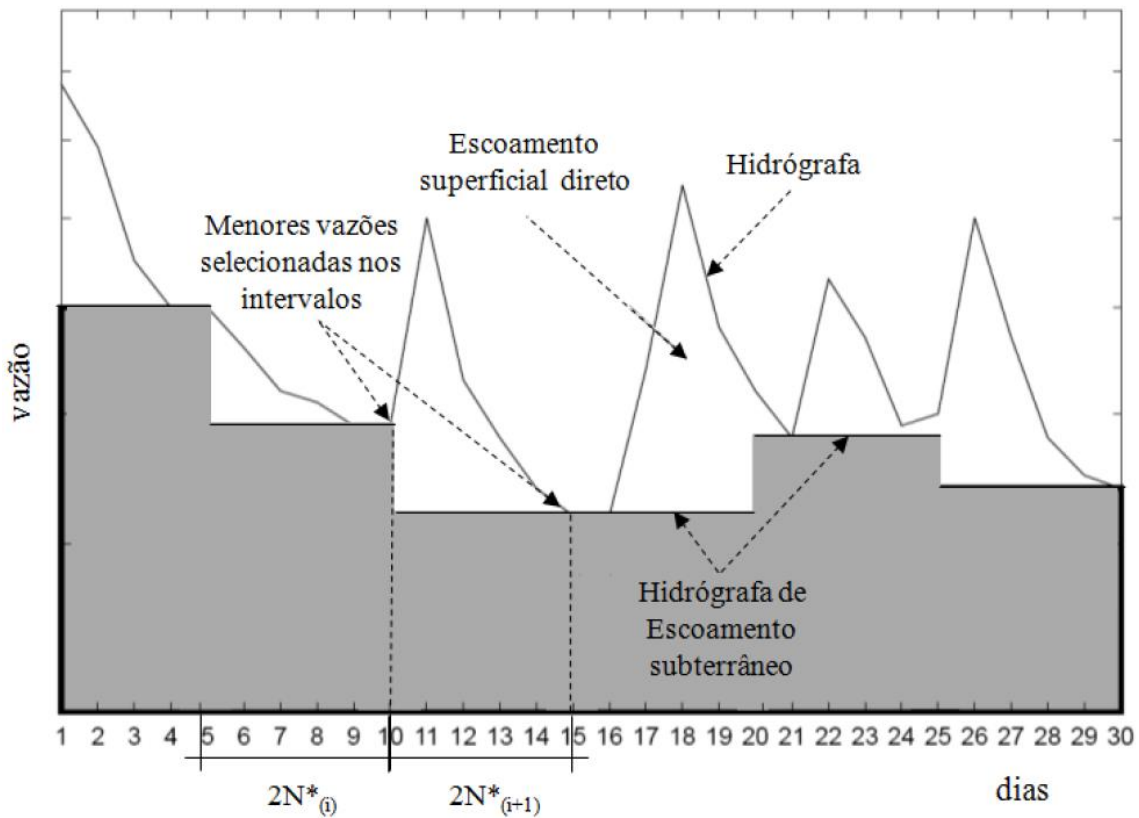


Figura 4.2. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo através do método do intervalo fixo (IF). Fonte: Miranda, 2012.

Método do Intervalo Móvel (IM)

Neste método, seleciona-se o menor valor de vazão no intervalo $2N^*$ dias e este valor é adotado como o escoamento subterrâneo do dia $D(i)$ dentro do mesmo intervalo. Para selecionar o dia D dentro do intervalo $2N^*$ dias, usa-se um critério, o qual é estimado pelas seguintes equações:

$$D_{(i)} = 0,5 (2N^* - 1), \text{ se } 2N^* \text{ for um número ímpar.} \quad (4.4)$$

$$D_{(i)} = N^*, \text{ se } 2N^* \text{ for um número par.} \quad (4.5)$$

Nas quais $D_{(i)}$ é o dia seleccionado dentro do intervalo $2N^*$ dias.

O intervalo de $2N^*$ dias é deslocado para o dia seguinte da série de vazões, onde selecciona-se um novo valor mínimo que será usado como o escoamento superficial do dia $D_{(i+1)}$.

A Figura 4.3 exemplifica intervalos fixos $2N^*$ de cinco dias. No primeiro intervalo exibido ($2N^*(i)$), que coincide com o intervalo entre os dias 3 e 8, escolheu-se a menor vazão dentro deste período, que corresponde à vazão do dia 8. Logo, esta vazão foi adotada como o escoamento subterrâneo para o dia $D_{(i)}$, correspondente ao dia 6. Desloca-se o intervalo para o próximo dia da série, o qual, passa a ser representado pelo intervalo ($2N^*(i+1)$) que coincide com o período entre os dias 4 e 9. A menor vazão deste intervalo, que corresponde ao dia 9, foi seleccionada como o escoamento subterrâneo do dia $D_{(i+1)}$, correspondente ao dia 7. O mesmo procedimento é repetido para cada dia da série de vazões e os valores de escoamento subterrâneo nos dias $D_{(i)}$ de cada intervalo são relacionados entre si por linhas que representam como o escoamento subterrâneo se comporta.

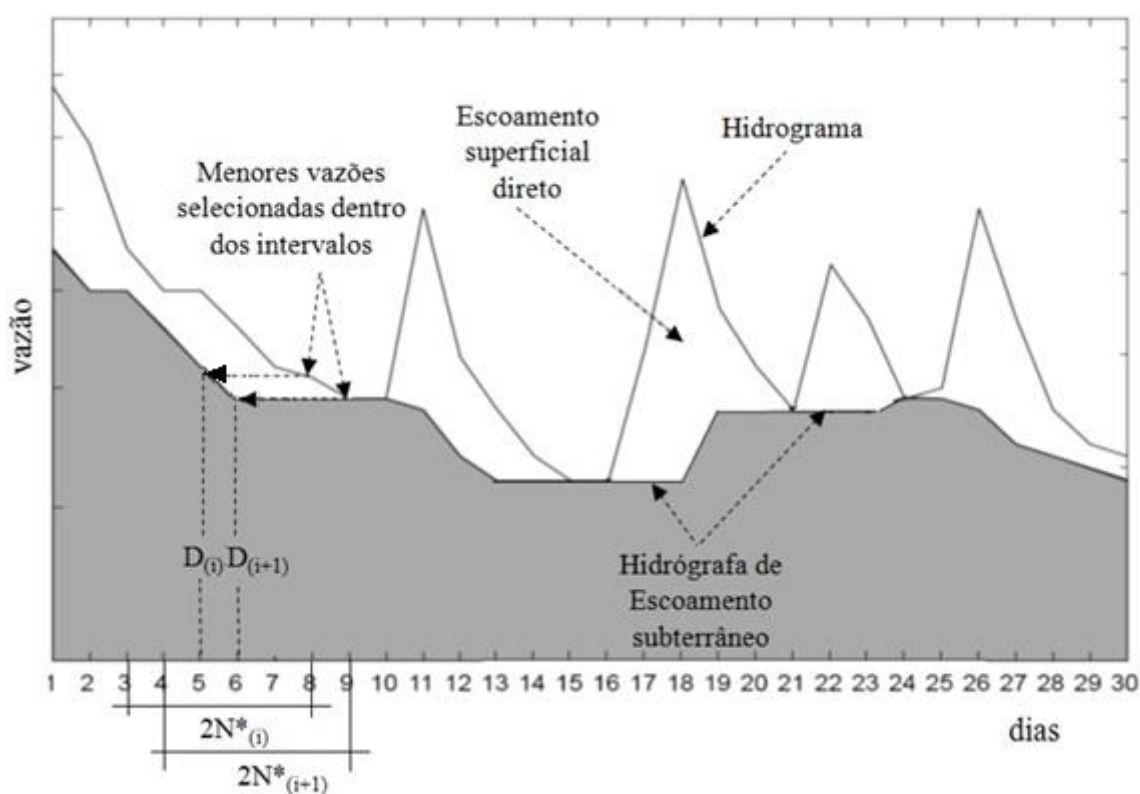


Figura 4.3. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo através do método do intervalo móvel (IM). Fonte: Miranda, 2012.

Método do Mínimo Local (ML)

No método do mínimo local verifica-se se a vazão do dia $D(i)$ (equações 4.4 e 4.5) é a menor dentro do intervalo de $2N^*$ dias. Uma vez atendida esta condição, este dia é tido como um mínimo local. O intervalo $2N^*$ é deslocado para o próximo dia da série de vazões em que é feita a verificação se a vazão do dia $D(i+1)$ é a menor dentro do intervalo (Figura 4.4)

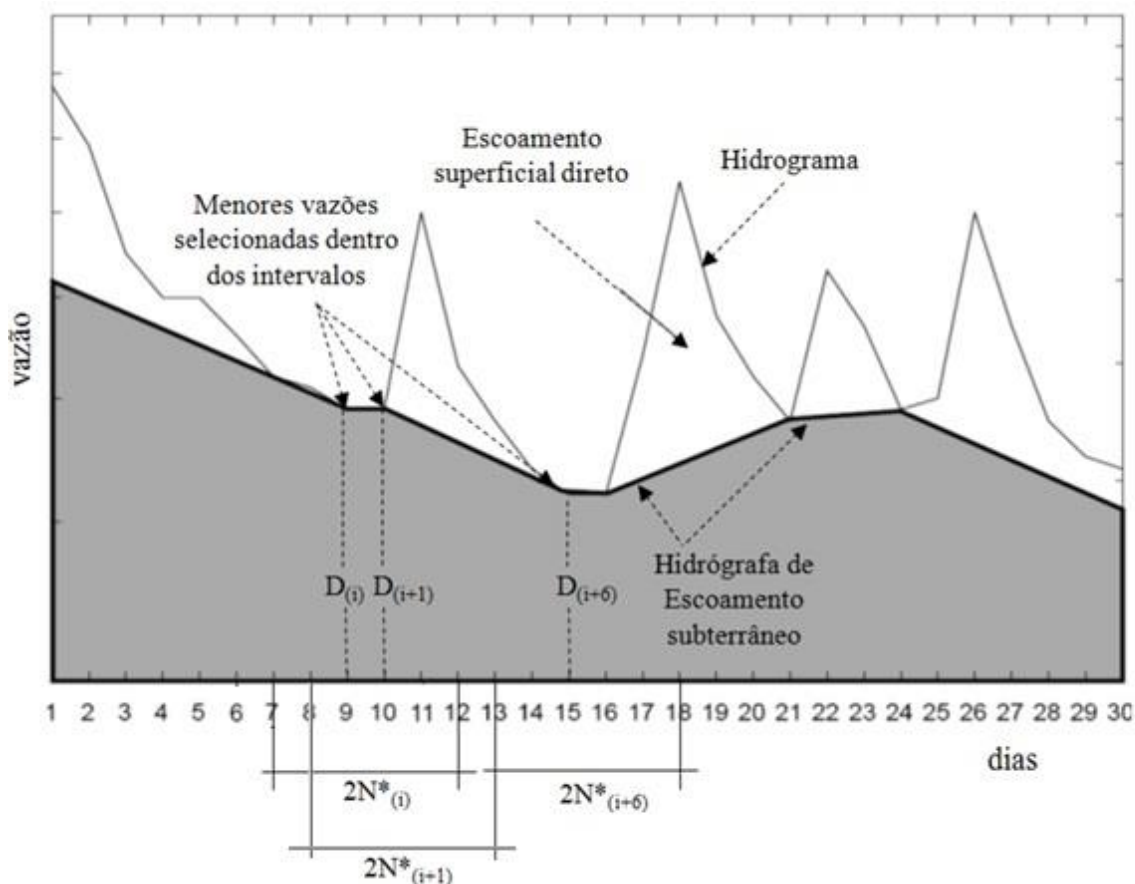


Figura 4.4. Separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo através do método do mínimo local (ML). Fonte: Miranda, 2012

No exemplo retratado pela Figura 4.4 os intervalos $2N^*$ são de cinco dias. O primeiro intervalo exibido ($2N^*_{(i)}$) coincide com o período entre os dias 7 e 12. O dia $D(i)$ deste intervalo representa o dia 9, no qual foi reconhecida a menor vazão dentro do período. Deste modo, esta vazão foi considerada um mínimo local. Na sequência, o intervalo foi deslocado para o próximo dia e passou a ser representado pelo intervalo ($2N^*_{(i+1)}$), que coincide com o período entre os dias 8 e 13. O dia $D(i+1)$ deste intervalo representa o dia 10, no qual foi verificada a menor vazão dentro do período. Por conseguinte, esta vazão foi considerada um outro mínimo local. À medida que os intervalos passam para os próximos dias - intervalos dos dias 9 a 14

($2N*(i+2)$), 10 a 15 ($2N*(i+3)$), 11 a 16 ($2N*(i+4)$) e 12 a 17 ($2N*(i+5)$), observa-se que as menores vazões não correspondem aos dias 11 ($D(i+2)$), 12 ($D(i+3)$), 13 ($D(i+4)$), e 14 ($D(i+5)$) destes intervalos. Em casos como esse, nenhum mínimo local é selecionado. Quando o intervalo passa a ser no período entre os dias 13 e 18 ($2N(i+6)$) a menor vazão corresponde ao dia 15 ($D(i+6)$) e, portanto, este valor é escolhido como um outro mínimo local. O mesmo procedimento é aplicado e repetido para cada dia da série de vazões até que todos os mínimos locais sejam selecionados. Desta forma, o comportamento do escoamento subterrâneo é caracterizado por linhas que relacionam os valores dos mínimos locais selecionados.

