

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A RECARGA DE AQUÍFEROS NA RELAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E
SUBTERRÂNEAS E A INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO ANTRÓPICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO ALTO BATALHA (SP)**

Carolina Fernanda dos Santos

Orientador: Prof. Ricardo Hirata (GSA-IGc)
Coorientadora: Dra. Silvana Susko Marcellini

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 19/07)

SÃO PAULO
2019

*“A água que não corre forma um
pântano; a mente que não
trabalha forma um tolo.”*

Victor Hugo

De acordo,



(Assinatura do Aluno)



(Assinatura do Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pelos caminhos percorridos até o momento e pelos que ainda ei de trilhar.

Agradeço aos meus pais, Silvana e Fernando, por todo amor, sabedoria, paciência, inspiração, suporte e estímulo que me deram não só ao longo da graduação como na vida toda.

Agradeço à minha irmã, Ana, pelos conselhos e cuidados que me foram dados desde sempre.

Agradeço ao Prof. Ricardo Hirata e a Dra. Silvana Susko Marcellini pelo conhecimento, orientação, conselhos, sugestões, críticas, colaboração, paciência e incentivo que me deram ao longo de todo o projeto. Me abriram as portas à um novo mundo geológico.

A Daniela, por toda orientação e supervisão do projeto, além do incentivo ao ingresso neste ramo geológico.

Ao CEPAS, pelo apoio e financiamento dos estudos do projeto.

Ao Luigi, por todo amor, amizade, carinho e pelo companheirismo desde o início, em todos os momentos da vida.

As minhas tias de coração, Vera e Silvia, por todo carinho, amor, conselho e incentivo que me dão em todos os momentos.

Aos meus amigos da vida e da graduação, Karen, Karina, Gabriel, Jorge, Alex, Alexandre, Leonardo, Bianca e Luís, que tornaram a vida na faculdade mais fácil, engraçada e rica de experiências.

Agradeço aos professores da Geologia, pelos conhecimentos transmitidos, orientações e esclarecimentos sempre acompanhados de paciência por toda a graduação.

Todos vocês foram essenciais, de algum modo, para o desenvolvimento desse projeto, como na minha vida. Muito obrigada por tudo!

RESUMO

As águas no ciclo hidrológico são fundamentais para a manutenção e perenidade de rios e corpos de água superficial, através da descarga de aquíferos, que em última instância é controlada pela recarga do aquífero, e esta pelas características de ocupação do solo, geologia, geomorfologia e clima. A região estudada se dá na Bacia Alta do rio Batalha (BARB), a montante da captação das águas para o abastecimento de Bauru, e abrange os municípios de Agudos, Bauru e Piratininga. A captação do rio abastece cerca de 25% da demanda pública enquanto os poços privados do Sistema Aquífero Guarani e do Sistema Aquífero Bauru (SAB) representam os outros 75%, com o último apresentando maior vulnerabilidade à seca pela baixa profundidade em que se encontra. Assim, o alvo de estudo do projeto é a relação recarga-descarga entre o SAB e o rio Batalha, e também como o uso e ocupação e as mudanças climáticas globais afetam a recarga. A mesma é analisada através de duas metodologias independentes e complementares: uma hidrológica, voltada ao valor de descarga, e outra baseada em cálculos de balanço hídrico, voltada à recarga. Os valores obtidos segundo cada metodologia foram de 310,7 mm/ano e variações entre 0 a 173,8 mm/ano (a depender do coeficiente de escoamento superficial), respectivamente. Os resultados deveriam ser supostamente os mesmos, contudo, houve uma diferença entre os valores encontrados devido às incertezas atreladas a cada método, sendo o último o de menor precisão. Ademais, distintos cenários foram analisados, atrelados às mudanças climáticas globais, com um aumento de 1°C até 4°C na temperatura (havendo uma diminuição na recarga) e aumento de 50% na precipitação nos meses de maior chuva e diminuição 50% nos períodos de seca (com um aumento da recarga), que permitiram estimar a recarga na região e, com auxílio da metodologia dos Filtros, a disponibilidade hídrica para a cidade na captação do rio Batalha. Caso haja períodos de recessão mais prolongados, com vazões menores, o escoamento de base será menor. Na eventualidade da captação para abastecimento permanecer com a mesma taxa atual (530L/s), a recarga não suprirá a demanda e haverá períodos maiores de estiagem.

Palavras-chave: recarga, descarga, rio Batalha, Sistema Aquífero Bauru.

ABSTRACT

The water in the hydrological cycle are fundamental for the maintenance and continuity of rivers and surface water bodies through the discharge of aquifers, which is ultimately controlled by aquifer recharge, and this by the characteristics of land occupation, geology, geomorphology and climate. The studied region occurs in the Batalha River Upper Basin (BARB), upstream of the water supply for Bauru supply, and includes the municipalities of Agudos, Bauru and Piratininga. The river catchment supplies about 25% of the public demand while the private wells of the Guarani Aquifer System and the Bauru Aquifer System (SAB) represent the other 75%, with the latter presenting greater vulnerability to drought due to its shallow depth. Thus, the project's target study is the recharge-discharge relationship between the SAB and the Batalha River, as well as how use and occupation and global climate change affect recharge. It is analyzed through two independent and complementary methodologies: one hydrological, focused on the discharge value, and another based on water balance calculations, focused on recharge. The values obtained according to each methodology were 310.7 mm/year and variations between 0 and 173.8 mm/year (depending on the surface runoff coefficient), respectively. The results were supposed to be the same, however, there was a difference between the values found due to the uncertainties linked to each method, the last one being the least accurate. In addition, different scenarios were analyzed, linked to global climate change, with an increase of 1°C to 4°C in temperature (with a decrease in recharge) and a 50% increase in precipitation in the雨iest months and a 50% decrease in drought periods (with an increase in recharge), which allowed estimating recharge in the region and, with the aid of the Filters methodology, the water availability for the city in the capture of the Batalha River. If there are longer recession periods with lower flow rates, the base runoff will be lower. In the event that supply funding remains at the same current rate (530L/s), recharging will not meet demand and there will be longer periods of drought.

Key words: recharge, discharge, Batalha river, Bauru Aquifer System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo.....	13
Figura 2. Aquíferos da região de estudo (gerado pela autora).....	16
Figura 3. Balanço hidráulico regional (Silva, 2007). Legenda: P – precipitação; ET – evapotranspiração; Q – vazão de saída; Gin – volume de água subterrânea que entra; Gout – volume da água subterrânea que sai; S – armazenamento.....	18
Figura 4. Declividade (A), uso e ocupação (B) e tipo de solo (C) da área de estudos.....	25
Figura 5. Uso e ocupação detalhado.....	26
Figura 6. Junção dos três tributos compondo 16 classes geradas.....	27
Figura 7. Classificação segundo a junção dos atributos, compondo 28 classes.....	28
Figura 8. Recarga do aquífero na área de estudo através do método de balanço hídrico no solo.....	29
Figura 9. Hidrograma de vazões médias mensais geradas segundo modelo SMAP – Rio Batalha, de janeiro de 2000 a dezembro de 2018.....	31
Figura 10. Aumento da recarga com a variação da precipitação média mensal, de acordo com os coeficientes de escoamento superficial (C=0,1 a 0,7).....	34
Figura 11. Diminuição da recarga com a variação da temperatura média mensal, de acordo com os coeficientes de escoamento superficial (C=0,1 a 0,7).....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados climatológicos de Bauru (Fonte: pt.climate-data.org).....	14
Tabela 2. Parâmetros hidráulicos do Sistema Aquífero Bauru em Bauru (Mancuso & Campos, 2005; IPT, 2000 Rosenberger et al., 2013; C3, 2015).....	15
Tabela 3. Diferenças entre os aquíferos Adamantina e Marília no município de Bauru.....	17
Tabela 4. Comparação entre metodologias distintas de recarga de aquíferos (Lerner et al, 1990).....	20
Tabela 5. Valores de BFI _{max} (Collischonn e Tassi, 2008).....	24
Tabela 6. Parâmetros para o cálculo de escoamento superficial.....	28
Tabela 7. Reclassificação dos tributos gerados (declividade, uso e ocupação e tipo de solo) com base nos coeficientes de escoamento.....	28
Tabela 8. Comparações entre a recarga atual e as geradas a partir da mudança de temperatura média anual (precipitação média anual de 1373,4 mm).....	30
Tabela 9. Comparações entre a recarga atual e as geradas a partir da variação da precipitação média mensal.....	30
Tabela 10. Constantes obtidas com o método do Filtro de Eckhardt.....	31
Tabela 11. Variável considerada segundo seu método.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
3. JUSTIFICATIVA.....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1. Revisão bibliográfica.....	11
4.2. Compilação e aquisição de dados.....	11
4.3. Composição de mapas e cálculos.....	12
4.4. Obtenção da recarga e do fluxo de base	12
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	13
5.1. Área de estudo.....	13
5.2. Clima.....	14
5.3. Hidrologia e hidrogeologia da área.....	14
6. TRABALHOS PRÉVIOS.....	17
6.1. Interação rio-aquífero	18
6.2. Método de recarga.....	19
6.2.1. Balanço hídrico de solo.....	21
6.3. Método de descarga	22
6.3.1. Filtro de Eckhardt.....	23
7. RESULTADOS OBTIDOS E DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	24
8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
9. CONCLUSÕES.....	34
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXO – Cálculo da percolação.....	41

1. INTRODUÇÃO

Com as mudanças climáticas globais, o tema dos recursos hídricos e da sua escassez vem ganhando destaque (The Economist, 2019), sobretudo nos aspectos de disponibilidade e contaminação. No Brasil, embora essa discussão ainda esteja fortemente restrita ao ambiente acadêmico, aos poucos o governo e a sociedade se mobilizam para entender, estudar e agir para aumentar a segurança hídrica de cidades e do campo. Com muito menos destaque, o tema da água subterrânea, e sobretudo a sua relação com as águas superficiais, é tratado.

O papel das águas subterrâneas vai muito além de ser um recurso hídrico importante. Essas águas no ciclo hidrológico são fundamentais para a manutenção e perenidade de rios e corpos de água superficial, através da descarga de aquíferos, que em última instância é controlada pela recarga do aquífero, e esta pelas características de ocupação do solo, geologia, geomorfologia e clima.

Assim, o entendimento da recarga de um aquífero é importante não somente para se avaliar a disponibilidade hídrica subterrânea, mas também para se entender os fluxos de água em rios.

A cidade de Bauru, localizada no interior do Estado de São Paulo, possui 25% de seu abastecimento público feito por uma captação no rio Batalha. O restante é suprido pelas extrações do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e por poços privados do Sistema Aquífero Bauru (SAB). Assim, entende-se que a disponibilidade da captação superficial de Bauru depende das descargas ou fluxo de base do SAB, que ocorre na área e está conectado ao rio.

O problema que se coloca é que o uso inapropriado da água superficial e subterrânea na Bacia Alta do rio Batalha (BARB, a montante da captação) e o próprio uso agrícola do solo, que dependendo do tipo de lavoura, altera a recarga que por sua vez altera a descarga do aquífero e a disponibilidade de água do rio. Adicionalmente, as mudanças climáticas globais também alterarão a recarga do aquífero, os escoamentos superficiais e a própria demanda por água no campo e na cidade.

Conclui-se assim que o entendimento das águas superficiais e subterrâneas e de suas relações é necessário para construir ações que virjam para o enfrentamento às crises hídricas as quais o município de Bauru tem passado regularmente. Dessa forma, o presente estudo, por meio do auxílio de sistemas de informação geográfica, busca analisar distintos cenários de uso e ocupação do solo, alterados pelas possíveis mudanças climáticas globais que consideram um aumento de até 4°C na temperatura média anual e de até 50% na precipitação nos meses chuvosos e diminuição de 50% nos meses de seca. Tais simulações afetam e comprometem a recarga do SAB e, por consequência, o fluxo de base do rio e sua disponibilidade de água para a cidade. Essa análise integrada de águas superficiais e subterrâneas é ainda tema pouco estudado no país.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é avaliar a recarga do Sistema Aquífero Bauru na bacia do rio Batalha a montante da captação que serve de abastecimento da cidade de Bauru, através de duas técnicas independentes: uma hidrológica (Filtro de Separação de Escoamento de Eckhardt, 2005) com a construção de hidrogramas e estimativa dos fluxos de base, e outra hidrogeológica (equação de Thornthwaite, 1948), através de métodos de balanço hídrico de solo.

São objetivos secundários:

- a) avaliação do uso e ocupação do solo e os efeitos na recarga do aquífero livre; e
- b) estimativa da disponibilidade hídrica na captação do rio Batalha, avaliando os vários cenários de uso e ocupação agrícola do território da bacia e os impactos esperados pelas mudanças climáticas globais.

As análises conciliaram o balanço hídrico do solo com as características físicas e de ocupação da área em uma base integrada de sistema de informação geográfica. Uma vez reunidos e trabalhados, os dados permitiram a setorização da área com base na infiltração, possibilitando a determinação da recarga do aquífero no rio, que foi comparado, por sua vez, com os valores obtidos pelo método hidrológico.

3. JUSTIFICATIVA

O tema do presente projeto se deu por conta dos poucos estudos que se tem no Brasil sobre a quantificação da relação entre águas superficiais e águas subterrâneas, da recarga de aquíferos e de como o uso e ocupação da terra influencia nas descargas e na disponibilidade hídrica de um rio, principalmente porque o centro urbano de Bauru é dependente de modo complementar da captação do rio Batalha para abastecimento da população.