4.5. Quantificação dos escoamentos

Depois da separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, através do software BFI+ 3.0, foi possível estabelecer a quantificação do escoamento de base.

Segundo Miranda (2012) a quantificação dos volumes é feita da seguinte forma:

Quantificação dos volumes estimados para cada dia ($t_i \rightarrow t_{i+1}$):

$$V_{(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_{(i)} dt = \frac{(Q_{(i+1)} + Q_{(i)})}{2} * \Delta t \quad (4.6)$$

$$V_{ESub(i)} = \int_{t_1}^{t_{i+1}} Q_{ESub(i)} dt = \frac{(Q_{ESub(i+1)} + Q_{ESub(i)})}{2} * \Delta t \quad (4.7)$$

$$V_{ES(i)} = V_{(i)} - V_{ESub(i)} \quad (4.8)$$

Nas quais:

- $V_{(i)}$ é o volume do escoamento total no dia i , em m^3 ;
- $V_{ES(i)}$ é o volume do escoamento superficial no dia i , em m^3 ;
- $V_{ESub(i)}$ é o volume do escoamento subterrâneo no dia i , em m^3 ;
- $Q_{(i)}$ é a vazão do dia i , obtida da base de dados da estação fluviométrica, em m^3s^{-1} ;
- Δt é o intervalo de tempo diário, igual a 86400 segundos;
- $Q_{ESub(i)}$ é a vazão correspondente ao escoamento subterrâneo no dia i , obtido a partir da separação do hidrograma, em m^3s^{-1} .

Além disso, calculou-se também o volume do fluxo de base anual (V_{ESubA}), que corresponde à soma dos volumes de fluxo subterrâneo ao longo do ano hidrológico:

$$V_{ESubA} = \sum_{i=1}^{ud} V_{ESubA}$$

Onde: ud é o último dia do ano hidrológico.

4.6. Confeção do modelo geológico tridimensional

Nesta etapa do projeto, foi realizada a confecção do modelo geológico a partir da interpolação tridimensional dos poços tubulares com perfil geológico descritivo através do *software* de modelagem geológica Earth Volumetric Studio 2017.3 (EVS- C Tech Development Corporation). Para a geração do modelo geológico representativo da área de estudo, na interpolação supracitada, o método da krigagem foi utilizado.

A partir dos dados dos poços tubulares adquiridos no banco de dados do SIAGAS e da SABESP, elaborou-se uma planilha no Microsoft Excel que correlaciona as coordenadas dos poços, a litologia, a cota dos topos e bases das camadas e o número de identificação do poço. A tabela foi inserida no *software* de modelagem EVS e através da interpolação foi gerado um modelo geológico da área.

Vale lembrar que a planilha elaborada nesta etapa simplificou as descrições litológicas pertencentes aos dados dos poços tubulares obtidos, uma vez que a modelagem geológica é uma simplificação da área em questão, e, além disso, o *software* não conseguiria correlacionar um número grande de litotipos para a criação do modelo. Foram então definidos simplesmente em: solo, arenito, argilito e embasamento.

De forma a confirmar a veracidade do modelo geológico gerado, elaborou-se dois perfis com os dados litológicos das sondagens a fim de comparar os resultados da modelagem geológica. Os perfis foram confeccionados com base na localização dos poços, e também buscou-se abranger a maior parte da bacia.

Ademais, foram elaboradas duas seções geológicas com o objetivo de melhor visualizar a geologia da área e verificar as variações do modelo ao longo dos diferentes cortes.

4.7. Confeção do mapa de vazão específica

Para dar continuidade ao estudo, gerou-se um mapa de vazão específica dos poços. A vazão específica possibilita reconhecer a capacidade de recuperação de um aquífero em determinado ponto e, por conseguinte, estimar o valor máximo da vazão que pode ser aplicada a um determinado poço para que o bombeamento não comprometa o fluxo de base do aquífero.

Desta forma, elaborou-se um mapa no *software* ArcGis que associa as vazões específicas de cada poço, através do método de interpolação, mais especificamente pelo método “Topo to Raster”. O mapa foi confeccionado a partir de uma tabela que correlaciona as

coordenadas dos poços, seu número de identificação e sua vazão específica. Os dados de vazão específica foram obtidos do banco de dados do SIAGAS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização geológica local

Foram analisados 20 poços distribuídos pela área de estudo, com dados sobre litologia, vazão específica, nível estático, nível dinâmico, entre outros. 12 dos poços se encontram dentro dos limites da sub-bacia e 8 fora. A localização dos poços pode ser observada na Figura 5.1.

Os dados dos furos de sondagem mostraram um predomínio de material arenoso e argiloso, distribuídos de maneira heterogênea pela área da bacia. Os próprios órgãos responsáveis pela coleta de dados (SIAGAS e SABESP) identificam que as formações geológicas presentes são o Grupo Taubaté (Formações Resende, Tremembé e São Paulo) e alguns poços alcançaram as rochas ígneas e metamórficas do embasamento representado pelo Complexo Embu, além da ocasional presença de solo no topo dos furos.

A fim de visualizar a distribuição dos litotipos ao longo da bacia, os poços foram alinhados com base em duas seções NE-SW (Figura 5.2), uma traçada mais ao norte da área e outra ao centro.

Pode se observar uma frequente intercalação de arenitos e argilitos em ambas as seções, assim como a presença em menor quantidade de siltitos. É nítido o contraste litológico da região norte e noroeste com a região central e sul da bacia. Há uma abundância de material arenoso na porção central com relação ao material argiloso, enquanto que essa relação tende a se inverter quando se observa a porção norte.

A diferença litológica presente na bacia já é um indício de áreas com maior e menor potencial hídrico. A análise das descrições litológicas dos poços permite observar a presença de níveis arenosos limitados no topo e base por camadas compostas por sedimentos finos, indicando uma configuração usual de camadas reservatórios, que remetem a possibilidade de alvos exploratórios, e camadas selantes.

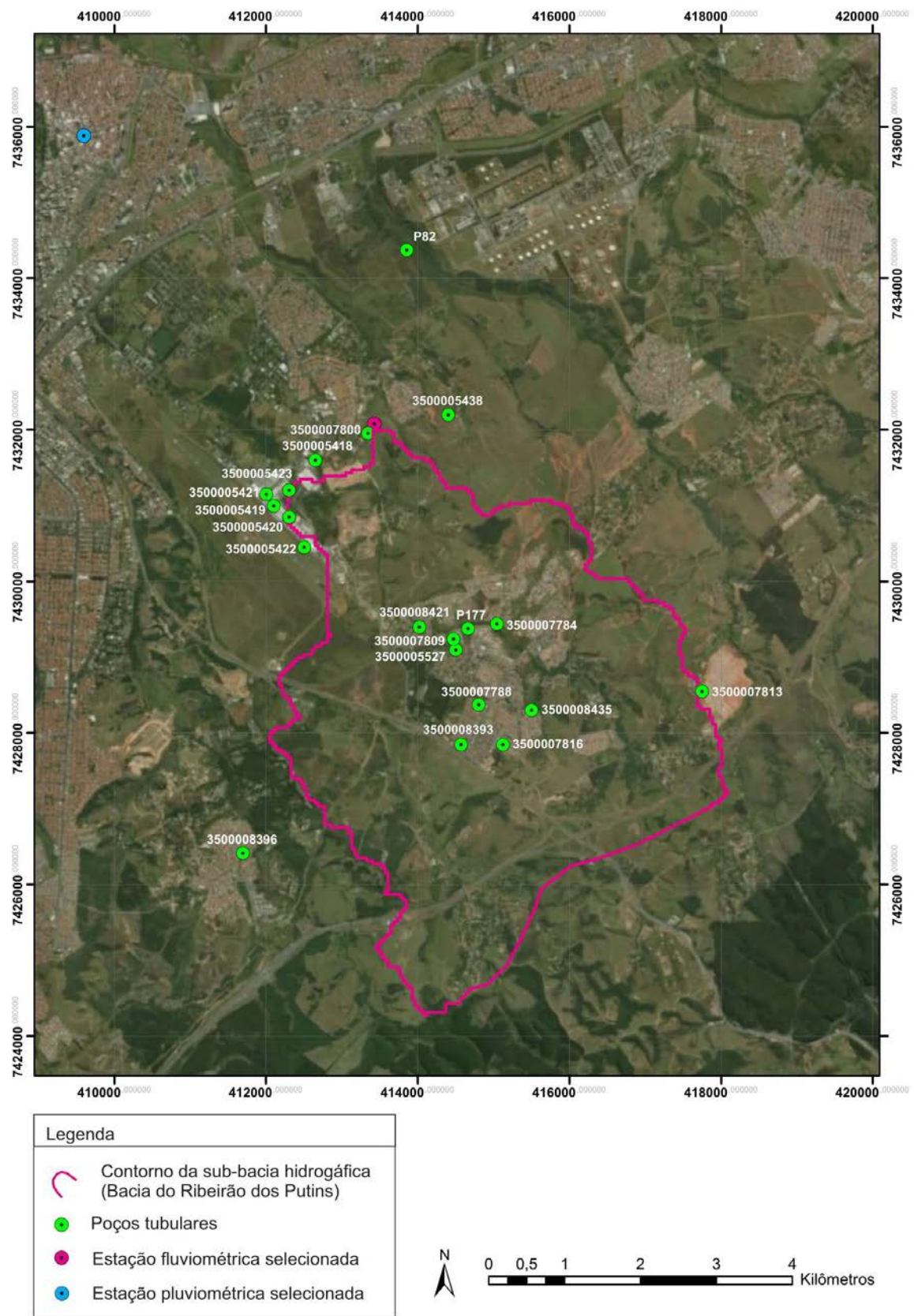


Figura 5.1. Localização dos poços do SIAGAS e SABESP e área da sub bacia. Imagem da autora.

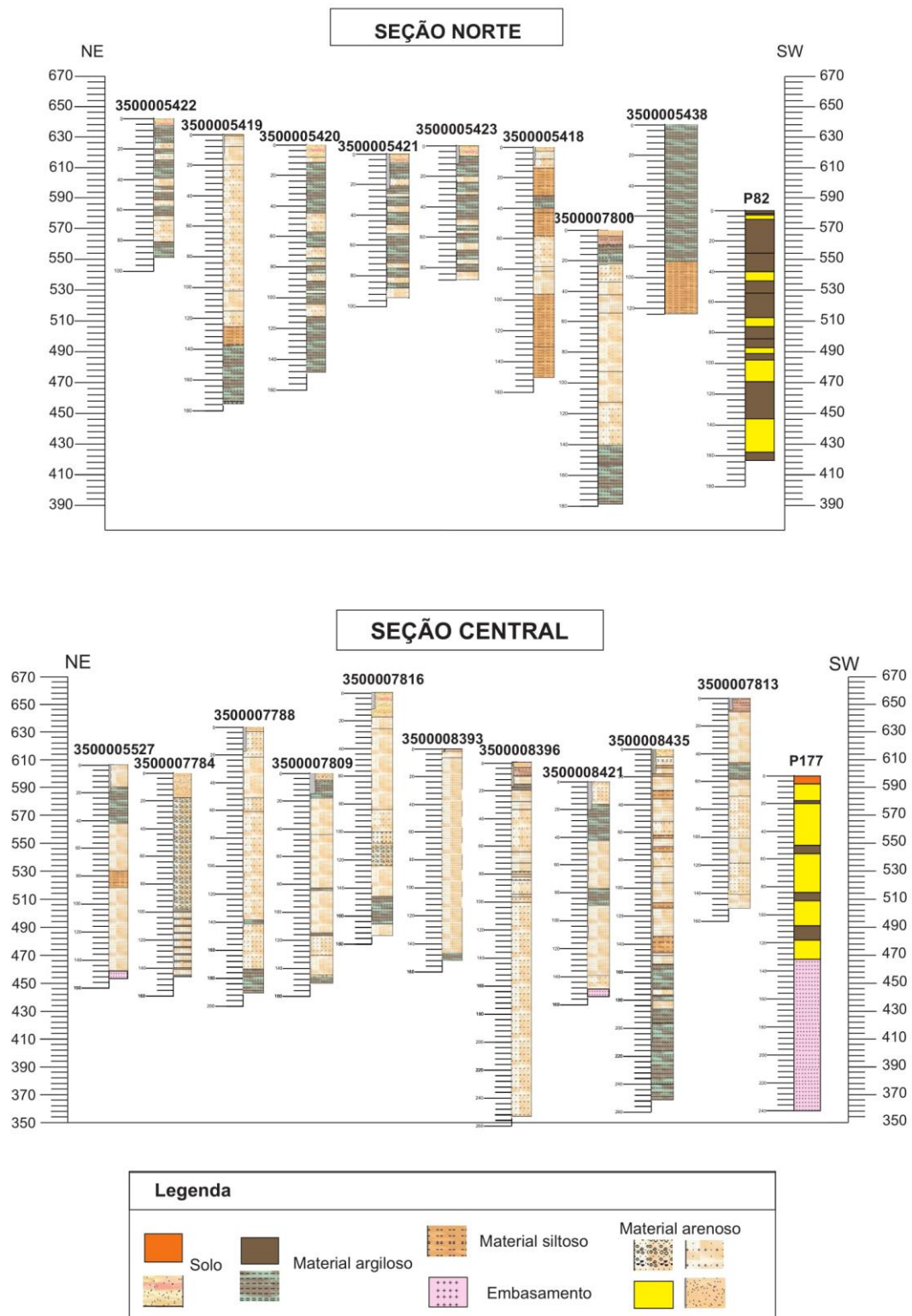


Figura 5.2. Secções norte e central elaboradas com dados litológicos dos poços da área. Imagem da autora.

5.2. Modelagem geológica

Com as informações obtidas e com geologia da área melhor visualizada pelas seções de furos de sondagem, confeccionou-se um modelo geológico tridimensional (Figura 5.3) no *software* EVS, a partir dos dados dos 20 poços tubulares. O método da krigagem aplicado na realização do modelo resultou na criação de 27 camadas.

O modelo geológico foi elaborado afim de melhor visualizar espacialmente os compartimentos de maior e menor porosidade, representados por materiais arenosos e argilosos.

A modelagem permitiu, então, identificar as zonas arenosas e argilosas assim como sua variação ao longo da profundidade e lateralidade. Reconheceu-se uma intercalação heterogênea de ambos os tipos de materiais, porém destaca-se um predomínio de material arenoso sobre o material argiloso na porção central e sudeste da bacia. O inverso ocorre na região norte e noroeste da bacia.

O material arenoso, assim como simplificado para a modelagem, corresponde à arenitos muito finos, finos, médios, grossos e muito grossos, variando entre mal e bem selecionados, comumente compostos por feldspatos; conglomerados com grãos que variam de seixo a calhau com matriz argilosa e; material friável.

O material simplificado simplesmente como material argiloso, engloba argilitos cinzas, esverdeados, marrons e também siltitos, ambos predominantemente de composição quartzosa.

É importante ressaltar a importância de se ter um conhecimento geológico prévio da área em que está sendo aplicada a modelagem, afim de conferir a fidedignidade do modelo geológico obtido. De maneira geral, o modelo geológico apresenta a geologia esperada para a área a partir da análise dos furos de sondagem disponíveis.

Para melhor checar a confiabilidade do modelo, foram elaboradas duas seções transversais que cortam a área e passam por poços com dados litológicos. As duas seções (Figuras 5.4), ambas de direção NW-SE, verificam os dados dos poços com as informações do modelo geológico.

Complementando as análises dos furos de sondagem, o modelo geológico também indica zonas de maior e menor potencial para a exploração de água subterrânea. Poços perfurados na porção sudeste e central, mais arenosa, tem mais chances de terem boas vazões e boas taxas de recuperação, quando comparado ao das áreas mais argilosas.

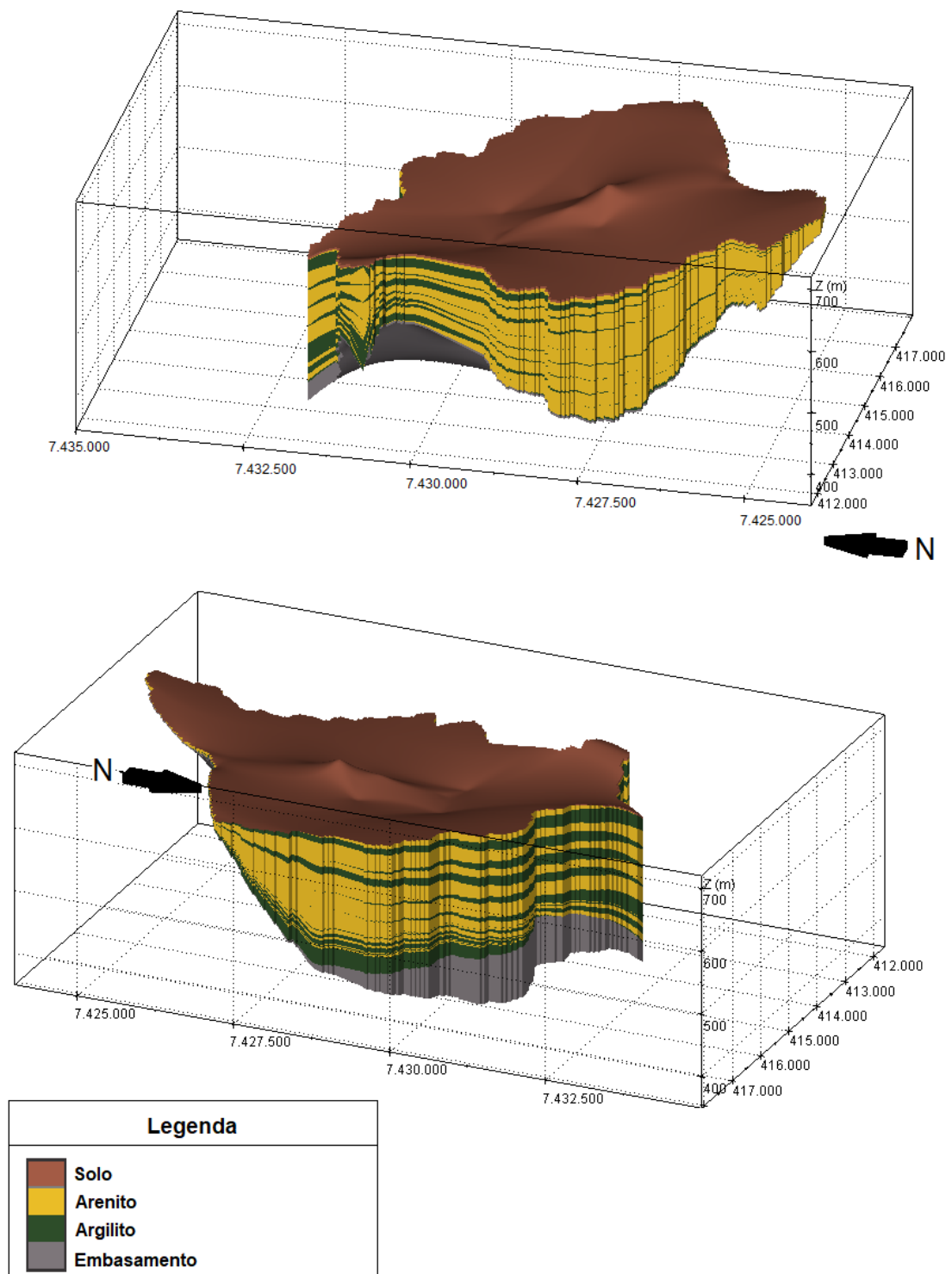


Figura 5.3. Modelo geológico tridimensional elaborado no software EVS, visto de diferentes ângulos. Imagem da autora.

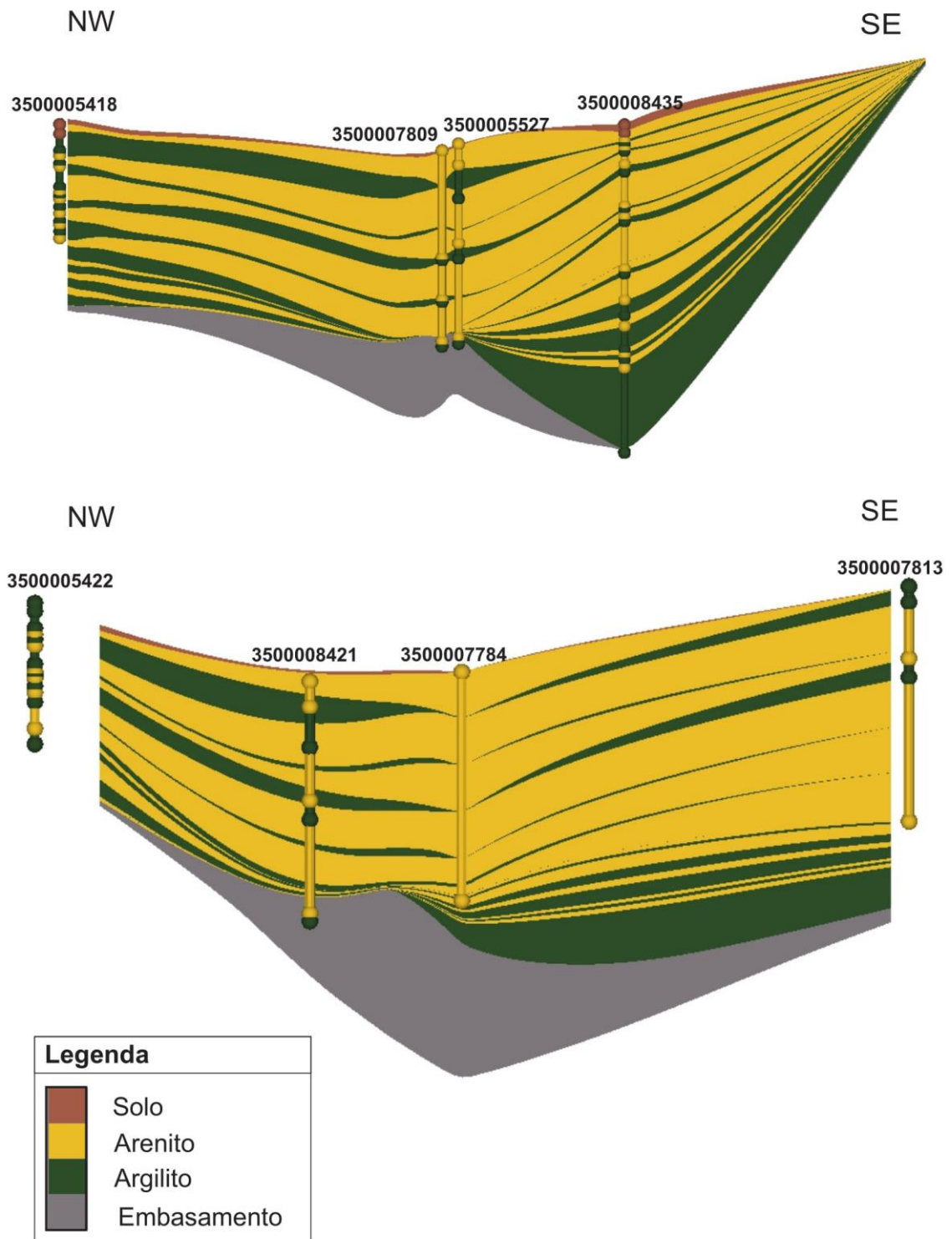


Figura 5.4. Seções transversais do modelo geológico e poços tubulares presentes. Imagem da autora.