Adicionalmente, a região oferece uma boa oportunidade de estudo, pois acumula um grande número de dados hidrogeológicos, resultados de vários trabalhos recentes. Outro ponto importante reside na oportunidade de uma estudante de geologia, que quer se dedicar à hidrogeologia, interagir com uma hidróloga, com experiência em águas superficiais, o que permite uma visão mais ampla e integrada do ciclo da água.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Revisão bibliográfica

A metodologia adotada baseou-se em revisão bibliográfica, abrangendo os principais temas do projeto, incluindo trabalhos que estudam a recarga de aquíferos e a variação segundo o uso do terreno, relação água subterrânea e água superficial e a determinação de série de vazões em rios. Ademais, incluem-se nessa atividade os estudos de geologia, hidrogeologia e hidrologia da área de estudos.

4.2. Compilação e aquisição de dados

Ademais, foram coletados, compilados e organizados os dados climatológicos, hidrogeológicos, fisiográficos (declividade, uso e ocupação do solo e tipo de solo da região) e de postos pluviométricos e fluviométricos, a partir de séries históricas do IPMet (Instituto de Pesquisas Meteorológicas, 2000 a 2018 – UNESP) e das estações pluviométricas D6-36, D5-41 e D6-57 adquiridas do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2000 a 2018), com uso dos programas Excel e ArcGis. Cabe destacar que as séries pluviométricas utilizadas foram verificadas e suas lacunas foram preenchidas por outra pesquisa que está sendo desenvolvida na mesma área, assim como a série de vazões utilizadas nesta pesquisa. Esses dados permitiram avaliar as extrações de água na área, bem como as características hidráulicas do corpo hídrico subterrâneo.

O uso e ocupação do solo na área em primeiro momento foi analisado por imagens do Google Earth (2019) sem maiores detalhes. Em etapa de campo foi possível distinguir os tipos de cultivo, sendo eles cana de açúcar e eucalipto essencialmente, o que permitiu detalhar o mapa para a região de estudo.

A topografia, por sua vez, foi obtida por imagem SRTM adquirida no sítio do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e trabalhada com o auxílio de um software SIG (Sistema de Informação Geográfica - ArcGIS). Juntamente com essa etapa, a região de estudo foi dividida em zonas segundo o critério de permeabilidade do solo de Ogrosky & Mockus (1964) para cálculo de infiltração de água no solo. Zonas urbanas e regiões de pastagem foram consideradas como de baixa permeabilidade, ou seja, com restrição na infiltração natural de água no solo.

Após reunidos os dados adquiridos sobre os postos e estações meteorológicas presentes, os mesmos foram organizados em planilhas Excel, para posterior tratamento dos dados em software de sistemas de informação geográfica e cálculos de acordo com o método de análise de recarga e de escoamento de base adotados – método de balanço hídrico do solo e de filtros de Eckhardt, respectivamente.

4.3. Composição de mapas e cálculos

Com a base de dados pronta, foram gerados os mapas de escoamento superficial e o de recarga, representando de modo geral o balanço hídrico do solo para a região.

Estudos, fotointerpretação e análises de imagens de satélite do Google Earth (2019) e posterior checagem em campo sobre as características fisiográficas, geológicas e dos distintos cultivos da área permitiram a produção e integração de mapas com maior detalhe para a produção do escoamento superficial em plataforma de Sistema de Informação Geográfica (SIG - ArcGIS). Por fim, se deu o cálculo da recarga pelo balanço hídrico do solo através do método de Thornthwaite (1948), obtendo-se valores de recarga para a região de estudo em zonas.

Conforme já mencionado no item anterior, a série de vazões utilizadas do rio Batalha, na seção de captação de água superficial para o município de Bauru, foram obtidas pela Eng. Dra Silvana Susko Marcellini. Assim foi possível a separação do escoamento de base do escoamento superficial pelo método do Filtro de Eckhardt (2005) e a obtenção da descarga para a área de estudo.

4.4. Obtenção da recarga e do fluxo de base

Ao fim, foram reunidos os mapas elaborados de uso e ocupação do solo, de permeabilidade e declividade, com o apoio de um software SIG (ArcGis) para confecção de um mapa de escoamento superficial. Através deste mapa e do cálculo pelo método de balanço hídrico do solo com os dados hidrogeológicos coletados, foi gerado um mapa final com o resultado dos valores de recarga, através de técnica de balanço hídrico do solo (Thornthwaite & Mather, 1955). Em paralelo, a técnica hidrológica permitiu, por meio de análises de hidrogramas construídos com os dados adquiridos como também por equações matemáticas (como retas de regressão e seus ajustes), distinguir o escoamento superficial do fluxo de base. Com isso, foi possível comparar os dados obtidos de recarga e de fluxo de base e ajustar os valores de recarga calculados pelo método do balanço hídrico do solo, pois há mais erros e incertezas associados a esse último método.

Em adendo, foi realizada a simulação de distintos cenários climatológicos, mediante os dados reais obtidos das estações meteorológicas, com a finalidade de ser obtido um valor tal qual a captação de água não seja afetada, ou o menos afetada possível. A partir de um julgamento técnico com o orientador e a coorientadora do projeto, foram adotados alguns cenários como previstos para as mudanças climáticas globais para o final do século.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

5.1. Área de estudo

A região do presente estudo localiza-se na Bacia do rio Batalha, que pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 16 (UGRHI 16 – Tietê-Batalha), mais especificamente na porção à montante da captação (Bacia Alta do rio Batalha – BARB). A área estudada compreende três municípios da porção centro-oeste do estado de São Paulo: Agudos, Bauru e Piratininga, com a captação para abastecimento hídrico executada por Bauru. O município de Bauru é também abastecido pelas águas advindas dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani (Figura 1). Caracteriza-se por ser predominantemente rural e localmente apresentar vilarejos, com a maior área urbana sendo a cidade de Bauru, a nordeste.

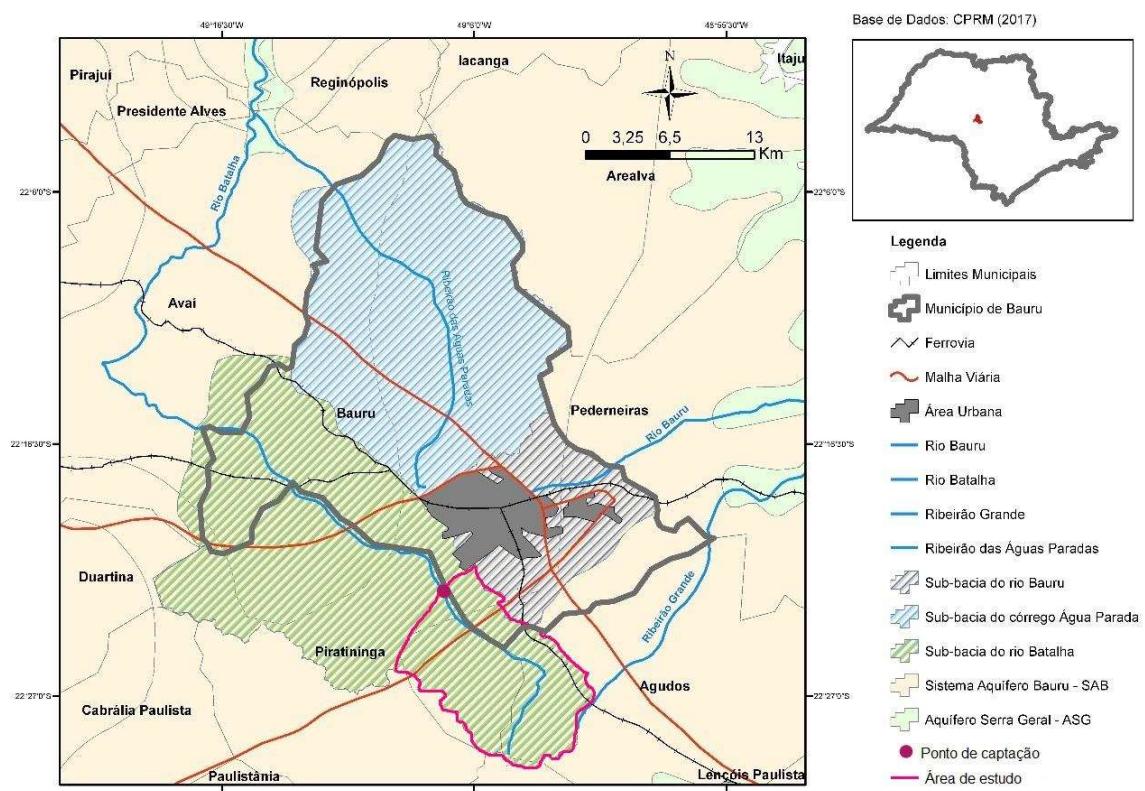


Figura 1. Área de estudo.

A BARB, por sua vez, drena uma área de cerca de 125 km², tendo o rio Batalha como seu principal corpo d'água superficial e, desde 2001, está inserida numa Área de Proteção Ambiental (APA), que preserva os recursos hídricos, seus leitos e matas ciliares, assim como a fauna e flora remanescentes do Cerrado, uma vez que a área sofre com processos erosivos e de assoreamento por conta do avançado desmatamento de matas ciliares. Ademais, após o ponto de captação de água há o lançamento de esgotos e despejo de lixos, o que intensifica a necessidade de uma proteção e recuperação legal do rio Batalha. Assim, a área de estudo

é composta por grandes áreas de pastagem, intercaladas a porções de mata remanescente do cerrado ainda preservadas, bem como a agricultura extensiva de eucalipto e cana de açúcar.

5.2. Clima

Segundo o sistema de Köppen (Setzer, 1966), o clima é classificado como CWA, ou tropical de altitude, com temperaturas médias máxima de 24,1°C (verão, em janeiro e fevereiro) e mínima de 17,3°C (inverno, em julho). Tratando-se do regime pluviométrico, o maior período de precipitação total é no verão, com 215 mm/mês, e o menor é no inverno, com 26 mm/mês (Tabela 1).

Tabela 1. Dados climatológicos de Bauru (Fonte: pt.climate-data.org)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	24,1	24,1	23,2	21,2	18,5	17,4	17,3	18,8	20,2	21,5	22,8	23,5
Chuva (mm)	215	193	130	56	44	50	34	26	53	114	119	175

5.3. Hidrologia e hidrogeologia da área

Com cerca de 167 km de extensão, sendo 22 km a distância entre a nascente e o local de captação (Bauru), o rio Batalha é um dos principais afluentes do rio Tietê e é utilizado como um divisor territorial, definindo os limites entre Piratininga e Bauru. Segundo IPT (2000), o rio abrange uma área de contribuição de drenagem de 2.343,77 km² e apresenta vazão média de longo período de 16,73m³/s e vazão mínima Q_{7,10} de 6,91 m³/s.

O Sistema Aquífero Bauru, por sua vez, possui águas de boa qualidade e fácil acesso em toda sua extensão, incluindo a região de estudo, caracterizado como freático localmente (Bertol, 2007). Quanto à geometria, o SAB apresenta-se com as linhas de fluxo convergentes ao rio. Comporta-se como regionalmente livre, e localmente semiconfinado, apresenta grandes porções aflorantes e espessuras que variam de 100 a 300 m segundo a morfologia e a litologia (Canato, 2014). Por apresentar variações litológicas, que refletem diferenças nas condições de porosidade, permeabilidade e presença de cimento, atrelados ao arcabouço estrutural, o SAB exibe um zoneamento do potencial de exploração hídrica classificado como heterogêneo (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros hidráulicos do Sistema Aquífero Bauru em Bauru (Mancuso & Campos, 2005; IPT, 2000 Rosenberger et al., 2013; C3, 2015).

Parâmetro	Valor
Espessura média (m)	78,57
Vazão (m ³ /h) por poço tubular	4,97
Vazão específica (m ³ /h/m)	0,33
Vazão (m ³ /h)	4,97
Capacidade específica (m ³ /h/m)	0,57
Transmissividade (m ² /dia)	43,80
Porosidade efetiva (%)	5 a 15
Gradiente hidráulico	3,1 a 4,4 %
Velocidade de fluxo (m/dia)	2,2 a 3,1
Porosidade específica (%)	5
Condutividade hidráulica (m/d)	0,002 a 3,66; com intervalos de 0,1 a 0,4
Nível estático (m)	27,99
Nível dinâmico (m)	52,50

Ocorrem na região de estudoo Sistema Aquífero Guarani (SAG), em maiores profundidades, e o Sistema Aquífero Bauru (SAB – alvo do estudo), em profundidades menores. O primeiro é formado pelas formações Piramboia e Botucatu, compostos por arenitos finos a médios, de ambiente deposicional eólico úmido (Assine *et al.*, 2004; Côrtes & Perinotto, 2015) e eólico/desértico (IPT, 2000; Montanheiro *et al.*, 2011), respectivamente.

Acima destas formações, ocorrem as rochas basálticas e basalto-andesíticas de afinidade toleítica (Marques e Ernesto, 2004) que compõe a Formação Serra Geral. Os basaltos separam os dois sistemas aquíferos (SAG e SAB) com seus derrames basálticos, exceto na cidade de Bauru, devido a uma “janela” geológica na região, que ocorre devido à erosão ocasionada pelo alto estrutural do Domo de Piratininga (Campos *et al.*, 2008), que soergueu as rochas ígneas e as expôs ao intemperismo físico-químico.

Por sua vez, o SAB é formado por rochas do Grupo Bauru, estratigraficamente acima das formações supracitadas. Com contatos erosivos na base e no topo de caráter continental (Paula e Silva *et al.*, 2006), o Grupo Bauru tem seu ambiente deposicional interpretado por Stradioto (2007) como árido e semi-árido, e é composto por cinco formações segundo Paula e Silva *et al.* (2005): Caiuá, Santo Anastácio, Araçatuba, Adamantina e Marília. Apenas as duas últimas formações (Figura 2) afloram no município de Bauru, com representatividade de 57% e 43% respectivamente (Almeida Filho, 2000).