5.3. Análise hidrológica

Para uma boa gestão dos recursos hídricos de uma região é necessário entender o comportamento das águas subterrâneas, e a relação entre águas superficiais e subterrâneas. A análise hidrológica de séries históricas, a partir de dados disponíveis de estações pluviométricas e fluviométricas, permitiu fazer inferências sobre como as águas superficiais e subterrâneas se comportam na bacia, e são abordadas a seguir.

5.3.1. Análise pluviométrica

Para a verificação da precipitação média na bacia foram compilados dados de estações pluviométricas nas proximidades da sub-bacia, porém muitas apresentavam muitos erros nos dados ou não apresentavam dados para o período condizente com o período de coleta de dados da estação fluviométrica selecionada.

A estação pluviométrica de código 2345019 apresenta dados desde 1942 até 2003, com dados consistidos de maneira relativamente contínua, principalmente para o período de 1960 a 1978 (período da estação fluviométrica). Por isso, essa estação foi adotada como representativa para a área da bacia hidrográfica.

Os dados de pluviosidade médias mensais e anuais são mostrados na Tabela 5.1. A pluviosidade média anual é de 1263,29 mm, e seus meses mais chuvosos (janeiro, fevereiro e dezembro) com médias entre 170 e 220 mm, enquanto que os meses mais secos (junho, julho e agosto) apresentam médias entre 30 e 45 mm.

Tabela 5.1. Precipitação média mensal e anual para a estação pluviométrica 2345019.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Precipitação (mm)	219,95	191,12	156,94	74,75	57,53	42,72	31,78	33,97	71,92	113,76	124,18	173,60	1263,29

Criado pela autora.

As médias pluviométricas são condizentes com as propostas na literatura. Soares *et al.* (2008) afirmam que os índices de precipitação variam entre 1200 e 1300 mm/ano na região do vale do rio Paraíba do Sul. Para Marengo e Alves (2005) o período de verão tem uma

precipitação acumulada de 200 e 250 mm ao mês, enquanto que os meses de inverno têm precipitação acumulada inferior a 50 mm ao mês.

5.3.2. *Análise fluviométrica*

As vazões foram analisadas com base nos dados disponíveis na estação fluviométrica escolhida, de código 58146000, localizada no Ribeirão dos Putins. Infelizmente a estação não possui dados de vazões diárias, porém apresenta dados de cotas diárias e dados das vazões de alguns dias ao longo da série histórica. A partir disso usou-se o conceito de curva chave, que relaciona as cotas de um curso d'água com sua vazão, para obter as vazões médias diárias.

5.3.2.1. Curva chave

Para o cálculo das vazões diárias foi utilizada a equação da curva chave, que associa cota e vazão de um rio. Os parâmetros a , b e H_0 da equação foram obtidos por tentativa e erro, através da ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*.

A primeira curva chave estabelecida não atendeu as expectativas, apresentando valores da soma dos quadrados dos desvios muito elevados. Portanto, foram confeccionadas duas curvas chaves, com duas diferentes equações, uma contemplando o período entre 1960 e 1975 da estação fluviométrica e outra, o período entre 1976 e 1978. A curva chave para o período de 1960 a 1975 (Figura 5.5) apresentou valores para o parâmetro “ a ” de 0,4446, o parâmetro “ b ” de 2,4664 e para o valor de H_0 de 0,0549.

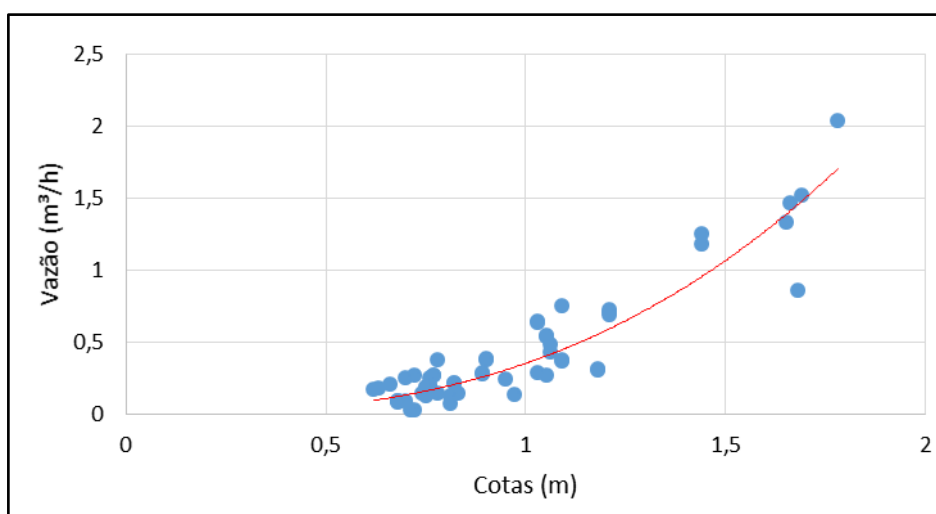


Figura 5.5. Curva chave para o período de 1960 a 1975. Imagem da autora.

No entanto, a curva chave para o período de 1976 a 1978 (Figura 5.6) mostrou valores para o parâmetro “a” de 2,5488, o parâmetro “b” de 1,9568 e para o valor de H_0 de 0,1154.

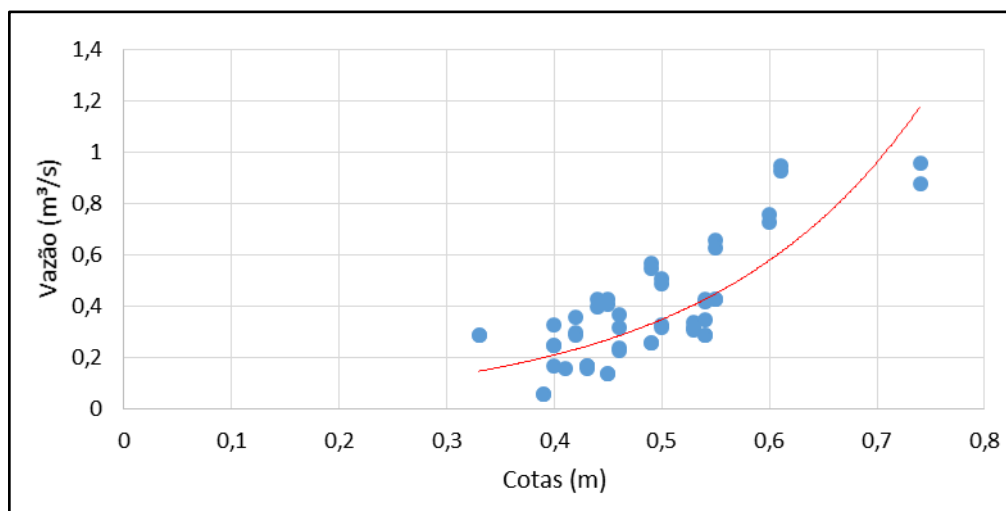


Figura 5.6. Curva chave para o período de 1976 a 1978. Imagem da autora.

5.3.2.2. Hidrograma

Depois de obtidas as equações da curva chave e seus parâmetros de ajuste, foi possível calcular o valor das vazões diárias (Figura 5.7).

O gráfico das vazões diárias permite visualizar picos de vazão durante os períodos de fim e início de cada ano, muitas vezes atingindo valores entre 4 e 6 m³/s, com um pico muito elevado no início do ano de 1976, alcançando mais que 16 m³/s.

O escoamento total condiz com os dados de pluviosidade, uma vez que ele é maior nos períodos onde ocorrem chuvas mais intensas, como nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro.

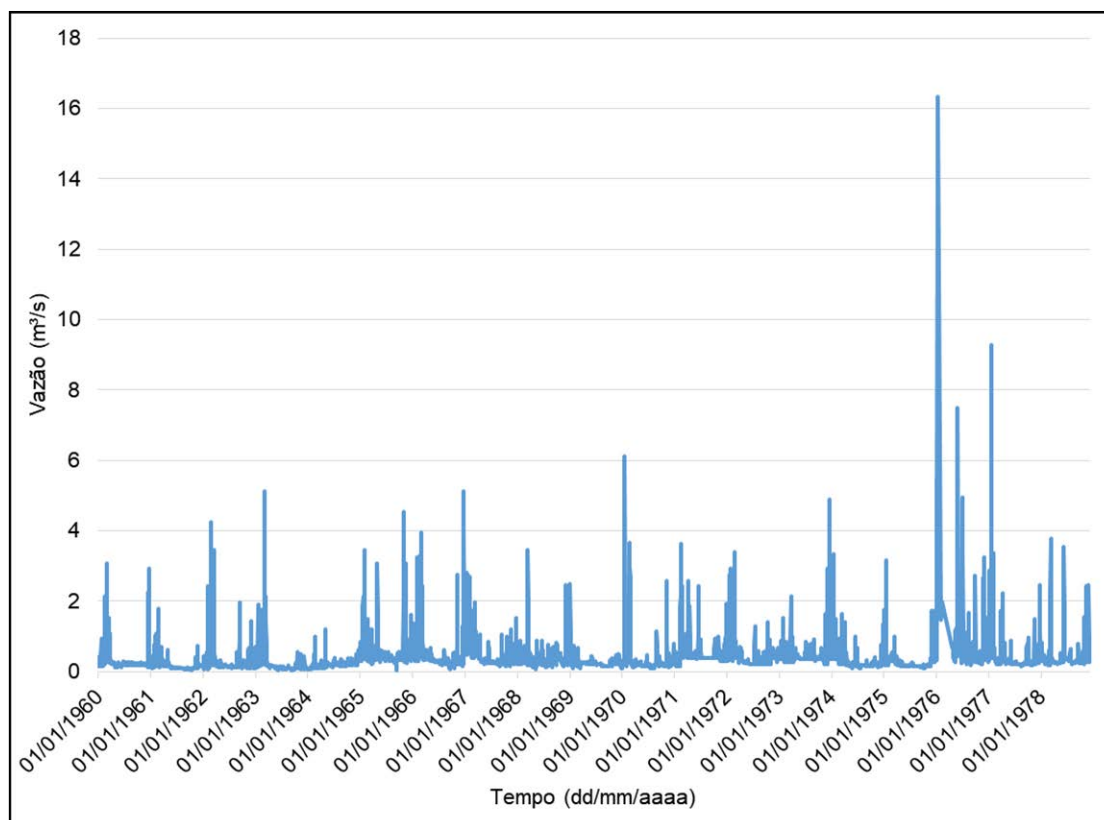


Figura 5.7. Séries históricas das vazões diárias (m^3/s) da estação analisada. Imagem da autora.

5.3.3. Separação do fluxo de base

É de fundamental importância a realização da separação do fluxo de base do escoamento superficial para saber a influência das águas subterrâneas sobre um curso d'água. Como já abordado em capítulos anteriores, existem diversas maneiras de fazer a separação dos escoamentos. Neste trabalho, foram utilizados os métodos de separação por filtros digitais.

Dos métodos de filtros digitais existentes, três foram escolhidos para ser efetuados nesse estudo: o método dos Intervalos Fixos (IF), o método dos Intervalos Móveis (IM) e o método dos Mínimos Locais (ML). Todos os métodos foram realizados no *software* BFI 3.0+. Desta forma, foi possível reconhecer as oscilações nas estimativas de fluxo de base e escoamento superficial ao longo de toda a série histórica e também nos meses de cada ano.

Para todos os três métodos, se faz necessário o cálculo do valor de $2N^*$ dias (PETTYJOHN e HENNING, 1979) que será utilizado como intervalo de dias para os cálculos do fluxo de base. O valor de $2N^*$ corresponde ao número inteiro imediatamente superior ao dobro de N (LINSLEY *et al.*, 1982), que é estimado através de uma equação que relaciona N e

a área de drenagem. O N calculado para bacia foi de 1,59, portanto o valor de $2N^*$ utilizado na aplicação dos filtros digitais foi de 4.

O gráfico do fluxo de base calculado pelo método dos Intervalos Fixos (IF), para o ano de 1961, pode ser visto na Figura 5.8.

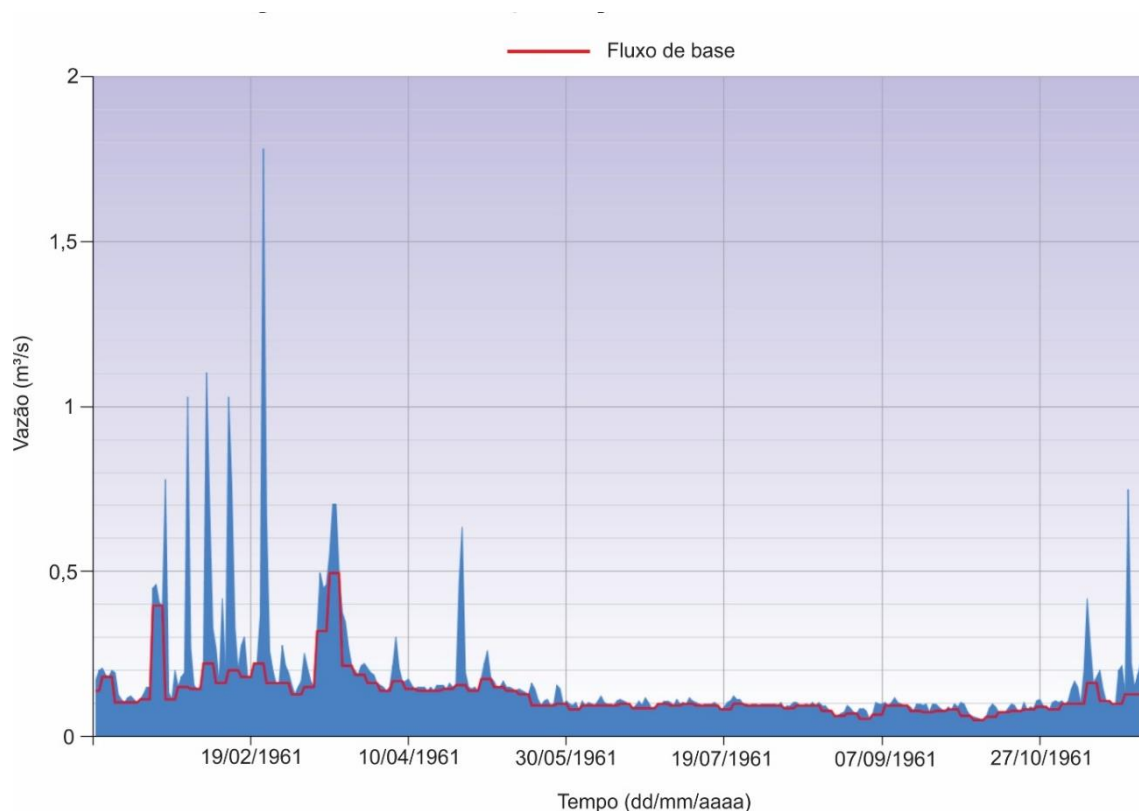


Figura 5.8. Hidrograma com separação do fluxo de base pelo método dos intervalos fixos (IF) para o ano de 1961. Elaborado no *software* BFI 3.0+.

Nota-se que, de acordo com o resultado da aplicação do método IF, o fluxo de base sofre forte influência do aumento da vazão, o que não reflete corretamente o comportamento natural conhecido.

O mesmo foi reproduzido, porém desta vez aplicando o método dos Intervalos Móveis (IM), e o resultado obtido pode ser observado na Figura 5.9.

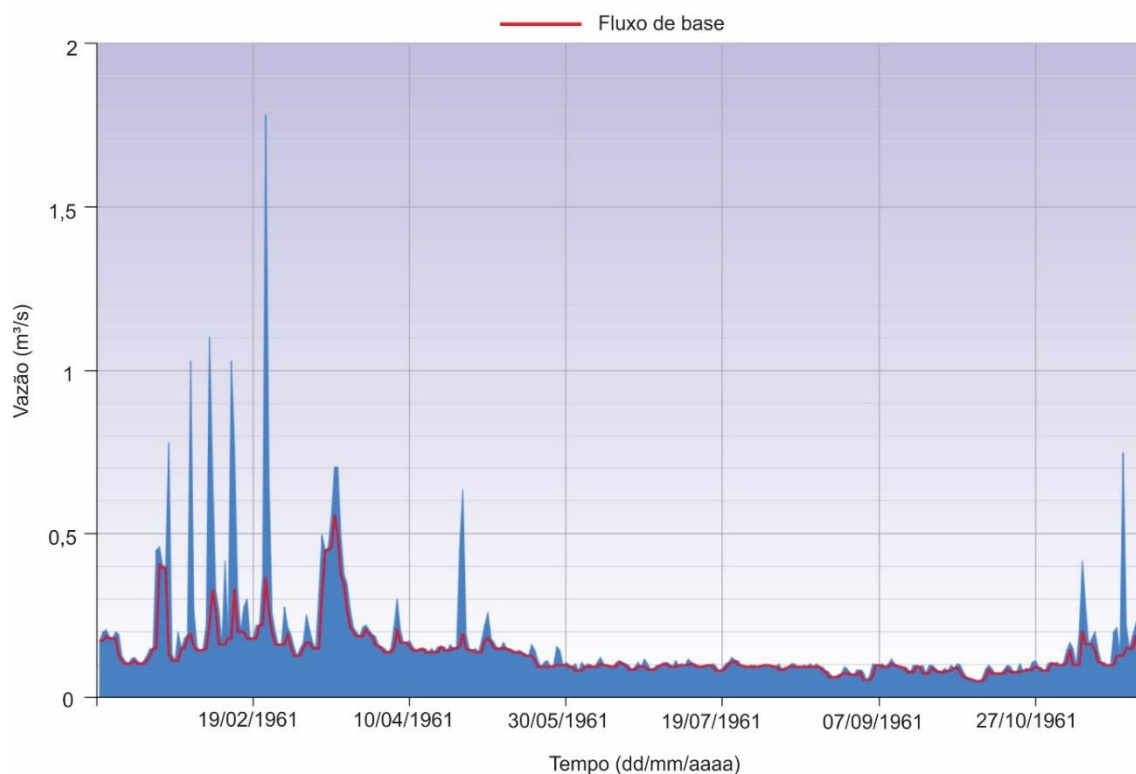


Figura 5.9. Hidrograma com separação do fluxo de base pelo método dos Intervalos Móveis (IM) para o ano de 1961. Elaborado no software BFI 3.0+. Elaborado no *software* BFI 3.0+.

Da mesma maneira como ocorre no método IF, o fluxo de base gerado pelo método IM também sofre grande influência das altas vazões, acompanhando-as, também não refletindo o comportamento natural dos sistemas aquíferos.

Na sequência, elaborou-se outro gráfico do fluxo de base para o ano de 1961, desta vez, a partir do método dos Mínimos Locais (ML). O resultado é exibido na Figura 5.10.

Ao analisar o gráfico da Figura 5.10 percebe-se que o método dos Mínimos Locais é o que melhor reflete o comportamento dos sistemas aquíferos, pois é o que mais se aproxima de um fluxo de base ideal. Isso porque reflete uma aproximação estável que pouco oscila e não sofre grandes alterações em picos de vazão do rio relacionados aos eventos de altas precipitações.

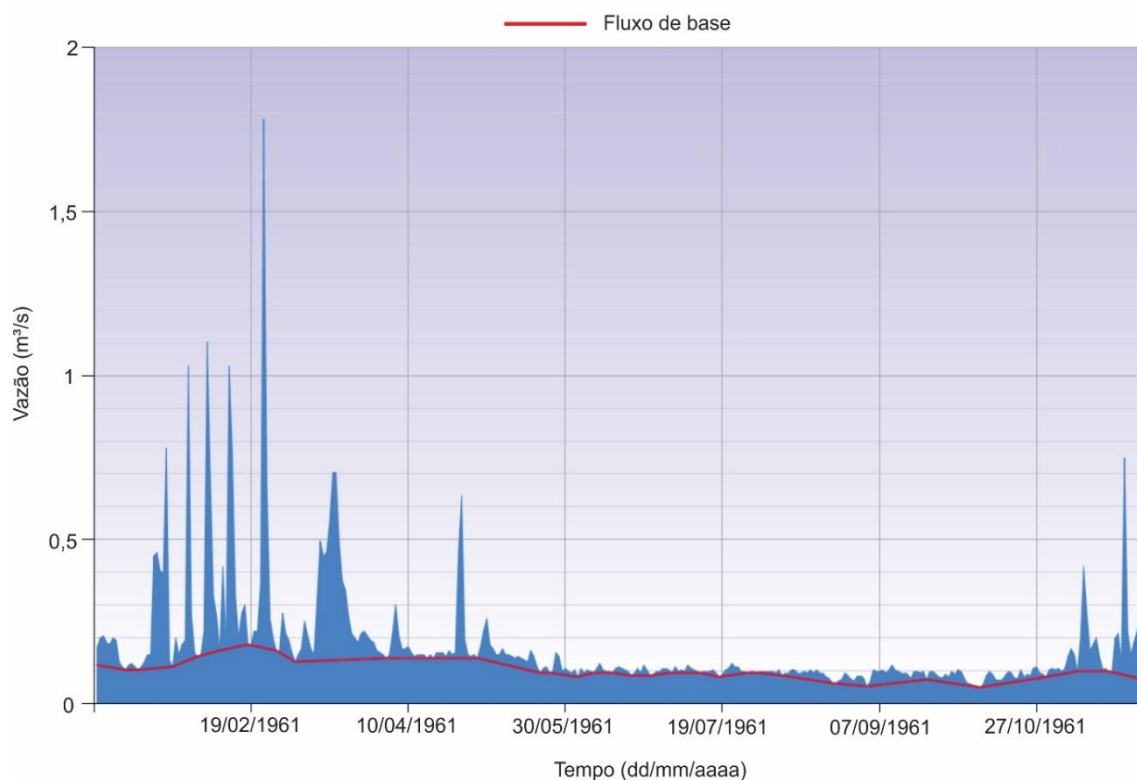


Figura 5.10. Hidrograma com separação do fluxo de base pelo método dos Mínimos Locais (ML) para o ano de 1961. Elaborado no software BFI 3.0+. Elaborado no *software* BFI 3.0+.

A Tabela 5.2 compila os dados de precipitação total média na sub-bacia nos 12 meses do ano e a média total anual. Além disso, a tabela agrupa os valores de N calculados, as médias mensais das estimativas de fluxo de base e escoamento superficial pelos diferentes métodos de filtros digitais, a média anual desses escoamentos, a relação entre os escoamentos e a pluviometria média da bacia, e a razão entre os escoamentos (superficial e subterrâneo) e o escoamento total da bacia.

O aporte do fluxo de base para a manutenção natural da vazão dos rios é demonstrado pela razão entre escoamento subterrâneo e o escoamento total. Segundo os dados apresentados na Tabela 5.2, o fluxo de base corresponde à principal componente da vazão do Ribeirão dos Putins, contribuindo com 56,53% a 74,77%.

De modo geral, a sub-bacia apresenta um regime hidrológico bem definido, com verões chuvosos e invernos secos. Desta forma, é possível verificar que o fluxo de base age como o principal responsável pela manutenção da vazão dos rios em épocas de estiagem.

Tabela 5.2. Valores de precipitação média mensal e anual, fluxo de base e escoamento superficial pelos diferentes métodos de filtros digitais aplicados.