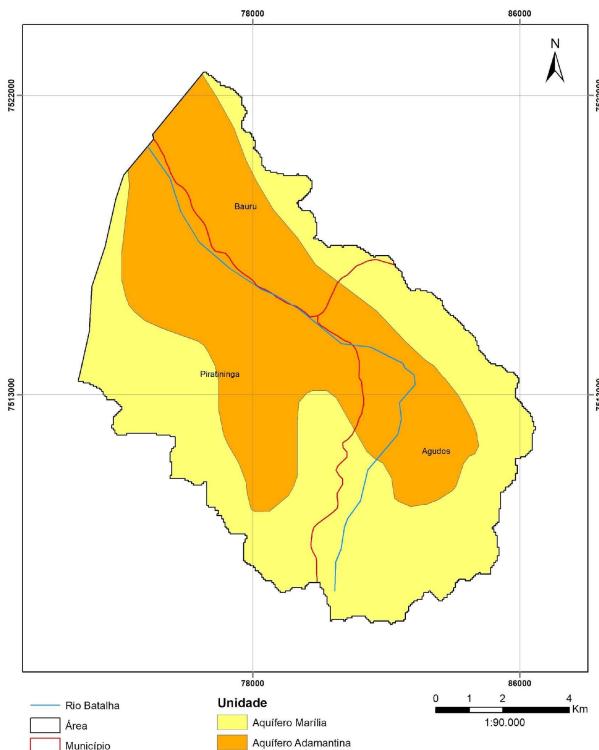


Figura 2. Aquíferos aflorantes na região de estudo (gerado pela autora).

A base do Grupo Bauru ocorre na porção leste da área de estudo e se dá pela Formação Adamantina, com extensa ocorrência em parcelas de topografia menos acentuada e espessuras que variam de 30 m a 120 m, recobrindo o vale do rio Batalha (Paula e Silva *et al.*, 2003). É constituída pelos arenitos rosados a acastanhados, finos a médios, com estrutura maciça e estratificações cruzadas, que se intercalam a lamitos e siltitos avermelhados (Soares *et al.*, 1980), com microestratos cruzados e marcas de ondas (Soares *et al.*, 1980). Os *fining-upwards* existentes são representativos de um paleoambiente deposicional fluvial meandrante. O aquífero localizado nessa Formação é o Adamantina, classificado como livre a semilivre, com permeabilidade moderada e porosidade granular primária. Apresenta comportamento hidráulico anisotrópico e heterogêneo devido à presença das intercalações de siltitos e lamitos (Paula e Silva, 2003) e é a unidade explorada por exibir melhor produtividade.

Acima da Formação Adamantina se dá a Formação Marília, com ocorrência na porção oeste de Bauru, restrita a relevos topográficos maiores, com espessuras de até 160 m (Varnier *et al.*, 2010). Sua composição se dá em sedimentos na fração areia grossa a conglomerados de matriz variável, grãos angulosos e mal selecionados (Soares *et al.*, 1980) de estrutura maciça predominante, localmente com nódulos carbonáticos, que caracterizam a formação. O paleoambiente deposicional é interpretado como um leque aluvial restrito (SHS, 2008), com ocorrência em planaltos. O aquífero formado por esta unidade é o Marília, com baixa permeabilidade por conta de sua composição litológica, e classificação de livre a

semiconfinado, com comportamento anisotrópico e heterogêneo. Contudo, por não se encontrar situada na zona saturada, a unidade não forma um aquífero.

Há ocorrências de aquíferos suspensos em porções de alteração superficial do Marília, formados pelas camadas menos permeáveis que segregam o aquífero principal, como também situações de confinamento hidráulico, originados pela diminuição de permeabilidade ocasionadas pela cimentação carbonática do arcabouço (Paula e Silva *et al.*, 2005). Segundo Prandi (2010), as localidades que apresentam essa cimentação foram identificadas por perfilagens óticas como porções secas do aquífero. Além do mais, o Aquífero Marília, por ser relativamente menos permeável que o Adamantina, atua de modo a servir como uma proteção de qualidade para as águas do aquífero principal, intervindo na recarga (Tabela 3).

Ambas as unidades aquíferas possuem fluxo de água de acordo com as drenagens principais, entretanto não evidenciam conectividade hidráulica entre si, uma vez que foram registradas diferenças em testes de bombeamento e em níveis potenciométricos (Prandi, 2010), com o Aquífero Adamantina apresentando poços com níveis d'água mais profundos em comparação ao Marília (Tabela 3). Enquanto o primeiro registra nível estático (NE) médio de 109,5 m, o segundo aponta profundidade média do NE de 27,6 m.

Tabela 3. Diferenças entre os aquíferos Adamantina e Marília no município de Bauru.

Poços com profundidade até 150 m - Marília				Poços com profundidade acima de 150 m - Adamantina			
Q (m ³ /h)	T (m ² /dia)	NE (m)	Q/s (m ³ /h/m)	Q (m ³ /h)	T (m ² /dia)	NE (m)	Q/s (m ³ /h/m)
4,0	10-50	27,6	0,1-1	7,9	10-100	109,5	0,5-3

Segundo Silva (2009), a recarga natural do SAB é ocasionada pela infiltração das águas provenientes de corpos d'água superficiais e pelas chuvas. Por ser um aquífero livre, raso, de fácil acesso e com alto potencial hídrico, o SAB é notadamente um recurso hídrico importante no que se refere ao abastecimento hídrico. Contudo, ações antrópicas afetam a recarga na zona rural, por meio da agricultura, como também na zona urbana:

- a) fugas das redes de água e coleta de esgoto;
- b) impermeabilização parcial dos solos em áreas urbanas.

6. TRABALHOS PRÉVIOS

Como base da pesquisa desenvolvida, a revisão da literatura e das metodologias utilizadas para cálculo da recarga foi atividade fundamental para o projeto, contribuindo ao melhor entendimento e definição das metodologias utilizadas.

6.1. Interação rio-aquífero

Segundo Sophocleous (2002), as interações entre águas superficiais e subterrâneas devem ser analisadas sob uma perspectiva hidrogeoecológica, ou seja, são diretamente influenciadas por fatores climatológicos, pedológicos e geológicos, além do componente biótico, atuantes na bacia hidrográfica. O estudo dessas interações constitui importante etapa no processo de gerenciamento de recursos hídricos, posto os efeitos e possíveis alocações que ocorrem de modo inter-relacionado dos sistemas.

De acordo com o balanço hídrico, o volume de água que entra num sistema deve ser o mesmo volume de saída (Figura 3):

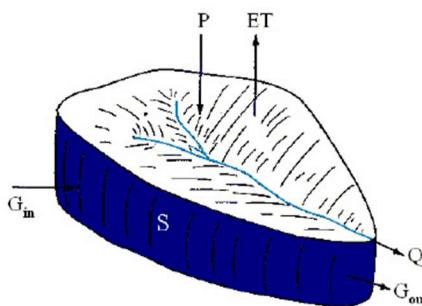


Figura 3. Balanço hidráulico regional (Silva, 2007). Legenda: P – precipitação; ET – evapotranspiração; Q – vazão de saída; G_{in} – volume de água subterrânea que entra; G_{out} – volume da água subterrânea que sai; S – armazenamento.

Em termos práticos, para o balanço hídrico da bacia hidrográfica, considera-se a parcela subterrânea como em equilíbrio dinâmico, sem a contribuição da porção de entrada e sem variação do armazenamento. Assim, tem-se que a taxa de recarga média deve ser igual à de descarga média, para longos períodos. Entretanto, os fatores influenciadores acima mencionados afetam o equilíbrio do sistema, e exercem diferenças entre os valores de recarga e descarga, devendo ser levados em consideração todos os componentes que podem afetar essa igualdade.

São então separadas duas componentes (Silva, 2007):

- de recarga, que considera infiltrações e contribuições de corpos superficiais;
- de descarga, que considera o fenômeno de ascensão capilar e também a descarga em corpos superficiais.

Classificado como efluente quanto à relação de drenagem com as águas subsuperficiais, e com a classificação de Sophocleous (2002) que relaciona aspectos físicos de águas superficiais e subterrâneas, o SAB é considerado como hidráulicamente conectado, ou seja, o nível d'água subterrânea alcança a superfície de base do canal.

Ademais, as interações entre rios e aquíferos configuram condições específicas (pH, Eh, temperatura, entre outros) para determinados habitats de vida aquática e terrestre, principalmente na zona hiporreica (zona de interação entre aquífero e rio), ambiente de grande dinâmica e influência no fluxo e na qualidade das águas de recarga.

6.2. Método de recarga

Segundo Healy (2010), os métodos utilizados para análise da recarga das águas subterrâneas podem ser classificados de acordo com a seguinte divisão: a porção de água superficial, zona saturada e não saturada. De acordo com a literatura, muitos são os métodos utilizados para a avaliação da recarga da zona saturada e que permitem a quantificação do volume das águas subterrâneas, a depender do tipo e do número de fontes de recarga para a escolha do método mais apropriado. Definida como fluxo de água capaz de adicionar volume hídrico à zona saturada (Lerner *et al.*, 1990), a recarga é característica essencial para o manejo adequado de aquíferos como a uma gestão apropriada de recursos hídricos (Obuobie *et al.*, 2012). Por ser um processo não linear, a recarga é calculada considerando-se intervalos temporais longos, com dados de séries históricas que permitam a caracterização de uma determinada região.

De acordo com Lerner *et al.* (1990), cinco são as fontes principais de recarga subterrânea: rios, precipitação, irrigação, fluxos subterrâneos adjacentes e recarga urbana. Devido à diversidade dos processos geradores de recarga que atuam em escalas distintas, a exatidão e precisão numérica se tornam difíceis de serem alcançadas (Hornero *et al.*, 2016).

As metodologias utilizadas para cálculo na zona saturada podem ser distinguidas em (Scanlon *et al.*, 2002; Xu & Beeckman, 2003; Wahnfried & Hirata, 2005; Andreo *et al.*, 2008; Lucas *et al.*, 2012):

- Método de medidas diretas, com lisímetros;
- Método do balanço hídrico de solo, baseado nas equações de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Mather (1955) – escalas temporais e espaciais dos parâmetros analisados são distintas;
- Lei de Darcy (fluxo de água que passa em uma seção transversal (Q) = condutividade hidráulica do meio (K) X gradiente hidráulico (i) X área da seção transversal (A)), que usa da equação $Q=K*i*A$ além de medições diretas em campo. Assume condições de estado estacionário, ou seja, independentes do tempo;
- Método de traçadores naturais e/ou químicos;
- Método de modelagem numérica subterrânea – empírico;
- Método da variação do nível freático (WTF – *water table fluctuation*), relacionada à recarga média.

A adoção de uma metodologia é dependente dos resultados que almejam serem obtidos, além dos dados disponibilizados. Ademais, nenhum método é tão preciso que evite incertezas e erros associados. Algumas vantagens e desvantagens de cada método foram listadas na Tabela 4.

Tabela 4. Comparação entre metodologias distintas de recarga de aquíferos (Lerner et al., 1990).

Método	Vantagem	Desvantagem
Medidas diretas	<ul style="list-style-type: none"> - Toda a água de entrada é possível de ser contabilizada; - Viável em todos os ambientes; - Boa acurácia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muitos erros associados aos cálculos; - Custos altos; - Procedimento de longa duração.
Balanço hídrico	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização de dados disponíveis como precipitação, escoamento e nível d'água; - Acurácia moderada; - Viável em ambientes temperados, úmidos ou irrigáveis. - Custo baixo; - Procedimento rápido, se dados disponíveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Recarga é considerada como um valor residual, constituída por valores acumulados de erros; - Dificuldade de estimar evapotranspiração.
Lei de Darcy	<ul style="list-style-type: none"> - Quando combinada com a equação de conservação de massa, resulta em equação de fluxo; - Recomendável para fluxo saturado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Valores de condutividade hidráulica obtidos em laboratório distinguem dos obtidos em campo; - Não recomendável para fluxo insaturado (condutividade é mais sensível a variações, além do fator umidade); - Viabilidade limitada; - Baixa acurácia; - Custo alto; - Procedimento de longa duração.
Traçadores	<ul style="list-style-type: none"> - Traçadores ambientais podem ser utilizados em metodologias de assinatura isotópica e de balanço de massa; - Utilizado para cálculo de recarga total, precipitação e irrigação; - Acurácia boa a moderada; - Custo moderado; - Procedimento de duração moderada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersões dificultam o balanço de massa; - Não utilizado para cálculo de recarga de rio ou de viés urbano; - Não calcula fluxo d'água. - Erros associados químicos e físicos à determinação da recarga; - Aplicável em zonas não saturadas.
Modelo numérico	<ul style="list-style-type: none"> - Considera fluxo transiente e variações no armazenamento; - Considera a variabilidade espacial das propriedades físicas; - Método que mais se aproxima dos processos físicos da realidade, apesar de ser empírico; - Duração variável (de 1 a 24 meses). 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer muitos dados para cálculo; - Utiliza de programas computacionais custosos; - Viável em solos isotrópicos; - Modelo deve ser calibrado para boa acurácia; - Custo alto.
Variação do nível freático	<ul style="list-style-type: none"> - Melhor aplicabilidade em períodos curtos de tempo, em pequenas profundidades; - Pode analisar variação do clima e do uso da terra; - Maior sensibilidade das análises – boa acurácia; - Custo moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Subjetividade das análises gráficas; - Aquíferos profundos juntamente à dispersão não apresentam bons resultados; - Maior sensibilidade, pode alterar dados.

A partir disso, foi determinado o balanço hídrico do solo como metodologia mais apropriada ao presente estudo, uma vez que é um método clássico, rápido, menos custoso e é comumente utilizado por sua simplicidade. Além disso, todos os parâmetros necessários à determinação da recarga da região estudada encontram-se disponíveis e de fácil acesso. A tratar da dificuldade da estimativa da evapotranspiração real, a problemática pode ser resolvida a partir de metodologias como:

- as simplificações de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Mater (1955), com médias mensais e/ou diárias de temperaturas;
- método de Turc (1954), com precipitações anuais e médias de temperatura;
- método de Priestley e Taylor (1972), simplificado de Penman-Monteith;
- método de Thom e Oliver (1977), revisto de Penman-Monteith.
- método de Penman-Monteith (1965;1981), comumente utilizado porém requer muitos dados, por vezes não disponíveis com facilidade e/ou inexistentes.

Contudo, pela simplicidade dos cálculos e dados necessários e por dar sequência ao método utilizado na análise do balanço hídrico, adotou-se a metodologia de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Mater (1955) para o projeto.

6.2.1. Balanço hídrico de solo

A equação geral do balanço hídrico é baseada no princípio de conservação de massa, ou seja, a quantidade de água que entra menos a quantidade da saída deve ser igual ao armazenamento hídrico no solo (Wahnfried & Hirata, 2005). A equação (Eq. 1) é dada pela seguinte fórmula:

$$P = ETP + EXC + ARM \quad \text{Eq.1}$$

Segundo Thornthwaite & Mather (1955), P equivale à precipitação total mensal, ETP à evapotranspiração potencial mensal (Eq. 2), EXC ao excedente – referente ao escoamento superficial –, e ARM é relacionado ao armazenamento/infiltração, obtido através das características físicas do solo.

$$ETP = 16 \times (10T/I)^a \quad \text{Eq. 2}$$

A constante a e o índice de calor I podem ser determinados segundo as equações desenvolvidas pelo mesmo autor e aprimoradas por Vasconcelos (1999) nas equações 3, 4 e 5:

$$a = 0,0000006751I^3 - 0,0000771I^2 + 0,01792I + 0,49239 \quad \text{Eq. 3}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} I_i \quad \text{Eq. 4 e}$$

$$I_i = (T_i/5)^{1,514} \quad \text{Eq. 5}$$

sendo i referente aos meses, com valores de 1 a 12, e T relacionado à temperatura média anual, de 22,7°C, adotada como tal, uma vez que Thornthwaite (1948) e seus cálculos não sugerem correção para temperaturas abaixo de 26,5°C. A ETP é então corrigida por um fator b (Eq. 6) que leva em consideração a latitude da região, o fotoperíodo em horas (N) e o número de dias do mês (ND).

$$b = \left(\frac{ND}{30}\right) \times \left(\frac{N}{12}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

O produto do cruzamento das informações acima citadas em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) resultam em dados de escoamento superficial, que pode ser obtido pela

multiplicação entre o coeficiente de escoamento superficial (C') e a precipitação mensal (Wahnfried & Hirata, 2005), pelas equações 7 e 8,

$$EXC = C'P \quad \text{Eq. 7} \quad \text{onde:}$$

$$C' = \alpha C \quad \text{Eq. 8}$$

O balanço hídrico é então calculado levando em consideração a topografia, o uso e ocupação do solo e o tipo de solo da bacia hidrográfica do estudo. Deste modo, é possível determinar a recarga do aquífero, com base na equação 1, apesar das limitações de medições diretas e incertezas associadas aos fatores calculados.

Segundo De Vries & Simmers (2002), em regiões onde o clima úmido é predominante, o balanço hídrico tem sua incerteza atenuada no cálculo da recarga sendo, portanto, um método aplicável e confiável.

6.3. Método de descarga

O escoamento é analisado em três vertentes: escoamento superficial, sub-superficial e o subterrâneo. A parcela do escoamento responsável por alimentar o corpo d'água superficial, principalmente em épocas de estiagem, é a subterrânea. A mesma é analisada através do fluxo de base, que representa a porção de água proveniente de fontes perenes e de baixa variação (Dingman, 2002). Assim, o fluxo de base mantém a perenidade dos rios.

A medição de vazão em rios, normalmente é feita de forma indireta, ou seja, a partir da medição da velocidade e do nível d'água. O monitoramento sistemático destes elementos é realizado nas estações fluviométricas, onde são calculadas e registradas as séries históricas de vazões. As vazões, por sua vez, contabilizam todas as parcelas de contribuição do escoamento que chegam à seção de medição. Contudo, existem regiões onde não há estações de monitoramento fluviométrico, podendo as vazões serem determinadas através de estudos hidrológicos. Esses estudos permitem avaliar e definir a melhor metodologia para se gerar as vazões, em função da disponibilidade de estações fluviométricas na vizinhança, além de dados das características fisiográficas das bacias hidrográficas previamente definidas.

Entre os métodos de determinação de vazão em locais sem dados, os mais conhecidos são: transferência de vazões, estudos de regionalização de vazões, modelos chuva x vazão, entre outros (Collischonn & Dornelles, 2013).

Assim, com o escoamento medido, é possível realizar a distinção entre as parcelas superficial e subterrânea e, consequentemente, obter o volume de descarga do aquífero no rio. Algumas metodologias foram propostas para a separação do escoamento de base, considerando fatores hidrológicos e fisiológicos e equações de vazão (de escoamento subterrâneo e superficial direto):

a) método de filtros digitais (Furey e Gupta, 2001): refere-se à introdução de equações simples, do tipo $y_i = f_i + b_i$, onde i é o intervalo de tempo, e que permitem distinguir a porção do hidrograma referente ao escoamento subterrâneo;

b) método de análises químicas e traçadores (Gonzales *et al.*, 2009): baseia-se no conceito de que as águas subterrâneas e superficiais têm assinaturas químicas distintas ou que em um dado canal, se houve a injeção de um traçador, a diluição a jusante ocorrerá pela entrada de água da descarga de aquíferos;

c) método de análises gráficas (Custódio & Llamas, 1983): baseia-se na separação de hidrogramas através do traçado manual a partir de gráficos impressos – maior imprecisão atrelada aos cálculos.

A metodologia adotada ao projeto refere-se à aplicação do Filtro Digital Recursivo de Eckhardt. O método foi escolhido por sua facilidade de execução e pelos dados necessários, que estão disponíveis em estações fluviométricas.

6.3.1. Filtro de Eckhardt

A metodologia proposta por Eckhardt (2005) utiliza de equações simples que calculam o fluxo de base em um corpo d'água e permitem a distinção do escoamento em superficial e subterrâneo, a partir da vazão do rio. Seguindo a equação

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{Eq. 9}$$

com y equivalente à vazão do rio, f e b ao escoamento superficial e de base respectivamente e i ao intervalo de tempo, o autor aponta que muitos filtros podem ser genericamente calculados a partir de uma equação geral (Eq. 9), com A e B como parâmetros calculados. Contudo, devem se ater à restrição de que, para o mesmo intervalo de tempo, a vazão de base (Eq. 10) deve ser sempre menor ou igual à vazão total do rio ($b_i \leq y_i$).

$$b_i = A \times b_{i-1} + B \times y_i \quad \text{Eq. 10}$$

Os parâmetros A e B são calculados por meio da constante de recessão “ a ” e pelo parâmetro $BFImax$ (*Base Flow Index maximum*) respectivamente. O primeiro refere-se à descarga obtida em um dado intervalo temporal em períodos onde o escoamento superficial é nulo, sem ocorrência de precipitação. Segundo Domenico & Schwartz (1990), a recarga pode ser calculada nos períodos de recessão, e a constante “ a ” pode ser obtida por meio das equações 11 e 12

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q(t+\Delta t)}{Q(t)}\right)} \quad \text{Eq. 11} \quad \text{e}$$

$$a = e^{-\frac{\Delta t}{k}} \quad \text{Eq. 12}$$

em que k é a constante do período característico, obtido através dos valores de vazão e intervalo de tempo, e Q é a vazão. Já o parâmetro BFI, refere-se à razão entre o fluxo de base e a vazão total (Eq. 13), sendo BFImax o fator limitante do BFI e estabelecido por Collischonn e Tassi (2008) na Tabela 5. Segundo Collischonn & Fan (2012), a geologia da região influencia este parâmetro.

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N bi}{\sum_{i=1}^N yi} \quad \text{Eq. 13}$$

Tabela 5. Valores de BFImax (Collischonn e Tassi, 2008).

BFImax	Característica da bacia
0,80	rios perenes e aquíferos porosos
0,50	rios efêmeros ou intermitentes e aquíferos porosos
0,25	rios perenes e aquíferos impermeáveis

Por fim, para determinação de A e B (Eq. 14 e 15), e para a equação geral (Eq. 16) tem-se (Eckhardt, 2005):

$$A = \left(\frac{1-BFImax}{1-a \times BFImax} \right) \times a \quad \text{Eq. 14}$$

$$B = \frac{(1-a) \times BFImax}{1-a \times BFImax} \quad \text{Eq. 15}$$

$$bi = \frac{(1-BFImax) \times a \times b_{i-1} + (1-a) \times BFImax \times yi}{1-a \times BFImax} \quad \text{Eq. 16}$$

7. RESULTADOS OBTIDOS E DIFICULDADES ENCONTRADAS

A partir do início do projeto, o mesmo evoluiu na medida que se teve acesso e compreensão às metodologias utilizadas para o cálculo da recarga e da descarga e aos dados necessários para essas análises. A disponibilidade de uma série histórica de precipitação completa foi de difícil aquisição, sendo necessária a adoção do método do vetor regional para o preenchimento de lacunas e o método Thiessen para a obtenção de um valor médio para precipitação, por ter sido analisado mais um posto pluviométrico. A ausência de monitoramento de vazões e, por vezes, ausência de estação de monitoramento na bacia hidrográfica, também foi um obstáculo para a composição de um histograma para a região, o que restringiu a escolha dos métodos de análise da recarga.

A construção dos mapas necessários ao cálculo de recarga, atrelada ao próprio cálculo se deu de modo subsequente, abrangendo a área de estudo de forma geral. Um estudo detalhado de uso e ocupação do solo da região ocorreu de maneira a aprimorar a análise da recarga, além dos mapas relacionados, que permitiram a avaliação dos efeitos na recarga do aquífero livre.

A determinação da descarga se deu de modo subsequente ao cálculo da recarga, uma vez que o contratempo da falta de monitoramento e a qualidade insatisfatória encontrada para os dados de vazão levaram a um avanço lento nos cálculos necessários à descarga.

As atividades realizadas permitiram gerar os mapas, além de uma base de dados que caracterizam o clima da região e uma tabela de resultados oriundos do método de cálculo de recarga através do balanço hídrico do solo (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite & Mater, 1955), considerando uma bacia hidrográfica fechada e em equilíbrio dinâmico.

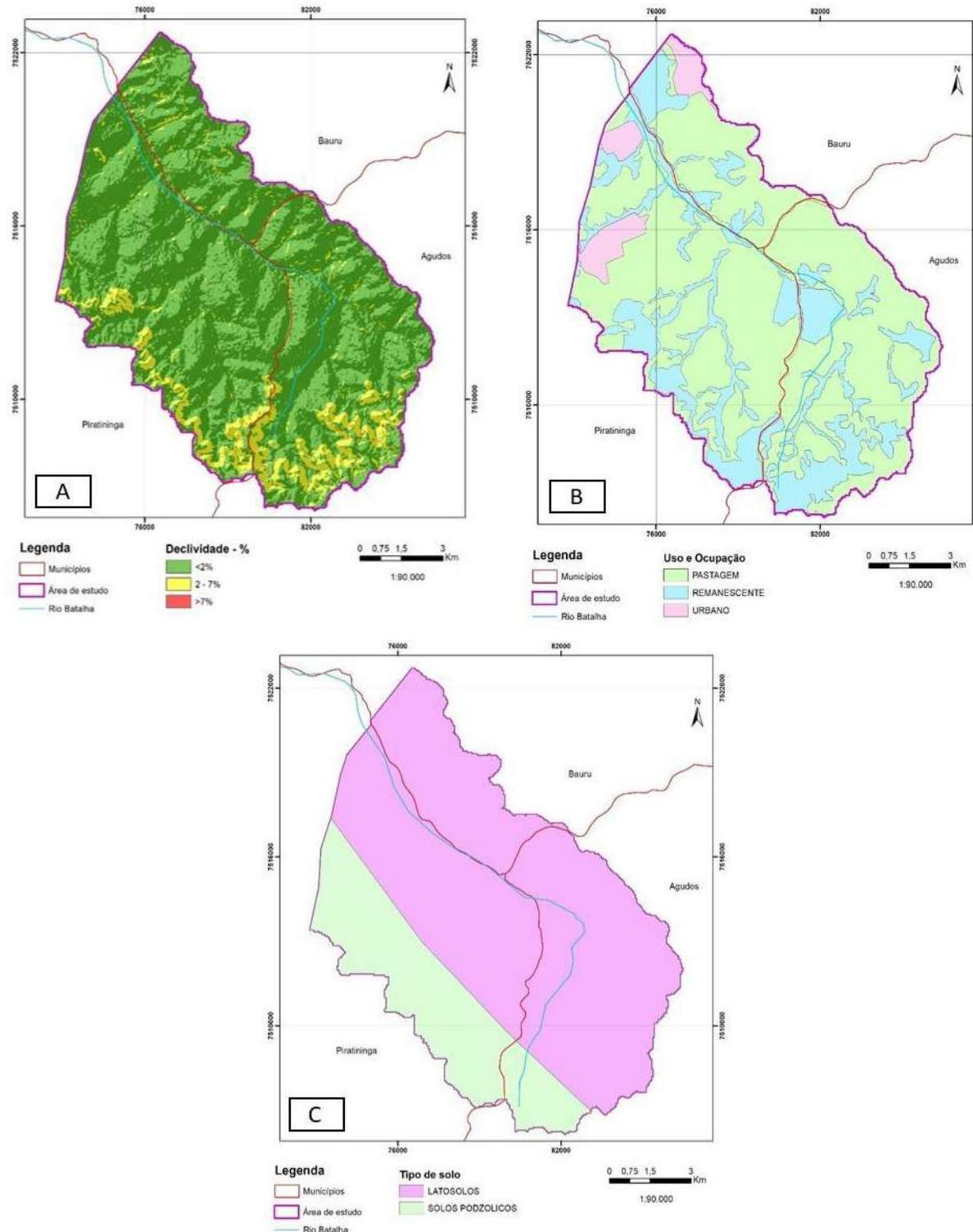


Figura 4. Declividade (A), uso e ocupação (B) e tipo de solo (C) da área de estudos.