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual		
Precipitação total média (mm)		219,95	191,12	156,94	74,75	57,53	42,72	31,78	33,97	71,92	113,76	124,18	173,60	1263,29	% Esc / P	% Esc / Esc. total
Método	Tipo de Escoamento	N = 1,59 2N* = 4														
Intervalos Fixos	Fluxo de base (mm)	43,07	41,29	32,69	26,84	24,52	24,52	22,63	21,93	21,96	22,93	23,71	30,04	336,13	26,61	69,65
	Esc. Superf. (mm)	46,06	22,65	14,31	7,53	5,04	5,25	3,29	3,05	4,93	6,57	12,08	15,70	146,46	11,59	30,35
Intervalos Móveis	Fluxo de base (mm)	51,60	45,85	34,16	28,09	25,27	25,36	23,21	22,62	22,74	24,32	25,79	31,84	360,84	28,56	74,77
	Esc. Superf. (mm)	37,54	18,09	12,84	6,27	4,29	4,41	2,71	2,36	4,16	5,18	10,00	13,90	121,76	9,64	25,23
Mínimos Locais	Fluxo de base (mm)	27,20	32,87	24,15	24,07	21,75	21,32	20,53	19,30	18,31	20,00	20,31	22,97	272,80	21,59	56,53
	Esc. Superf. (mm)	61,93	31,07	22,85	10,30	7,81	8,45	5,39	5,67	8,58	9,50	15,48	22,77	209,80	16,61	43,47

Elaborado pela autora.

A Figura 5.11 mostra as estimativas anuais dos escoamentos superficial e subterrâneo calculados pelos métodos IF, IM e ML para a sub-bacia do Ribeirão dos Putins. Comparativamente, o método que mais difere é o dos Mínimos Locais, uma vez que superestima o escoamento superficial em relação aos demais métodos. Os métodos de Intervalos Móveis e Intervalos Fixos apresentam estimativas mais próximas, sendo o método IM o que mais superestima o escoamento de base.

A Figura 5.12 exibe em detalhe as estimativas de escoamento de base para cada método utilizado. É possível observar nitidamente a diferença entre os métodos Intervalos Fixos e Intervalos Móveis em relação aos Mínimos Locais. Apesar de os métodos IF e IM terem estimativas de fluxo de base semelhantes, 69,65% e 74,77% respectivamente, é possível analisar uma discrepância na distribuição das vazões, sendo o Intervalo Fixo ligeiramente mais suavizado. Com isso, o gráfico retifica a melhor representatividade do método dos Mínimos Locais no que tange o cálculo das estimativas de fluxo de base.

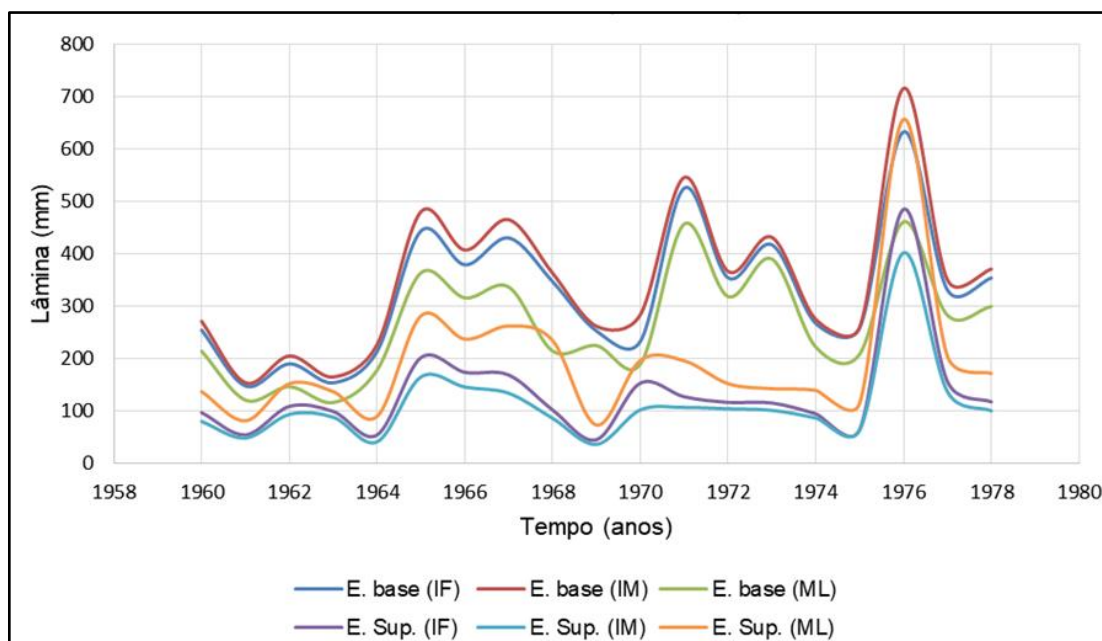


Figura 5.11. Estimativas anuais dos escoamentos superficial e de base pelos três métodos (IF, IM, ML).

Elaborado pela autora.

As curvas de variação do fluxo de base calculado na estação fluviométrica do Ribeirão do Putins através dos três métodos aplicados, exibem uma tendência geral de aumento das lâminas de escoamento subterrâneo no período analisado (Figura 5.13).

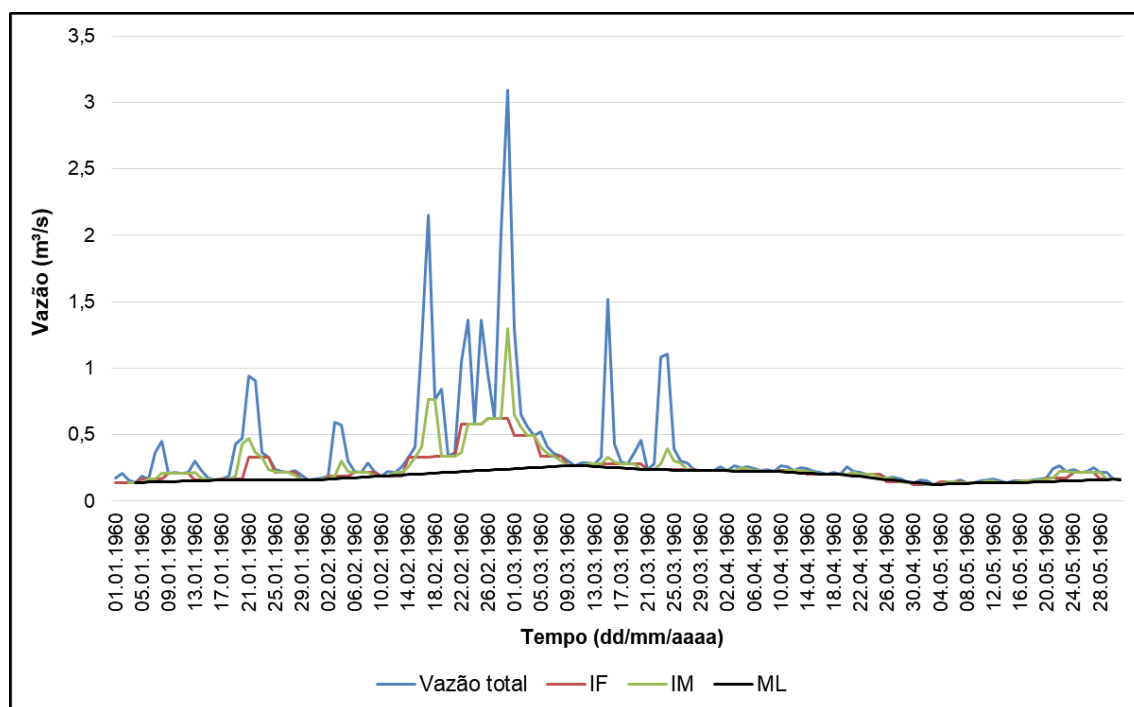


Figura 5.12. Comparação dos fluxos de base calculados pelos diferentes métodos aplicados. Elaborado pela autora.

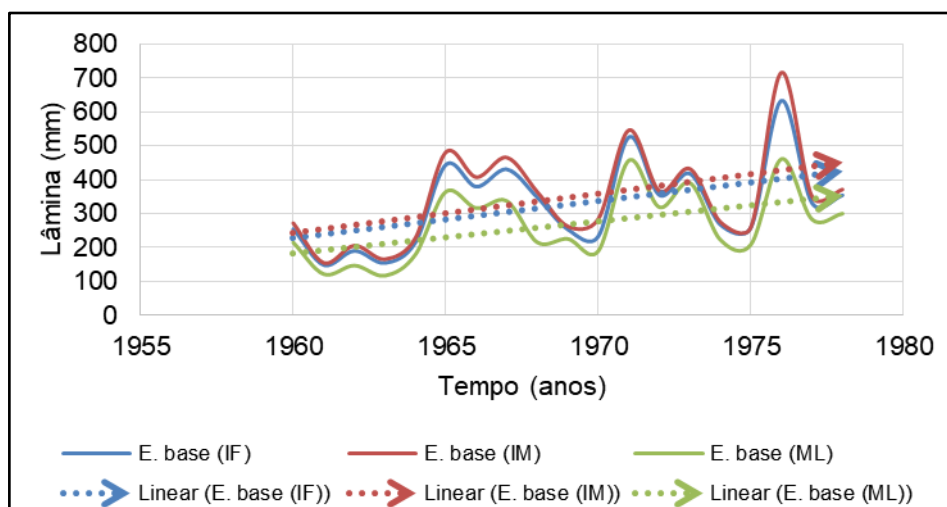


Figura 5.13. Tendência do escoamento de base nos diferentes métodos de filtros digitais. Elaborado pela autora.

Para verificar se o aumento do fluxo de base ao longo dos anos sofre influência da variação climática da região, foram analisados os dados de pluviometria da estação pluviométrica escolhida. A linha de tendência apresenta uma ligeira queda ao longo da série histórica (Figura 5.14). Entretanto, observa-se que no período entre 1960 e 1980, intervalo que contempla os dados de estimativa do fluxo de base, a variação da pluviosidade é mínima, de forma que pode ser considerada praticamente constante no período (Figura 5.15).

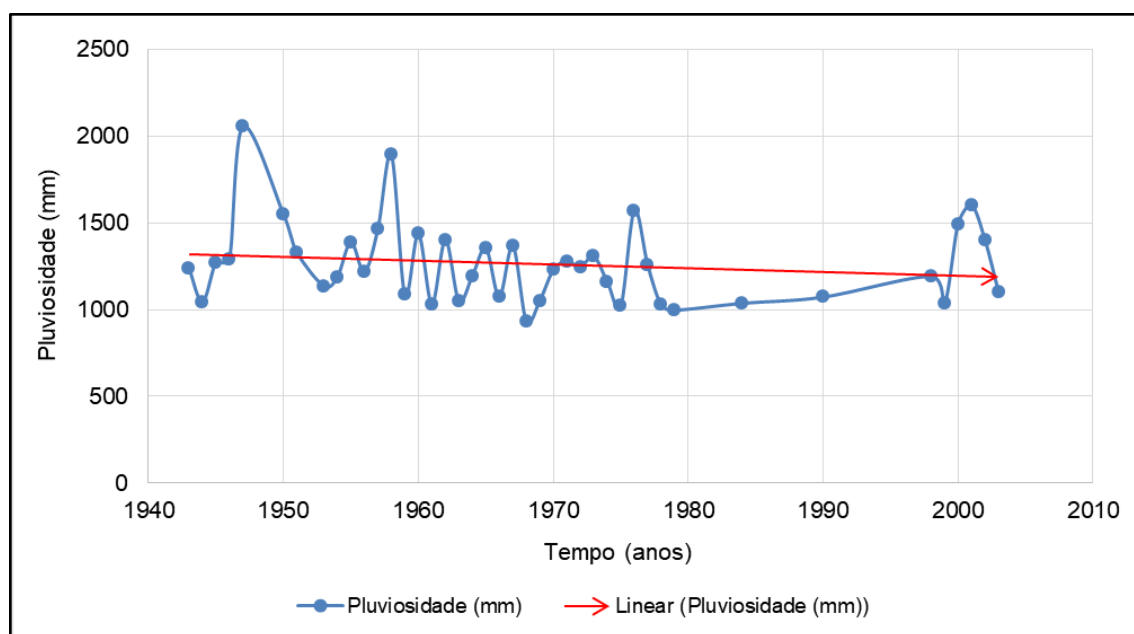


Figura 5.14. Pluviosidade média anual e linha de tendência. Elaborado pela autora.