O mapa de declividade (Figura 4A) ou modelo digital de terreno obtido foi construído a partir de uma imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) adquirida no site da USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos), e posteriormente foi extraída no software ArcGis 10.5 com a ferramenta *slope*. Os intervalos foram definidos segundo metodologia da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE, 1969), sendo eles: a) baixa declividade (<2%); b) declividade moderada (2 a 7%); e c) alta declividade (>7%).

Com base nas informações pedológicas disponibilizadas pela EMBRAPA, gerou-se um mapa com o predomínio de solos podzólicos (mais permeáveis) e latossolos (menos permeáveis) para a área (Figura 4C). A partir das características e percentuais de argila e/ou silte e areia que permitem a distinção entre solos argilosos e arenosos, o mapa foi reclassificado segundo a classificação de Ogrosky & Mockus (1964) para permeabilidade de solos: porções de predomínio de argila (latossolo) foram considerados com baixa capacidade de infiltração e porções com predomínio de areia (podzólicos), com alta capacidade de infiltração (maior permeabilidade).

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 4B), por sua vez, foi construído a partir de avaliações de imagens de satélite com auxílio do Google Earth e de dados fornecidos pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). O mapa foi melhor detalhado (Figura 5) a partir de validação de campo realizada, com a distinção das culturas existentes em eucalipto e cana de açúcar, além de pastagem, mata nativa, mata ciliar e área urbana., permitindo a classificação da área com base na capacidade de infiltração.

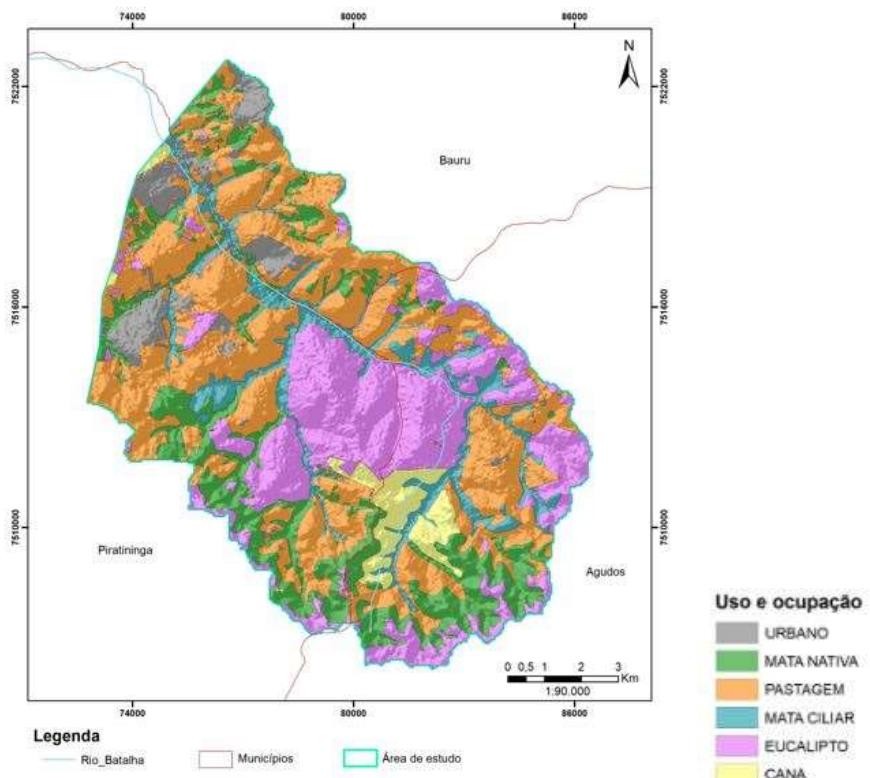


Figura 5. Uso e ocupação detalhado.

Com a transformação em *raster* dos três mapas gerados (uso e ocupação geral, declividade e tipo de solo) e georreferenciados no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000 em ArcGis 10.5 e com a utilização da ferramenta *intersect*, foi produzido um mapa que agrupa os três atributos, com a categorização de 16 classes (Figura 6).

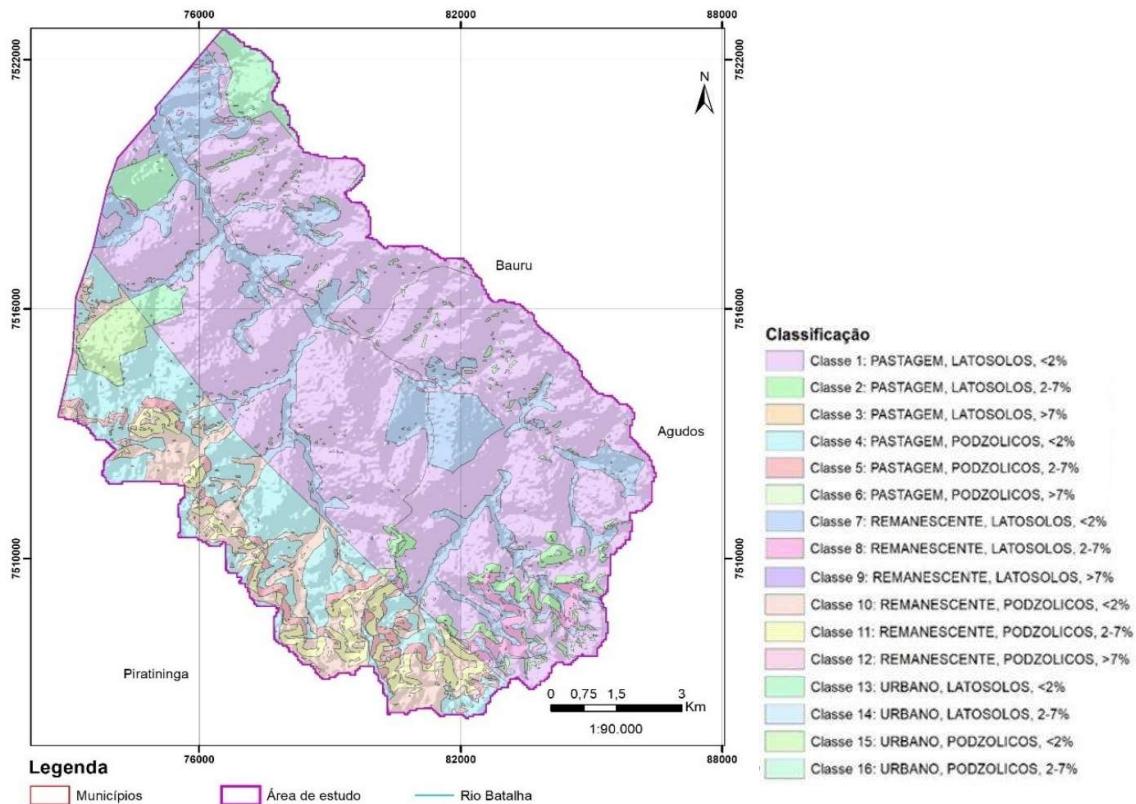


Figura 6. Junção dos três atributos compondo 16 classes geradas.

O mesmo foi feito com os mapas de declividade, tipo de solo e uso e ocupação detalhado, produzindo um mapa com 28 categorias distintas (Figura 7).

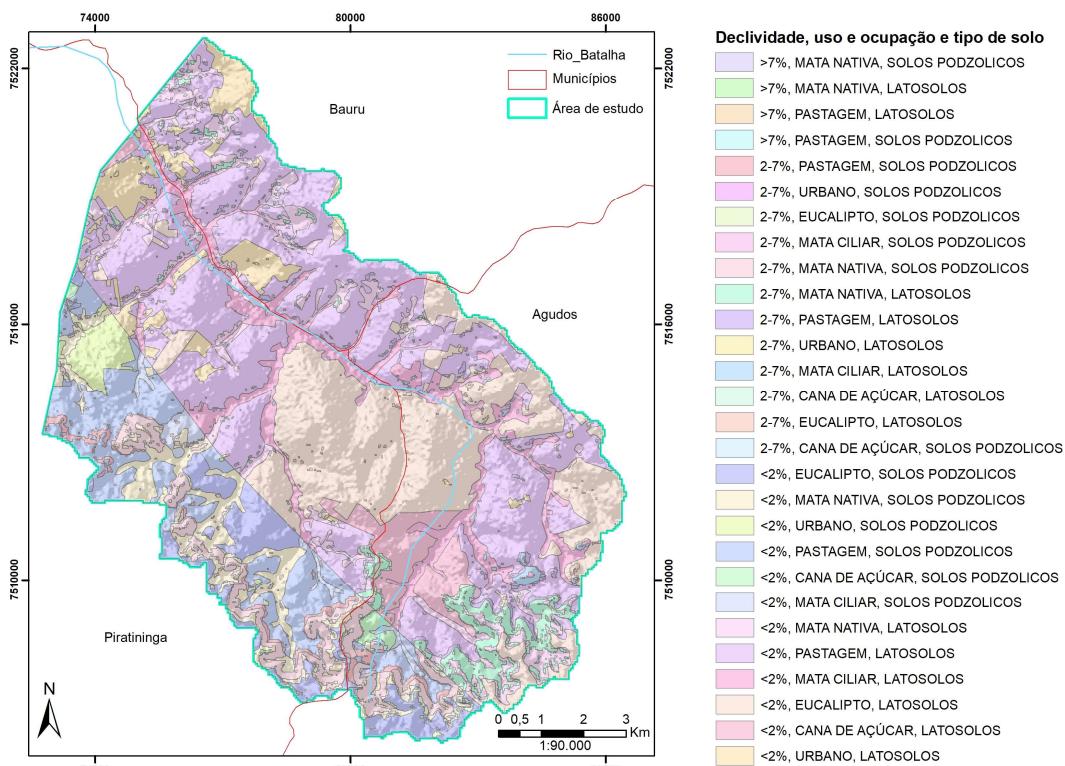


Figura 7. Classificação segundo a junção dos atributos, compondo 28 classes.

Assim, pôde-se calcular o coeficiente de escoamento (C), com base na classificação tabulada (Tabela 6) pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis (1969), dado por (Eq. 17):

$$C = 1 - (C'_1 + C'_2 + C'_3) \quad \text{Eq. 17}$$

em que C'_1 refere-se à permeabilidade do solo (argiloso ou arenoso), C'_2 ao uso e ocupação e C'_3 à declividade do terreno, obtendo-se 7 classes a depender do coeficiente de escoamento (Tabela 7). Em relação aos cultivos de eucalipto e cana de açúcar, os coeficientes de escoamento são dados por 0,6 e 0,5, respectivamente (Ramachandra *et al.*, 2014).

Tabela 6. Parâmetros para o cálculo de escoamento superficial.

TIPO DE ÁREA	C'_1	TIPO DE ÁREA	C'_2	TIPO DE ÁREA	C'_3
Argiloso	0,1	Remanescente/Mata nativa	0,2	<2%	0,3
Siltoso	0,2	Pastagem/Urbano/Mata ciliar	0,1	2-7%	0,2
Arenoso	0,3			>7%	0,1

Tabela 7. Reclassificação dos tributos gerados (declividade, uso e ocupação e tipo de solo) com base nos coeficientes de escoamento.

C	Classes – Figura 6	Classes – Figura 7
0,1	classe 10	classe 18
0,2	classe 4, 11, 15	classe 9, 19, 20, 22
0,3	classe 5, 12, 16	classe 5, 6, 8
0,4	classe 6, 7	classe 1, 4, 23
0,5	classe 1, 8, 13,	classe 10, 14, 16, 21, 24, 25, 27, 28
0,6	classe 2, 9, 14	classe 7, 11, 12, 13, 15, 17, 26
0,7	classe 3	classe 2, 3

A classificação com base no coeficiente de escoamento superficial também pode ser obtida matematicamente por meio da multiplicação dos dados de precipitação pelos coeficientes de escoamento.

Uma planilha foi construída para cada categoria de escoamento superficial (com C de 0,1 a 0,7), com base nos resultados de infiltração (precipitação subtraída do escoamento superficial), déficit e excesso de água no solo (infiltração subtraída da precipitação), evapotranspiração real (precipitação subtraída do déficit de água) e percolação (precipitação subtraída da variação da capacidade de campo do solo, para quando a variação for positiva). Considerou-se a capacidade de campo do solo para a região como 125 mm, segundo características do solo e vegetação (Koerner & Daniel, 1997; Canadá, 2005).

Com os valores de percolação gerados (Anexo), a região foi então classificada segundo as seguintes faixas de intervalos de recarga:

- menor que 25 mm/ano;
- de 25 a 50 mm/ano;
- de 50 a 100 mm/ano;
- maior que 100 mm/ano

Assim, origina-se um mapa de recarga da região (Figura 8), categorizado segundo taxas de recarga, setorizado em 4 classes.

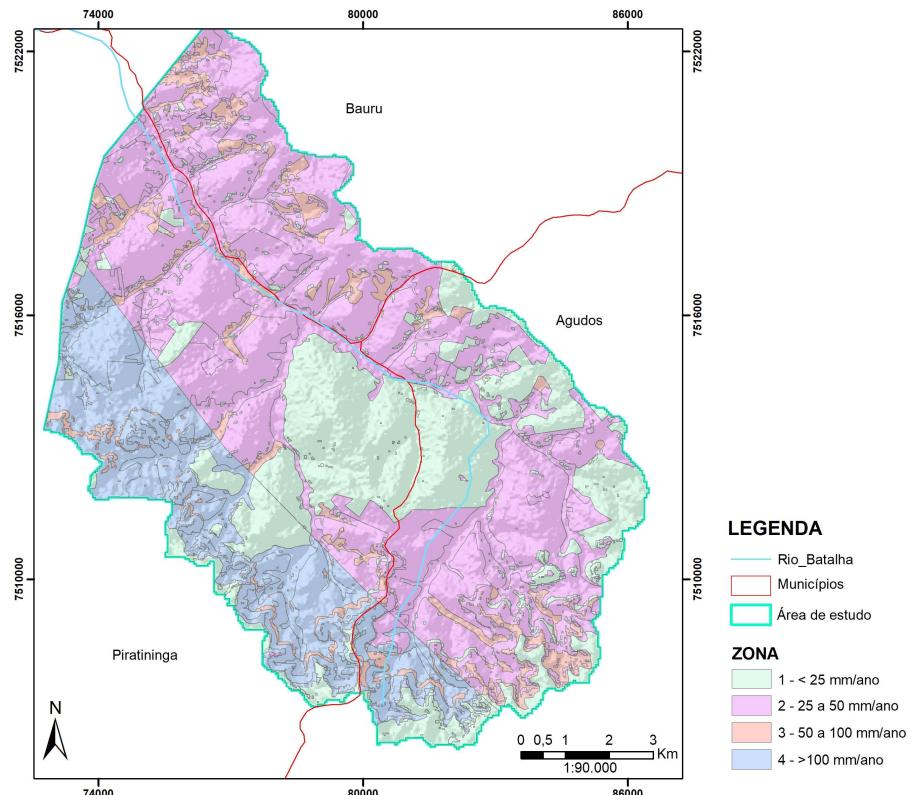


Figura 8. Recarga do aquífero na área de estudo através do método de balanço hídrico no solo.

Com o objetivo de caracterizar os efeitos das mudanças climáticas no presente trabalho, foram considerados alguns cenários a partir das seguintes hipóteses:

- aumento na temperatura média anual de 1 a 4°C;
- variação de 20 a 50% na precipitação média anual (aumento nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro e diminuição nos meses de menor precipitação – abril, maio, junho, julho, agosto e setembro);

A diferença entre a recarga atual e as simuladas (Tabelas 8 e 9) foram analisadas sob o ponto de vista climático, e não considerando o uso e ocupação, visto apenas o cultivo de eucalipto ter forte influência no coeficiente de escoamento.

Tabela 8. Comparações entre a recarga atual e as geradas a partir da mudança de temperatura média anual (precipitação média anual de 1.373,4 mm).

C	Recarga atual (mm)	+ 1°C (mm)	+ 2°C (mm)	+ 3°C (mm)	+ 4°C (mm)
0,1	173,8	143,8	112	80,7	54,5
0,2	122,5	97,6	72,7	51,9	25,7
0,3	76,3	60,2	43,9	23,1	0
0,4	44,3	31,4	15,1	0	0
0,5	15,5	2,7	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0
0,7	0	0	0	0	0

Tabela 9. Comparações entre a recarga atual e as geradas a partir da variação da precipitação média mensal.

C	Recarga atual (mm)	Variação de 20% – (mm)	Variação de 30% – (mm)	Variação de 40% – (mm)	Variação de 50% – (mm)
		Precipitação anual – 1.436,8 mm	Precipitação anual – 1.557,7 mm	Precipitação anual – 1.731,7 mm	Precipitação anual – 1.905,7 mm
0,1	173,8	417,3	572,3	728,9	885,5
0,2	122,5	278,7	416,5	555,7	694,9
0,3	76,3	173,6	260,8	382,6	504,4
0,4	44,3	98,5	148,8	209,4	313,8
0,5	15,5	44,0	70,0	106,5	150,0
0,6	0	9,5	21,1	32,7	53,0
0,7	0	0	0	0	1,1

Por fim foi calculado o escoamento de base, a partir do método dos filtros de Eckhardt. A partir da série histórica de vazões do rio Batalha, no posto fluviométrico Reginópolis, foi possível calibrar o modelo chuva x vazão SMAP e desta forma gerar uma série de vazões médias mensais na seção de captação do rio Batalha. Este estudo foi desenvolvido pela Dra. Silvana Susko Marcellini para uma pesquisa em paralelo na mesma região. O hidrograma das vazões médias mensais geradas a partir do modelo SMAP é apresentado na Figura 9. O gráfico apresenta a vazão média gerada, a vazão de base, representada pela contribuição de água subterrânea, além da precipitação média na área da bacia hidrográfica. Juntamente com

a metodologia adotada, tem-se então que a vazão média observada do rio Batalha na seção de captação de Bauru é de 1,60 m³/s. O tempo de recessão admitido para cálculo da constante do período característico k foi de 120 dias, considerando o período entre a última vazão de recessão (Q(t + Δt)) e a primeira vazão da recessão (Q(t)), dada em sua maioria de abril a julho. As vazões Q(t+Δt) e Q(Δt) médias calculadas foram de 1,13 e 2,64 m³/s, respectivamente. Deste modo, tem-se os valores das constantes k e "a" (Tabela 10):

Tabela 10. Constantes obtidas com o método do Filtro de Eckhardt.

K	a
146,81	0,43

Ademais, o BFI_{max} foi adotado como 0,80, de acordo com as características da bacia, e o escoamento base no instante i-1 é de 0,93 m³/s. Assim, o escoamento de base b_i, segundo o método dos Filtros de Eckhardt é de 1,23 m³/s.

Para comparação com os valores de recarga obtidos pelo método do balanço hídrico do solo, foi calculada a taxa de recarga aquífera (TR em mm/ano), segundo a equação 18, em que "b" é a média dos valores de vazão de base (m³/s) e A é a área da bacia em m². Os valores 1.000 e 31.622.400 são fatores de conversão: de metros para milímetros e de segundos para ano, respectivamente.

$$TR = \frac{b}{A} \times 1000 \times 31622400 \quad \text{Eq. 18}$$

Deste modo, a taxa de recarga aquífera segundo a metodologia hidrológica resultou em 310,89 mm/ano.

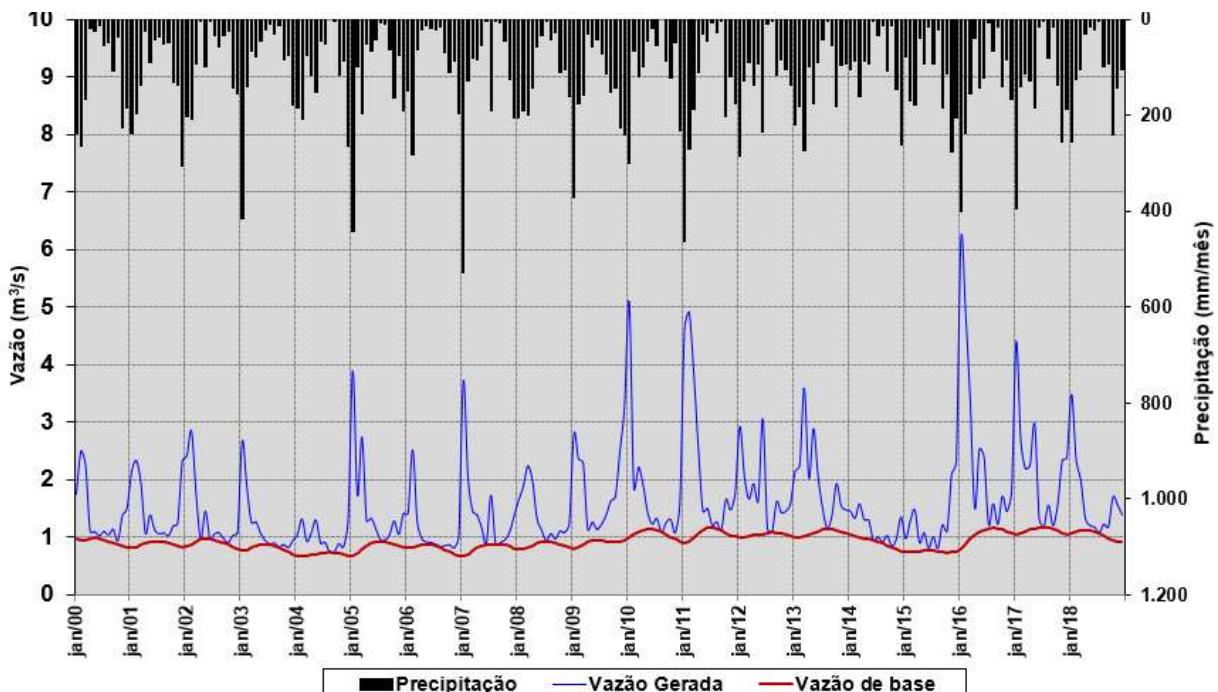


Figura 9. Hidrograma de vazões médias mensais geradas segundo modelo SMAP – Rio Batalha, de janeiro de 2000 a dezembro de 2018.

8. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, observa-se que na área de estudo há o predomínio de ocupação rural, com grandes áreas de pastagem e cultivo de eucalipto e pequenas áreas de plantação de cana de açúcar, assim como mata ciliar e mata nativa. A parcela urbana é a de menor expressão na área de estudo.

Pelo mapa geológico (Figura 2), nota-se o predomínio da Formação Adamantina, unidade aquífera explotável para abastecimento, em relação à Formação Marília.

A permeabilidade do aquífero é espacialmente heterogênea, com a porção sudoeste mais permeável comparada à porção nordeste. No que tange a topografia, a área apresenta-se como de baixa declividade (<2%). A partir do mapa de escoamento superficial, nota-se o predomínio da classe 1, em que dominam baixas declividades, numa área de latossolo e de pastagem/eucalipto.

O mapa da Figura 6 revela 16 classes distintas que, quando agrupadas segundo o coeficiente de escoamento, é possível determinar 7 classes (de $C = 0,1$ à $C = 0,7$) para o cálculo da percolação. O mapa da Figura 7, por sua vez, gerado a partir do mapa de uso e ocupação detalhado, apresenta 28 classes que quando agrupadas segundo o coeficiente de escoamento, revela as mesmas 7 classes (de 0,1 a 0,7) do primeiro mapa. Assim, identifica-se a relação de que quanto menor o coeficiente de escoamento, menor é o escoamento superficial e a taxa de evapotranspiração e maior é o valor de percolação. O mesmo raciocínio vale para taxas altas de coeficiente de escoamento (menores são as taxas de percolação e maiores são as taxas de escoamento superficial e evapotranspiração).

No que tange à recarga da região de estudo, a grande parte é dominada por faixas de 25 a 50 mm/ano (zona 2), com porções menores à sudoeste (> 100 mm/ano – zona 4), correspondentes ao solo podzólico e porções ainda localizadas com recarga intermediária (50 a 100 mm/ano – zona 3). O que chama a atenção dentre as diversas classes geradas no mapa de escoamento superficial de maior detalhe é o fato de que as porções onde há predomínio de eucalipto, o coeficiente de escoamento superficial é entre 0,6 e 0,7, apresentando os menores valores de recarga (zona 1). Outra ressalva se faz na porção em que há predomínio de solos podzólicos, correlacionando-se a zona de maior recarga (zona 4).

Tendo a região uma topografia aproximadamente homogênea e de predomínio de área vegetada, o fator que influencia a recarga é também o uso e ocupação do solo.

A zona 1 apresenta as menores taxas de recarga, com 0 mm de percolação, uma vez que é composta por áreas de solo de menor permeabilidade. Em específico, essa zona coincide com a porção de declividade moderada, reduzindo a percolação.

A zona 2 representa a porção de recarga relacionada ao latossolo, tipo de solo pouco permeável, com percolação de 15,5 e 44,3 mm, o que implica numa percolação menor e, consequentemente, menor recarga.

A zona 3 coincide com a porção de floresta remanescente onde há o predomínio de latossolo, significando o aumento da percolação, com 76,3 mm, mas não o suficiente para ser maior do que a porção de floresta remanescente em solos podzólicos.

Por fim, a zona 4 reflete áreas com maior recarga, com 122,5 e 173,8 mm, apresentando solo de maior permeabilidade e maior percolação, além de haver o predomínio de matas ciliares e matas nativas, além de pastagens.

A outra análise realizada foi a aplicação do Filtro de Eckhardt que considerou as vazões geradas na seção de captação de Bauru, resultando um valor de recarga de aproximadamente 311 mm. A diferença observada entre esta metodologia e a apresentada pelo método do balanço hídrico, conforme apresentado acima, pode ser explicada pelo fato de que o balanço hídrico leva em conta as características espaciais da bacia hidrográfica de forma semi-distribuída. Por sua vez, o método do Filtro de Eckhardt calcula a recarga com base na análise das vazões geradas (no período de 2000 a 2018) na seção de captação do rio Batalha, conforme ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11. Variável considerada segundo seu método.

Método do balanço hídrico do solo	Método dos Filtros de Eckhardt
Coeficiente de escoamento superficial	Vazão gerada no ponto de captação
Uso e ocupação do solo	Escoamento de base
Declividade	Área da bacia hidrográfica

A metodologia do balanço hídrico, por considerar dados simples, disponíveis e de fácil acesso, tornam o cálculo amplamente utilizado, apesar das limitações do método, que consistem na simplicidade, imprecisão e generalização dos dados e cálculos. Já segundo o método dos Filtros de Eckhardt, os dados disponíveis para análise requerem trabalho dos mesmos para compor uma série histórica completa e fiel à situação da bacia. Contudo, os cálculos não consideram aspectos fisiográficos da região, levando em conta apenas o comportamento hidráulico do rio Batalha. Cabe considerar que as vazões utilizadas foram geradas a partir de um modelo chuva x vazão, ou seja, carrega incertezas inerentes ao procedimento. Para que a avaliação fosse mais precisa, a vazão do rio Batalha na seção da captação de Bauru deveria ser monitorada.