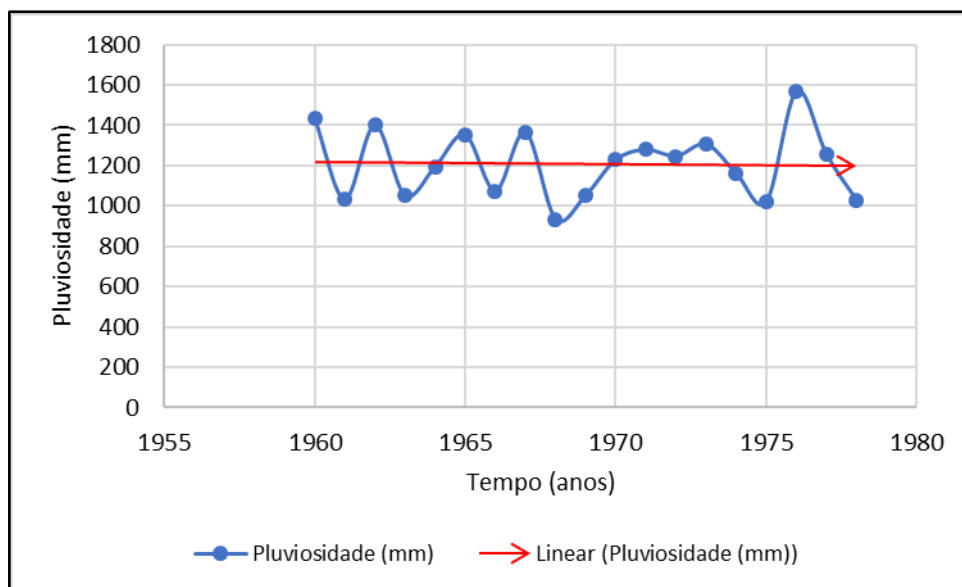


Figura 5.15. Pluviosidade média anual e linha de tendência para o período de 1960 a 1978. Elaborado pela autora.

Observa-se que no período entre 1960 e 1980, intervalo que contempla os dados de estimativa do fluxo de base, a variação da pluviosidade é mínima, de forma que pode ser considerada praticamente constante no período.

Deste modo, estima-se que o aumento do fluxo de base expressado na Figura 5.13 não é reflexo da variação da precipitação. Esse aumento, portanto, pode ser explicado pelas incertezas na aproximação dos valores dos parâmetros de ajuste das curvas chaves construídas, uma vez que o fluxo de base está diretamente relacionado a vazão do rio. A estimativa dos valores de “a”, “b” e “ H_0 ” podem ter resultado em distorções nos valores de vazão encontrados para o ribeirão, sobretudo no que diz respeito a curva chave do período de 1975 a 1978, na qual a vazão se mostra significativamente maior em relação aos demais anos.

5.4. Análise da vazão específica

Os dados relacionados à vazão específica dos poços perfurados na área de estudo, que foram obtidos nos bancos de dados da SABESP e SIAGAS, foram organizados numa tabela (Tabela 5.3) e tratados no *software* ArcGis através da interpolação pelo método “Topo to Raster”, a fim de se obter o mapa interpolado de vazões específicas (Figura 5.16), no qual considerou-se tanto os poços dentro quanto os poços fora da área de estudo.

Tabela 5.3. Relação entre os poços da área e suas respectivas vazões específicas.

Identificação do poço	Vazão específica (m³/h/m)
3500005418	0,35
3500005419	0,52
3500005420	1,32
3500005421	0,21
3500005422	0,18
3500005423	0,23
3500005438	indisponível
3500005527	1,15
3500007784	8,85
3500007788	0,25
3500007800	1,25
3500007809	1,47
3500007813	6,36
3500007816	2,44
3500008393	3,276
3500008396	2,245
3500008421	1,149
3500008435	2,933
P82	indisponível
P177	indisponível

Elaborado pela autora.

Observa-se que a região noroeste do mapa possui os menores valores de vazão específica, enquanto as regiões leste e nordeste apresentam os maiores valores de vazão específica.

A fim de correlacionar a geologia da área com a vazão específica dos poços de modo a entender a influência da primeira sobre a segunda, elaborou-se duas seções geológicas AA' e BB' (Figura 5.17) localizadas no mapa da Figura 5.16.

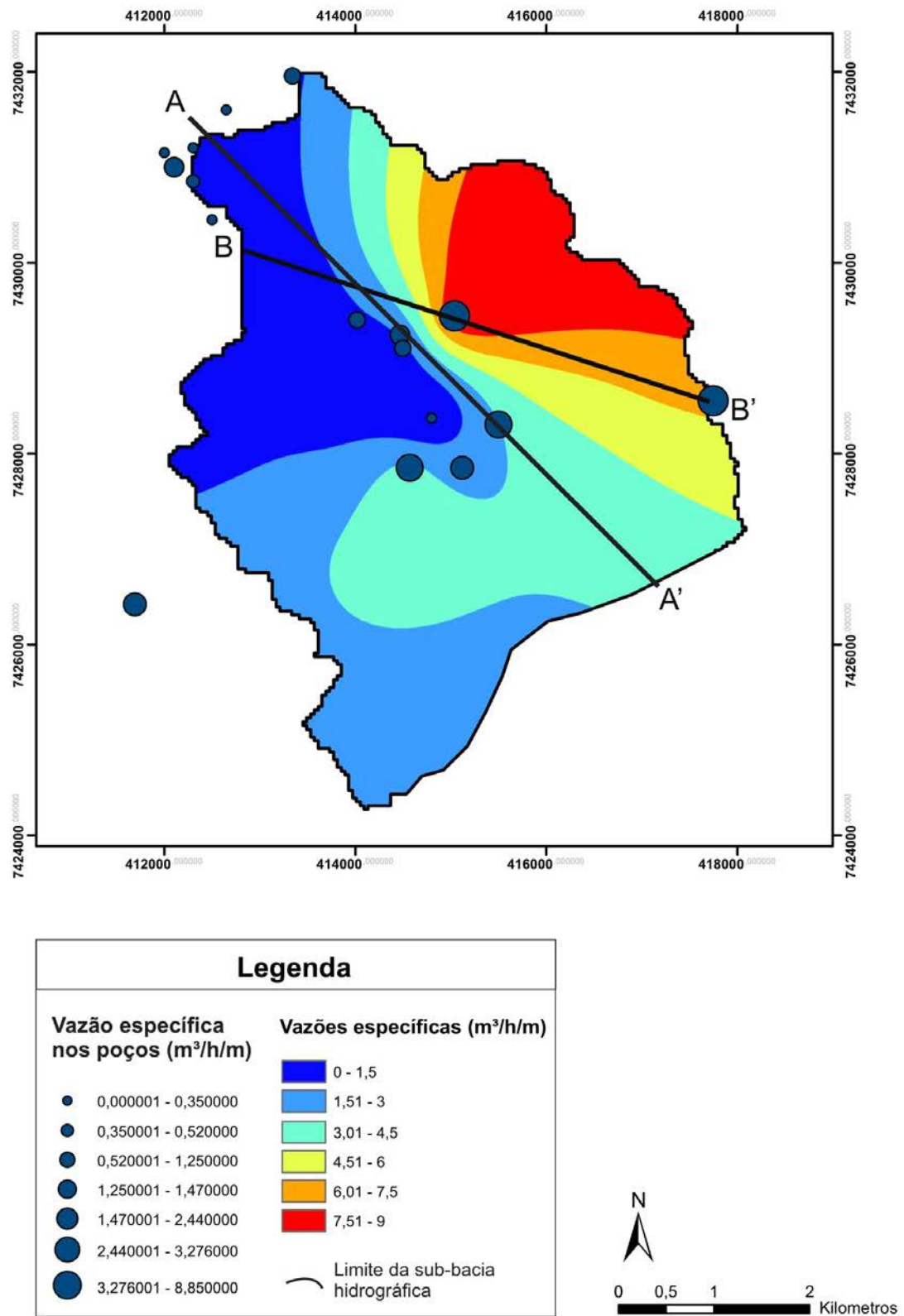


Figura 5.16. Mapa de vazões específicas. Elaborado pela autora.

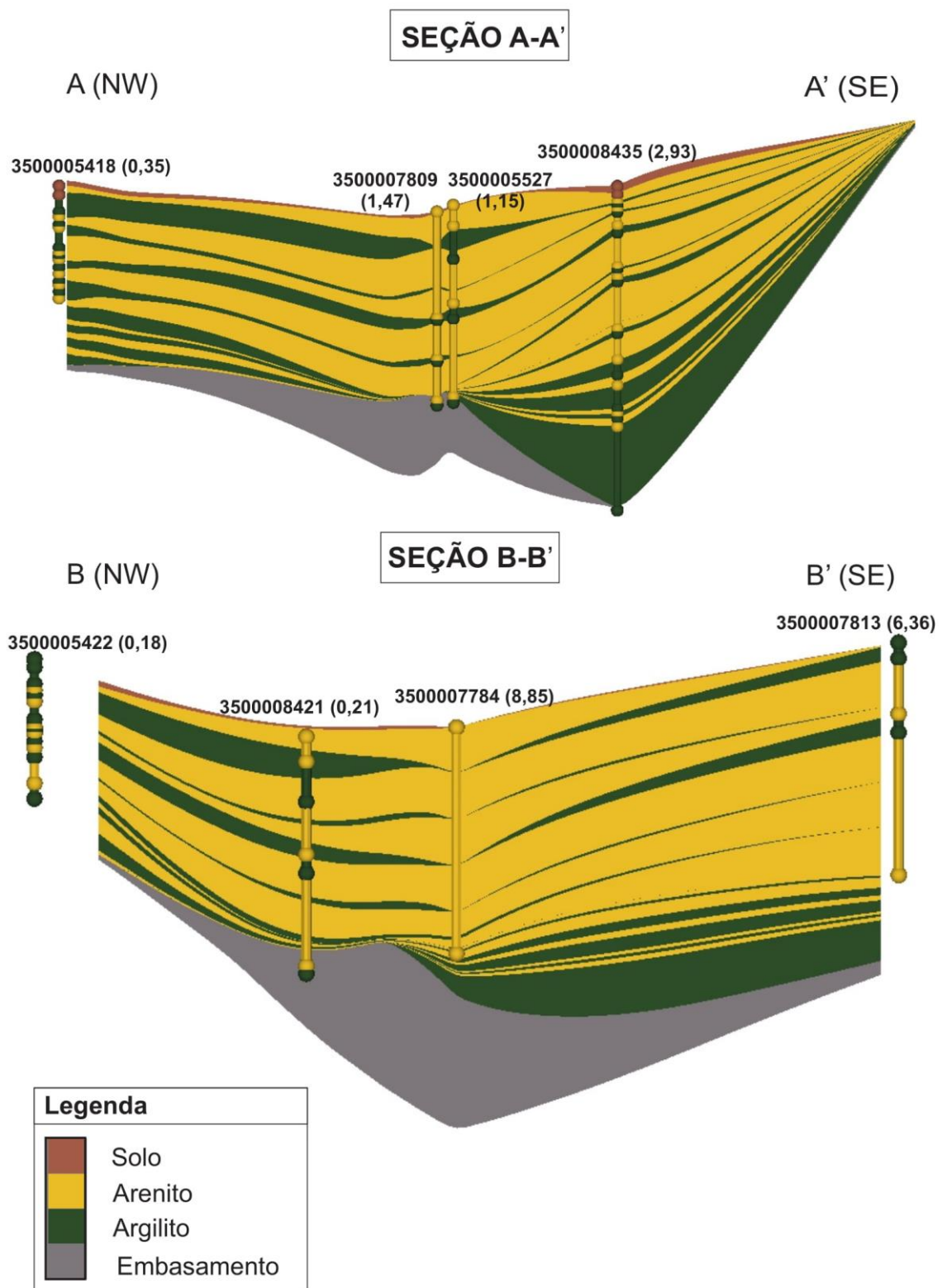


Figura 5.17. Seções geológicas AA' e BB', poços próximos e suas respectivas vazões (valor entre os parênteses).