Por fim, segundo os valores de recarga obtidos a partir dos possíveis efeitos das mudanças climáticas globais apontados nas tabelas 8 e 9, nota-se que o contexto da variação apenas da precipitação média mensal (Figura 10) para cada coeficiente de escoamento superficial da

área de estudo ($C = 0,1$ a $0,7$) ocasiona em maiores valores de recarga quando comparado a recarga atual, enquanto a situação do aumento apenas da temperatura média anual (Figura 11), para cada coeficiente, leva a uma diminuição da recarga atual. Nota-se que quanto maiores os coeficientes, menores as recargas associadas, por vezes chegando a 0 mm/ano.

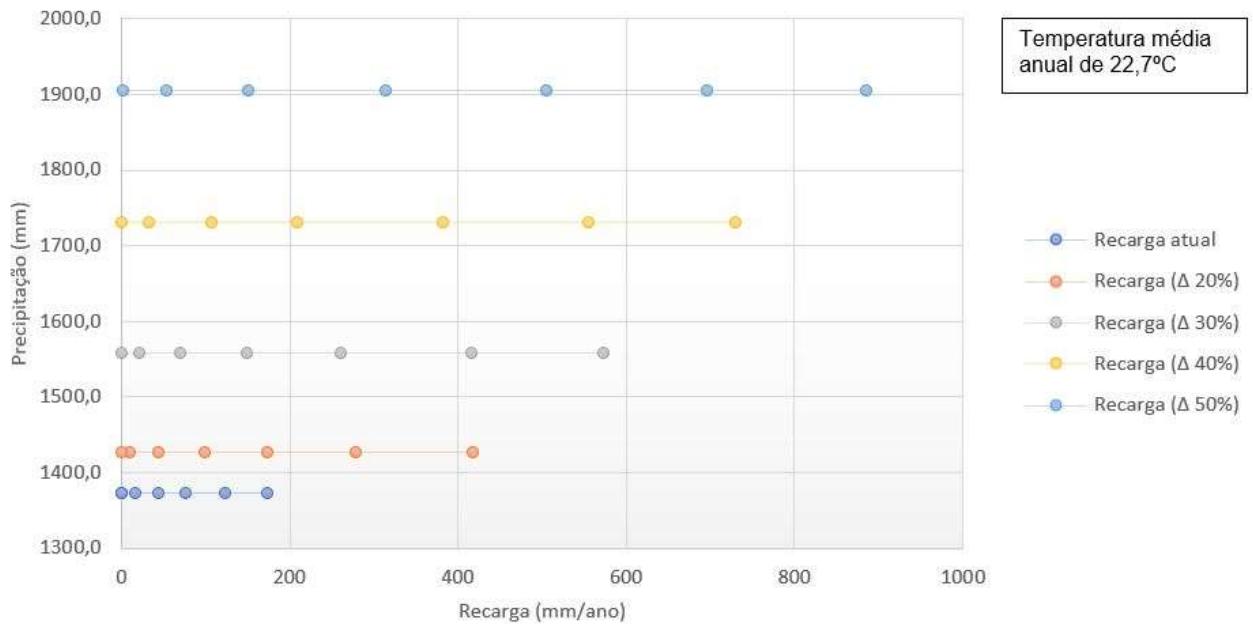


Figura 10. Aumento da recarga com a variação da precipitação média mensal, de acordo com os coeficientes de escoamento superficial ($C=0,1$ a $0,7$).

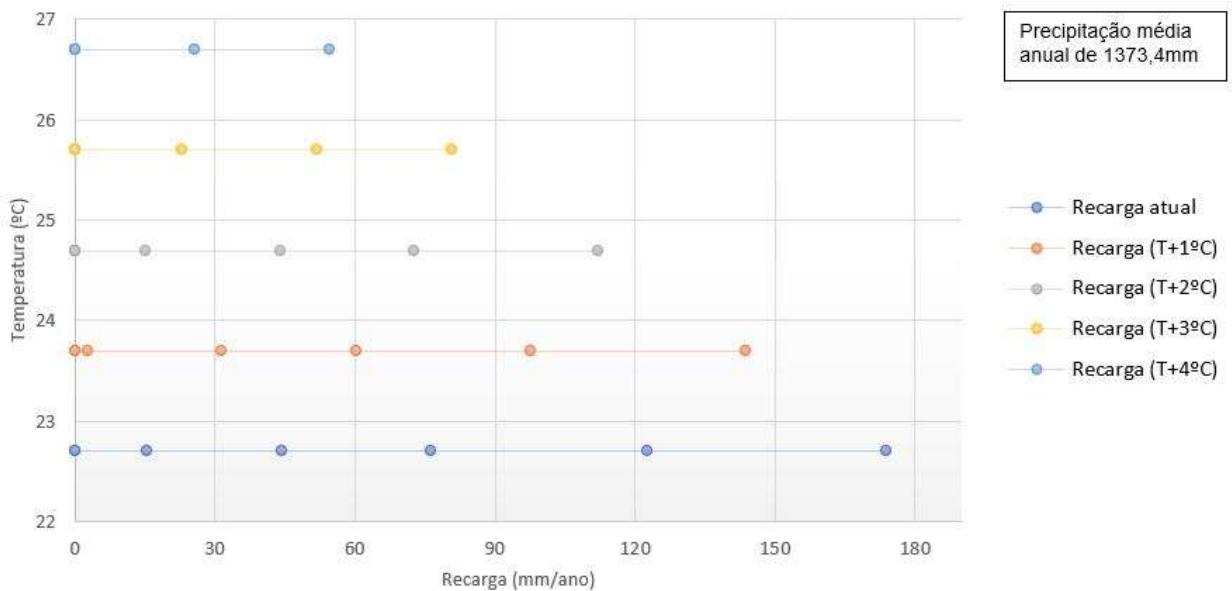


Figura 11. Diminuição da recarga com a variação da temperatura média mensal, de acordo com os coeficientes de escoamento superficial ($C=0,1$ a $0,7$).

9. CONCLUSÕES

Os dados e resultados aqui reunidos permitem concluir que:

1. A metodologia do balanço hídrico, por considerar dados simples, disponíveis e de fácil acesso, tornam o cálculo amplamente utilizado, além de permitir classificar a recarga com base em três atributos: uso e ocupação, declividade e tipo de solo. Contudo, o cálculo da evapotranspiração se mostrou sensível a mudanças climáticas, sendo melhor indicado ao cálculo da recarga métodos mais robustos, que utilizam maior quantidade e complexidade de dados, que resultam em valores de recarga mais precisos e confiáveis. Segundo o método dos Filtros de Eckhardt, os dados disponíveis para análise requerem trabalho dos mesmos para compor uma série histórica completa e fiel à situação da bacia. Os valores obtidos segundo cada método foram de 432,4 mm/ano e 310,7 mm/ano, respectivamente. Apesar das limitações de cada método, como a simplicidade e generalidade dos cálculos para o balanço hídrico e a sensibilidade da vazão de recessão para o método dos filtros, ambos resultaram em valores coerentes com a realidade. Essa diferença mostra que as duas metodologias são válidas e podem ser utilizadas para se complementarem. Uma vez que a recarga é mais precisa pelo método dos Filtros por considerar dados de maior precisão obtidos *in situ*, o seu valor pode ser utilizado para calibrar a recarga obtida pelo método do balanço hídrico, o que permite a integração entre águas superficiais e subterrâneas, com a hidrologia e a hidrogeologia avaliadas simultaneamente. Deste modo, o melhor método para cálculo da recarga é o dos Filtros.

2. Os resultados de recarga obtidos pelo método do balanço hídrico do solo, por considerarem aspectos geomorfológicos e de uso e ocupação do solo, resultam na setorização da área de estudo, com base na recarga. Deste modo, as zonas favoráveis a maior recarga são as porções definidas por baixa a moderada declividade (<2% a 2-7%), com solos podzólicos e coberturas florestais e pastagens. As áreas menos adequadas a percolação de águas superficiais estão relacionadas a combinações de maiores declividades (>7%), solos com menor permeabilidade (argilosos no caso) e cultivo de eucalipto e áreas urbanas, que não permitem ou reduzem a infiltração de água. Essa combinação afeta a capacidade de campo do solo, e reflete na redução das taxas de recarga.

3. Além do mais, segundo o método do balanço hídrico, como dois dos três parâmetros que influenciam a recarga são imutáveis – declividade e solo da área – resta ao uso e ocupação a sugestão do melhor dos cenários para captação contínua do rio Batalha sem ocasionar em secas prolongadas. Sugere-se então a conscientização da mudança de parte da ocupação e do uso pelo replantio da mata nativa. O cultivo de cana e, principalmente, eucalipto desfavorecem a percolação das águas subterrâneas, de mesmo modo que a ocupação urbana, deixando a superfície próxima da impermeabilidade. De acordo com o método dos Filtros e, considerando o cenário das possíveis mudanças climáticas globais, é possível observar que se o tempo de recessão for maior, atrelado a uma diminuição das vazões do rio, o escoamento de base diminuirá e, por consequência, a recarga da região. Assim, para que a captação das águas superficiais possa acompanhar as variações da

recarga futuramente, sugere-se a conscientização no uso das águas coletadas para abastecimento para que a escassez e/ou seca não atinja a área.

4. Ademais, distintos cenários foram analisados, atrelados às mudanças climáticas globais: com o aumento de 1°C até 4°C na temperatura, com variações de recarga máxima de 335,7 a 80,2 mm/ano, respectivamente e aumento no predomínio da mínima de 0 mm na área; e também aumento de 10% a 50% na precipitação nos meses de maior chuva e diminuição de 10% a 50% nos períodos de seca, gerando recargas que variam de 1.021,6 a 2.602,7 mm/ano. Deste modo, os possíveis cenários de mudanças climáticas globais devem ser considerados para a disponibilidade hídrica futura e ao abastecimento de Bauru.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA FILHO, G. S. (2000). *Diagnóstico de processos erosivos lineares associados a eventos pluviosos no município de Bauru, SP*. Tese (Mestrado). Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.
- ANDREO, B.; VÍAS, J. M.; DURÁN, J. J.; JIMÉNEZ, P.; LÓPEZ-GETA, J.A.; CARRASCO, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16, 911–925.
- ASCE — American Society of Civil Engineers. (1969). Task force on effect of urban development on flood discharges, committee on flood control: effect of urban development on flood discharges — current knowledge and future needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 95 (HY1), 287–309
- ASSINE, M. L., PIRANHA, J. L., CARNEIRO, C. D. R. (2004). Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: V. M. Neto, A. Bartorelli, C. D. Carneiro, B. B. Brito-Neves (Coords.), *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (77-92). São Paulo: Beca.
- BERTOL, G. A. (2007). *Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais*. Tese (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências, UFMG.
- C3 – PLANEJAMENTO CONSULTORIA E PROJETO LTDA. (2015). Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP - Relatório Técnico. Bauru: 2015.
- CAETANO-CHANG, M.R. (1997). *A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo*. Tese (Livre Docência). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- CAMPOS, A. F. DE; ROSTIROLA, S. P.; BARTOSZECK, M. K; ROMEIRO, M. A. T.; FERREIRA, F. J. F.; CHANG, H. K. (2008). Correlação de dados sísmicos multiescala e

- integração com arcabouço tectônico regional: exemplo da área do Domo de Piratininga, SP. *Revista Brasileira de Geologia*, 38 (2), 18-28.
- CANADÁ. Ministry of Agriculture. (2005). Soil water storage capacity and available soil moisture. *Water Conservation FACTSHEET*, Order No. 619.000-1, Revised in June 2015.
- CANATO, H. M. (2014). *Hidrogeoquímica do Aquífero Adamantina na área urbana do município de Bauru/SP*. Tese (Mestrado). Bauru: Engenharia Civil e Ambiental, UNESP.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. (2008). *Introduzindo Hidrologia*. Porto Alegre: IPH UFRGS,
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. (2012). Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Dflow Filter. *Hydrological Processes*, 27(18), 2614-1622.
- COLLISCHONN, W. & DORNELLES, F. (2013). *Hidrogeologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- CÔRTES, A., & PERINOTTO, J. A. (2015). Fácies e associação de fácies da Formação Piramboia na região de Descalvado (SP). *Geologia USP*, 15(3/4), 23-40.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). Relaciones entre las escorrentias superficial y subterrânea. In: E. Custódio, M. R. Llamas (2 Ed.), *Hidrogeología subterránea*, (1121-1157). Barcelona: Omega.
- DINGMAN, S.L. (2002). *Physical Hydrology*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (1976). *Estudo de águas subterrâneas: regiões administrativas 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba* (108ª ed.). São Paulo: ENCO.
- DE VRIES, J. J. & SIMMERS, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5-17.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Singapore: John Wiley & Sons.
- ECKHARDT, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19, 507-515.
- FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. (2001). A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research*, 37(11), 2709-2722.
- GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UHLENBROOK, S. (2009). Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 3483-3515.
- HEALY, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. UK: Cambridge University Press.
- HORNERO, J.; MANZANO, M.; ORTEGA, L.; CUSTODIO, E. (2016). Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcadozo Aquifer System (SE Spain). *Science of The Total Environment*, 568, 415-432.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2000). Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes para

- a elaboração do Plano de Bacia Hidrográfica do Pardo – Relatório Final. Relatório nº 40.670, 367.
- KOERNER, R. M., DANIEL, D. E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. Reston: ASCE Press & Thomas Telford.
- LERNER, D.N., ISSAR, A.S. & SIMMERS, I. (1990). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge (International Contributions to Hydrogeology)*. Hannover: Verlag Heinz Heise.
- LUCAS, M.C.; GUANABARA, R.C; WENDLAND, E. (2012). Estimating groundwater recharge in the outcrop area of the Guarani Aquifer System. *Boletín Geológico y Minero*, 123, 311-323.
- MANCUSO, M.A.; CAMPOS, J.E. (2005). Aquífero Bauru. In: G. ROCHA (coord.) *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*, (30-38). Escala 1:1.000.000. São Paulo: CPRM.
- MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. (2004). O magmatismo toléítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A; CARNEIRO, A. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Ed.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (245-264). São Paulo: Beca.
- MONTANHEIRO, T. J.; ARTUR, A. C.; MONTANHEIRO, F.; NEGRI, F. A.; GESICKI, A. L.; BOGGIANI, P. C. (2011). Investigação tecnológica de arenitos silicificados da Formação Botucatu (NE do Paraná) para uso como rocha de revestimento. *Revista Geociências*, 30 (2), 237-251.
- MONTEITH, J.L. (1965). Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- MONTEITH, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107, 1-27.
- OBUOBIE, E. et al. (2012). Groundwater level monitoring and recharge estimation in the White Volta River basin of Ghana. *Journal of Africa Earth Sciences*, 71-72, 80-86.
- OGROSKY, H. O.; MOCKUS, V. (1964). Hydrology of Agricultural Lands. IN: V. T. Chow, V. (2^a Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, (1-97). Nova Iorque: McGraw Hill.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K. & CAETANO-CHANG, M. R. (2003). Perfis de referência do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. *Geociências*, 22 (1), 127-139.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. (2005). Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Geociências*, 35(1), 77-88.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M. R.; STRADIOTO, M. R. (2006). Sucessão sedimentar do Grupo Bauru na região de Pirapozinho (SP). *Geociências*, 25 (1), 17-26.
- PRANDI, E. (2010). *Gestão integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas Bacias Hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe/SP*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.