Elaborado pela autora.

Pode se observar uma relação entre a geologia e a vazão específica dos poços. Os maiores valores de vazão específica se encontram em poços que perfuraram maiores espessuras de arenito e, conseqüentemente, os menores valores estão nos poços com maior abundância de argilito.

Portanto, é possível reconhecer duas zonas distintas: uma primeira, abrangendo a porção noroeste e oeste da bacia, com maiores quantidades de argilito do que arenito, apresentando menores valores de vazão específica, e uma segunda, perfazendo a região nordeste, leste e sudeste da bacia, com altos valores de vazão específica, composta majoritariamente por arenitos.

Desta forma, o modelo geológico pode ser de grande valia, pois ajuda a analisar a favorabilidade de exploração do aquífero, além de auxiliar no projeto de poços.

6. CONCLUSÕES

O estudo permitiu concluir que o fluxo de base é o principal responsável pela manutenção da vazão do Ribeirão dos Putins, afluente do Rio Paraíba do Sul, responsável por 56,53% a 74,77% do escoamento total.

O método de filtros digitais se mostrou rápido, eficiente e relativamente preciso para o cálculo da separação dos escoamentos superficial e subterrâneo para a bacia estudada.

A tendência do fluxo de base foi de crescimento nas décadas de 1960 e 1970, e esse aumento não está atrelado a variações climáticas, uma vez que a precipitação se mostrou aparentemente constante neste período. As interpretações de aumento da vazão e, conseqüentemente, do fluxo de base ao longo do tempo podem estar, portanto, associadas às incertezas das curvas chaves, causadas pela aproximação dos parâmetros de ajuste das mesmas. Cabe ressaltar também a importância de se ter uma série histórica longa, para facilitar o entendimento sobre o efeito das variações climáticas no sistema aquífero.

O fluxo de base da bacia representa entre 21% e 27% da precipitação, que se mostra compatível com as taxas de recarga esperadas para o aquífero nesta região. Esses valores podem ajudar a entender qual é a reserva explorável do aquífero.

O método de separação de escoamentos que mostrou melhor resultado dentre os três métodos analisados foi o método dos mínimos locais, que apresentou pouca variação e oscilação em virtude do aumento das vazões totais e da precipitação.

A vazão específica na sub bacia está relacionada aos tipos litológicos presentes nos poços, sendo maior em áreas que predominam arenito e menor nas que predominam argilito. Contudo, a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Putins pode ser dividida em duas zonas, uma com maior volume de material arenoso e valores mais altos de vazão na região nordeste, leste e sudeste, e outra com maior volume de material argiloso e menores vazões, na região norte e noroeste.

O modelo geológico se mostrou uma ferramenta útil para a compreensão do meio físico, e que permite visualizar com clareza qualquer porção da bacia. Ademais, o modelo pode ser utilizado também para localizar regiões mais favoráveis à exploração de águas subterrâneas. Para a bacia estudada, segundo os dados litológicos e de vazão específica, as áreas mais favoráveis são as regiões nordeste, leste e sudeste.

Devido à grande importância do fluxo de base para a manutenção da vazão do ribeirão, é essencial que as águas subterrâneas da bacia sejam exploradas de maneira sustentável, sem ultrapassar a capacidade de recarga do aquífero, uma vez que a região é altamente urbanizada e industrializada e necessita de uso constante de água em abundância.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, DNPM-DGM, Boletim, 241, 36p. 1967.
- AMORIM, D. D., FERREIRA, M. E. 2000: Um estudo sobre a qualidade das águas do Rio Paraíba do Sul no Vale do Paraíba do Sul no período de 1978 a 1994. Resumos do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (disponível em CD), Belo Horizonte, MG. 2000.
- APPI, C. J., FREITAS, E. L. & Castro, J. C., 1986. Faciologia e Estratigrafia da Bacia de Taubaté. Comunicação Técnica. Rel. Interno CENPES/ PETROBRÁS (Inédito).
- BARRETO, A. B. C. Avaliação de recarga e de sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos de uma micro-bacia cristalina através de modelagem numérica. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.
- BARCELLAR, L.A.P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. Geo.br, vol. 1, p. 1-39, 2005.
- BEAR, J. & VERRUIJT, A. Modeling Groundwater Flow and Pollution: With Computer Programs for Sample Cases. New Jersey: Kluwer Academic Pub, 1987.
- BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. In: Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference. Auckland, New Zealand, v. 28, 1– 13, 2005.
- CAMPOS H.C.N.S. Caracterização e cartografia das províncias Hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- CARVALHO, A. M. A. D.; VIDAL, A. C.; KIANG, C. H. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. Revista do Instituto de Geociências- USP, São Paulo. v.11, n.1, p. 19-32, 2011.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Capítulo 7 – Escoamento Superficial. Livro Hidrogeologia. 2006.
- CETESB (São Paulo). Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2013-2015 [recurso eletrônico] / CETESB; Execução Rosângela Pacini Modesto; Colaboração Blas Marçal Sanchez. São Paulo: CETESB, 2016.
- CHANG, H. K., APPI, C. J., RICCOMINI, C., CASTRO, J. C., ARAI, M., FREITAS, E. L. & SANTOS NETO, F. V., 1989. Geologia da Bacia de Taubaté. Simp. Geol Sudeste, 1. Bol. Res., Rio de Janeiro, SBG p.10.
- CLIMA: SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Climate data. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/sao-jose-dos-campos-6151/>>. Acesso em: 03 set. 2018.
- COGNÉ, N.; COBBOLD, P. R.; RICCOMINI, C.; GALLAGHER, K. Tectonic setting of the Taubaté Basin (southeastern Brazil): Insights from regional seismic profiles and outcrop data. Journal of South American Earth Sciences, v. 42, p. 194-204, 2013.

CONTIN NETO, D. Balanço hídrico em bacia hidrográfica situada em região de recarga do Aquífero Botucatu. Tese de Doutorado. São Carlos, EESC-USP-SHS. 1987.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Execução De Testes De Bombeamento Em Poços Tubulares – Manual Prático de Orientação. Elaboração: Feitosa, F. A. C. e Costa Filho, W. D., 1998.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de águas subterrâneas. Relatório Preliminar. São Paulo, 1972. 2 v.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 3: Vale do Paraíba. São Paulo, 1977. 4 v.

EILERS, V. H. M. Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do Balanço Hídrico. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

FERNANDES, F. L. & CHANG, H. K. Modelagem gravimétrica da bacia de Taubaté. Valedo rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geofísica, v. 19, n. 2, p. 131-144, 2001.

FERNANDES, F.L. & CHANG, H.K. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9, Búzios. Boletim de Resumos... Búzios: Sociedade Brasileira de Geologia, 2003, p. 367-370, 2003.

FERNANDES, F.L. Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP. Ouro Preto. 147 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 1993.

FETTER, Charles Willard. Applied hydrogeology. 3 ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

FOLHES, M. T. & FISCH, G. Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). Revista Ambiente e Água—An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v 1, n.1, p. 62-70, 2006.

GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. Águas Subterrâneas, v. 30, n. 2, p. 190-208, 2016.

GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UH LENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. Hydrology and Earth System Sciences, v.13, p.2055-2068, 2009.

HASUI, Y. & ALMEIDA, M. A. Aspectos estruturais na geomorfologia da área pré-cambriana de São Paulo e Paraná. XXX Congr. Bras. Geol., Recife, PE, Anais, 2: 360-367. 1978.

HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 30, 1978, Recife. Anais... Recife: SBG. v.1, p. 368- 381, 1978.

HEALY, R.W. & COOK, P.G. Using Ground-Water Levels to Estimate Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109, 2002.

HIRATA, R. C. A. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

HIRATA, R.; CARVALHO, A. M. Hidrogeologia e os recursos hídricos subterrâneos. In: PORTO, Rubem La Laina. Fundamentos para a gestão da água. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente. Cap.6, p.89-110, 2012.

KINZELBACH, W. (Org). A survey of methods for groundwater recharge in arid and semiarid regions. Early Warning and Assessment Report Series, UNEP/DEWA/RS.02/2. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. 2002.

LERNER, D.N.; ISSAR, A.S. e SIMMERS, I. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 8. International Association of Hydrogeologists, Verlag Heinz Heise. 1990.

LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A., PAULHUS, J. L. Hydrology for engineers (3rded.).
MANCINI, F. Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhagaba, Bacia do Taubaté, Sp. 1995. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências, São Paulo, 1995.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. 2 ed. rev. Pernambuco: CPRM (LABHIDUFPE), 2000. p. 13- 32.

MARENGO, J. A. & ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARQUES, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. *Bol. Geoci. PETROBRÁS*, 4(3):253-262. 1990.
McGraw-Hill, New York, 508 p., 1982.

MIRANDA, A. C. R. Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

NASCIMENTO, P. S. R. Aspectos geomorfológicos do município de São José dos Campos (SP): Ênfase na área urbana. 2005. *Revista eletrônica do Curso de Geografia do Campus Avançado de Jataí – GO*. 2005.

PADILHA, A. L.; TRIVEDI, N. B.; VITORELLO, Í.; COSTA, J. M., 1991. Geophysical constraints on tectonic models of Taubaté Basin, southeastern Brazil. *Tectonophysics*, 196, 157-172, 1991.

PETTYJOHN, W.A.; HENNING, R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. Ohio State University. Water resources Center Project Completion, Report N° 552. Ohio, 323 p., 1979.

PORTO, R. L. L.; ZAHED FILHO, K.; SILVA, R. M. Medição de Vazão e Curva-Chave. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Energia Hidráulica e Sanitária, 2001.

RENNOLS, K.; CARNELL, R.; TEE, V. A descriptive model of the relationship between rainfall and soil water table. *Journal of Hydrology*, New York: v. 47, p. 103-114. 1980.

RICCOMINI, C. & COIMBRA, A. M. Geologia da bacia sedimentar. In: NEGRO JUNIOR, A.; FERREIRA, A. A.; ALONSO, U. R.; LUZ, P. A. C. (eds) Solos da Cidade de São Paulo. ABEF/ABMS, p.37-94. 1992.

RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. 1989. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, São Paulo, 1989.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELI, A.; CARNEIRO, C.; NEVES, B. B. B. Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, São Paulo: Ed. Beca. 673p. 2004.

ROMERA E SILVA, P. A. (org). Água:quem vive sem? 2. ed. São Paulo:FCTH / CT-Hidro, 2003.

ROSEMBLUETH, A. & WEINER, N. The role of models in science. *Philosophy of Science*, XII (4): 316-321, 1945.

SAWAKUCHI A.O. & GIANNINI P.C. Complexidade em sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (2): 347-358, 2006.

SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v.10, p. 18-39. 2002.

SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U. S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report, 96-4040, Lemoyne, Pennsylvania, 46 p., 1996.

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Águas Subterrâneas. Disponível em: <<https://snirh.apambiente.pt/junior/?menu=2.2&item=2>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; BARBOSA, S. A. (2008). Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. *Revista Ambiente e Água– An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Taubaté, v. 3, n. 1, 2008.

TEISEDRE J.M.& MARIANO I.B. Possibilidades hidrologicas da Bacia de Taubatc. SBG. 6:3003-30 11, 1978.

VIDAL, A. C. & KIANG, C. H. Análise geoestatística da salinidade dos aquíferos da bacia de Taubaté. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 34, n.1, p. 109-116, 2004.

VIDAL, A. C.; FERNANDES, F. L.; KIANG, C. H. Distribuição dos arenitos na bacia de Taubaté-SP. Geociências, São Paulo, 2004.

VISWANATHAN, M. N. The rainfall/water-table level relationship of an unconfined aquifer. Ground Water. Vol. 21, no. 1, pp. 49-56. 1983.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras, v.13, n. 2, p. 269-300, 2005.

8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 3ed. Organização e Coordenação Científica: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. 2008.