- PRIESTLEY, C. H. B. & TAYLOR, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92.
- RAMACHANDRA T. V.; SUBASH CHANDRAN M. D.; JOSHI N. V.; VINAY S.; BHARATH H. A.; HEGDE, G.; Kulkarni, G. (2014). Water bodies of Uttara Kannada district. *Sahyadri Conservation Series*, 44(81).
- ROSENBERGER, M.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; FERREIRA, L. M. R.; ODA, G. H.; VIOTTI, M. (2013). Vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do município de Bauru (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 34(2), 51-67.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrology Journal*, 10(1), 18-39.
- SETZER, J. (1966). Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo. *Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai*, 61.
- SHS – CONSULTORIA E PROJETOS DE ENGENHARIA S/S LTDA. (2008). Diagnóstico ambiental e dos recursos hídricos do município de Bauru: relatório técnico. Bauru: 2008.
- SILVA, F. C. (2007). *Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em macro-escala numa bacia hidrográfica: o caso do Alto Rio Parnaíba*. Tese (mestrado). Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.
- SILVA, S. R. (2009). *Caracterização hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani no município de Bauru*. Tese (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Meio Ambiente, UNESP.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FULFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. (1980). Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Geociências*, 10(3), 177-185.
- SOPHOCLEOUS, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67.
- STRADIOTO, M. R. (2007). *Hidrogeoquímica e aspectos diagenéticos do sistema aquífero Bauru na região sudoeste do Estado de São Paulo*. Tese (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- THOM, A. S. & OLIVER, H. R. (1977). On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103, 345-357.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, JR. (1955). *The Water Balance*. Nova Jersey: Drexel Institute of Technology.
- TURC, L. (1954). Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, 491-595.
- VASCONCELOS, S. M. S. (1999). *Recarga do aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, CE*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP.

- VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. (2010). Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 31(1/2), 1-21.
- WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. (2005). Comparação dos métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). *Revista Brasileira dos Recursos Hídricos*, 10 (1), 15-25.
- XU, Y.; BEEKMAN, H. E. (2003). *Groundwater recharge estimation in Southern Africa*. Paris: UNESCO IHP.

ANEXO – Cálculo da percolação

Tabela A.1. Percolação para C = 0,1.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Escoamento Superficial (mm)	28,8	17,4	13,7	7,0	8,1	4,4	3,8	3,6	6,3	11,6	13,5	19,2	137,3
Infiltração (mm)	259,0	156,7	123,7	63,3	72,6	39,3	34,2	32,2	56,8	104,1	121,3	172,8	1236,0
IN-PET (mm)	130,6	38,1	5,1	-29,8	11,1	-13,9	-18,8	-34,9	-25,2	1,4	9,4	44,3	-
Perda de água acumulada (mm)	0,0	0,0	0,0	-29,8	0,0	-13,9	-32,7	-67,7	-92,9	-91,4	0,0	0,0	-
Capacidade de campo do solo (mm)	125,0	125,0	125,0	97,4	108,5	94,6	80,8	60,3	48,8	49,4	58,8	103,1	-
Variação do FC (mm)	0,0	0,0	0,0	-27,6	11,1	-13,9	-13,8	-20,5	-11,5	0,6	9,4	44,3	-
Déficit de água (mm)	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	5,0	14,4	13,7	0,0	0,0	0,0	35,3
Evapotranspiração real (mm)	128,4	118,6	118,7	90,9	61,4	53,2	48,0	52,7	68,3	102,6	111,9	128,5	1083,3
Percolação (mm)	130,6	38,1	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	173,8

Tabela A.2. Percolação para C = 0,2.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-
Escoamento Superficial (mm)	57,6	34,8	27,5	14,1	16,1	8,7	7,6	7,2	12,6	23,1	27,0	38,4	274,7
Infiltração (mm)	230,2	139,3	110,0	56,3	64,5	35,0	30,4	28,6	50,5	92,5	107,8	153,6	1098,7
IN-PET (mm)	101,8	20,7	-8,7	-36,8	3,1	-18,3	-22,6	-38,5	-31,5	-10,1	-4,1	25,1	-
Perda de água acumulada (mm)	0,0	0,0	-8,7	-45,5	0,0	-18,3	-40,9	-79,4	-110,9	-121,1	-125,2	0,0	-
Capacidade de campo do solo (mm)	125,0	125,0	116,2	85,4	88,4	75,9	62,8	45,5	34,9	32,1	31,0	56,1	-
Variação do FC (mm)	0,0	0,0	-8,8	-30,9	3,1	-12,6	-13,1	-17,3	-10,5	-2,8	-1,1	25,1	-
Déficit de água (mm)	0,0	0,0	0,1	6,0	0,0	5,7	9,5	21,2	20,9	7,3	3,0	0,0	73,7
Evapotranspiração real (mm)	128,4	118,6	118,6	87,1	61,4	47,5	43,5	46,0	61,0	95,3	108,9	128,5	1044,9
Percolação (mm)	101,8	20,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	122,5

Tabela A.3. Percolação para C = 0,3.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Escoamento Superficial (mm)	86,3	52,2	41,2	21,1	24,2	13,1	11,4	10,7	18,9	34,7	40,4	57,6	412,0
Infiltração (mm)	201,4	121,9	96,2	49,2	56,4	30,6	26,6	25,1	44,2	80,9	94,3	134,4	961,3
IN-PET (mm)	73,0	3,3	-22,4	-43,8	-5,0	-22,6	-26,4	-42,1	-37,8	-21,7	-17,6	5,9	-
Perda de água acumulada (mm)	0,0	0,0	-22,4	-66,3	-71,3	-93,9	-120,4	-162,4	-200,2	-221,9	-239,5	0,0	-
Capacidade de campo do solo (mm)	125,0	125,0	103,6	71,7	68,8	56,9	45,6	32,0	23,3	19,5	16,8	22,7	-
Variação do FC (mm)	0,0	0,0	-21,4	-31,9	-2,9	-11,9	-11,3	-13,6	-8,7	-3,9	-2,7	5,9	-
Déficit de água (mm)	0,0	0,0	1,0	12,0	2,1	10,8	15,1	28,5	29,1	17,8	14,9	0,0	131,3
Evapotranspiração real (mm)	128,4	118,6	117,7	81,1	59,4	42,5	37,9	38,6	52,9	84,8	97,0	128,5	987,3
Percolação (mm)	73,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	76,3

Tabela A.4. Percolação para C = 0,4.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-
Escoamento Superficial (mm)	115,1	69,6	55,0	28,1	32,2	17,5	15,2	14,3	25,2	46,2	53,9	76,8	549,3
Infiltração (mm)	172,7	104,5	82,5	42,2	48,4	26,2	22,8	21,5	37,9	69,4	80,9	115,2	824,0
IN-PET (mm)	44,3	-14,1	-36,2	-50,9	-13,0	-27,0	-30,3	-45,7	-44,1	-33,3	-31,0	-13,3	-
Perda de água acumulada (mm)	0,0	-14,1	-50,3	-101,2	-114,2	-141,2	-171,5	-217,2	-261,3	-294,5	-325,6	-338,9	-
Capacidade de campo do solo (mm)	125,0	111,0	82,0	53,5	48,0	38,3	29,7	20,3	14,0	10,6	8,2	7,3	-
Variação do FC (mm)	0,0	-14,0	-29,0	-28,5	-5,5	-9,7	-8,6	-9,4	-6,3	-3,4	-2,4	-0,9	-
Déficit de água (mm)	0,0	0,2	7,1	22,4	7,5	17,3	21,7	36,2	37,9	29,9	28,6	12,4	221,2
Evapotranspiração real (mm)	128,4	118,4	111,5	70,7	53,9	36,0	31,4	30,9	44,1	72,8	83,3	116,0	897,4
Percolação (mm)	44,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,3

Tabela A.5. Percolação para C = 0,5.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Escoamento Superficial (mm)	143,9	87,1	68,7	35,2	40,3	21,9	19,0	17,9	31,6	57,8	67,4	96,0	686,7
Infiltração (mm)	143,9	87,1	68,7	35,2	40,3	21,9	19,0	17,9	31,6	57,8	67,4	96,0	686,7
IN-PET (mm)	15,5	-31,5	-49,9	-57,9	-21,1	-31,4	-34,1	-49,2	-50,4	-44,8	-44,5	-32,5	-
Perda de água acumulada (mm)	0,0	-31,5	-81,5	-139,4	-160,5	-191,9	-225,9	-275,2	-325,6	-370,4	-414,9	-447,4	-
Capacidade de campo do solo (mm)	125,0	96,0	63,2	38,9	32,6	25,0	18,8	12,5	8,2	5,6	3,9	2,9	-
Variação do FC (mm)	0,0	-29,0	-32,8	-24,3	-6,3	-7,5	-6,2	-6,4	-4,3	-2,6	-1,7	-0,9	-
Déficit de água (mm)	0,0	2,5	17,1	33,6	14,8	23,9	27,8	42,9	46,1	42,3	42,8	31,6	325,4
Evapotranspiração real (mm)	128,4	116,1	101,6	59,5	46,6	29,4	25,2	24,3	35,8	60,4	69,1	96,9	793,2
Percolação (mm)	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,5

Tabela A.6. Percolação para C = 0,6.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-
Escoamento Superficial (mm)	172,7	104,5	82,5	42,2	48,4	26,2	22,8	21,5	37,9	69,4	80,9	115,2	824,0
Infiltração (mm)	115,1	69,6	55,0	28,1	32,2	17,5	15,2	14,3	25,2	46,2	53,9	76,8	549,3
IN-PET (mm)	-13,3	-48,9	-63,7	-65,0	-29,2	-35,8	-37,9	-52,8	-56,7	-56,4	-58,0	-51,7	-
Perda de água acumulada (mm)	-13,3	-62,2	-125,9	-190,9	-220,0	-255,8	-293,6	-346,5	-403,2	-459,6	-517,6	-569,3	-
Capacidade de campo do solo (mm)	111,8	74,2	43,5	25,2	19,8	14,7	10,7	6,9	4,3	2,7	1,6	1,1	-
Variação do FC (mm)	111,8	-37,6	-30,7	-18,3	-5,5	-5,1	-4,0	-3,8	-2,6	-1,6	-1,0	-0,6	-
Déficit de água (mm)	125,1	11,3	33,0	46,7	23,7	30,6	33,9	49,0	54,1	54,8	57,0	51,1	570,3
Evapotranspiração real (mm)	3,3	107,3	85,7	46,4	37,7	22,6	19,2	18,1	27,8	47,8	54,9	77,4	548,3
Percolação (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A.7. Percolação para C = 0,7.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média de PPT (mm)	287,8	174,1	137,5	70,4	80,6	43,7	38,0	35,8	63,1	115,6	134,8	192,0	1373,4
Média de T (°C)	24,6	25,1	24,5	23,1	19,9	19,4	19,2	20,7	22,2	23,4	24,0	24,7	-
ETP (mm)	128,4	118,6	118,7	93,1	61,4	53,2	53,1	67,2	82,0	102,6	111,9	128,5	1118,6
Coeficiente de escoamento C	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	-
Escoamento Superficial (mm)	201,4	121,9	96,2	49,2	56,4	30,6	26,6	25,1	44,2	80,9	94,3	134,4	961,3
Infiltração (mm)	86,3	52,2	41,2	21,1	24,2	13,1	11,4	10,7	18,9	34,7	40,4	57,6	412,0
IN-PET (mm)	-42,1	-66,4	-77,4	-72,0	-37,2	-40,1	-41,7	-56,4	-63,0	-67,9	-71,5	-70,9	-
Perda de água acumulada (mm)	-42,1	-108,4	-185,8	-257,8	-295,1	-335,2	-376,8	-433,3	-496,3	-564,3	-635,7	-706,6	-
Capacidade de campo do solo (mm)	87,9	50,4	26,3	14,4	10,5	7,5	5,3	3,3	2,0	1,1	0,6	0,3	-
Variação do FC (mm)	87,9	-37,5	-24,1	-11,9	-3,9	-3,0	-2,2	-2,0	-1,4	-0,8	-0,5	-0,3	-
Déficit de água (mm)	129,9	28,9	53,4	60,1	33,4	37,1	39,4	54,4	61,7	67,1	71,0	70,6	706,9
Evapotranspiração real (mm)	-1,5	89,7	65,3	33,0	28,0	16,1	13,6	12,7	20,3	35,5	40,9	57,9	411,7
Percolação (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0