



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA
FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JULIENE RODRIGUES DOS SANTOS

**RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM ÁREA DE
AFLORAMENTO EM BOFETE-SP ENTRE 2012 E 2016**

Ilha Solteira
2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS

JULIENE RODRIGUES DOS SANTOS

**RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM ÁREA DE
AFLORAMENTO EM BOFETE-SP ENTRE 2012 E 2016**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre: em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA.

Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione

FICHA CATALOGRÁFICA

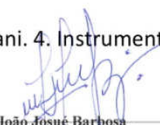
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237r Santos, Juliene Rodrigues dos.
Recarga do sistema aquífero guarani em área de afloramento em bofete-sp entre 2012 e 2016 / Juliene Rodrigues dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018 101 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos, Ciências Ambientais, 2018

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia

1. Recarga. 2. Águas subterrâneas. 3. Aquífero Guarani. 4. Instrumentos da política de recursos hídricos.


João Josué Barbosa,
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA RECARGA DE AQUÍFEROS: ÁREA DE AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANI NA REGIÃO DE BOFETE-SP, ENTRE 2012 E 2016


AUTORA: JULIENE RODRIGUES DOS SANTOS

ORIENTADOR: RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS - PROFÁGUA, área: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP



Prof. Dr. JOSÉ TADEU GARCIA TOMMASELLI
Departamento de Geografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. EMÍLIO CARLOS PRANDI
Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo / Marília (SP)

Ilha Solteira, 03 de setembro de 2018

DEDICATÓRIA

A todos os seres, em especial Gaia, a Mãe Terra.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

A Deus por colocar tudo na hora devida, com as pessoas certas. Ao meu orientador o Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione, pela pessoa e profissional dedicado e fantástico, que é um exemplo para minha vida, muita gratidão!

Por todo amor e carinho que recebo dos meus familiares que sempre me acompanharam, acreditando no meu potencial. Minha irmã e amiga Francine, que me compreende e está sempre disposta a me ajudar. Ao meu pai Leopoldo. Em especial minha mãe Maria Izilda, que abdicou de inúmeras possibilidades de vida para criar e educar as filhas, por todas as vezes que ela limpou e cozinhou para que eu pudesse estudar e trabalhar, sendo um exemplo de mulher de valores, forte, alegre e generosa, a quem devo muito do que sou.

Aos meus amigos de diversos lugares, que me auxiliam e alegram, me dão forças, tornando a jornada mais leve e prazerosa. Em especial aos amigos da graduação na UFABC que ampliaram meus horizontes, aos quais sempre amarei. Minhas amigas que conheci na escola e me acompanharam na vida. Meus amigos do mestrado, que foram um tesouro pelo qual eu não esperava encontrar, principalmente Luiz Rafael, Polyana, Aline, Fernanda, Carlos Diego, Érico. E a todos os docentes, que dedicaram seu tempo acreditando em nossa competência.

A todos meus colegas do DAEE, que sempre apoiaram e contribuíram em meus estudos, pela oportunidade de conviver com profissionais extremamente inteligentes, humildes e dispostos, sobretudo a Eng^a Seica Ono, Diretora da Bacia do Alto Tietê, uma mulher inspiradora. Destaco aqui meus colegas da unidade de Mogi das Cruzes, que preenchem meus dias com risadas e companheirismo, sempre com muita sabedoria conseguem transformar tudo em positividade e alegria.

A todos os contribuintes brasileiros, que proporcionaram recursos para meus estudos em uma universidade pública de alta qualidade, e que infelizmente muitas

vezes não têm acesso às informações, nem a oportunidade de possuir uma graduação.

“É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir.”
(SATER; TEIXEIRA, 1990)

RESUMO

A recarga é um parâmetro necessário para o sistema de gestão em recursos hídricos como subsídio ao controle de outorga e planos de bacia. Apesar disso, a dinâmica de recarga das águas subterrâneas contém alta complexidade e sua quantificação é de difícil obtenção quando comparada com medições de águas superficiais, que conta com métodos mais acessíveis. Contudo, através da utilização de modelagens, foi possível progredir em metodologias para solucionar ou estimar as informações referentes ao recurso hídrico subterrâneo. Uma das metodologias mais aplicadas para o cálculo da recarga em aquíferos livres é o método *Water Table Fluctuation (WTF)*, que estima o valor da recarga através da variação de nível do aquífero e com dados de precipitação local. Assim foi realizado o cálculo da estimativa de recarga da área de afloramento do Aquífero Guarani, no Estado de São Paulo, município de Bofete. Os valores de recarga de aquífero encontrados foram em torno de 30% a 48% das precipitações, mostrando a relação das águas meteóricas com as subterrâneas. Os resultados foram discutidos no escopo da integração da recarga das águas subterrâneas nos planos de bacia, mostrado como essa informação pode ser utilizada por agências reguladoras e comitês de bacias.

Palavras-chave: Recarga. Águas subterrâneas. Aquífero Guarani.

ABSTRACT

Groundwater recharge is a necessary parameter for water resources management as the foundation for giving water use rights and watershed management plans. Unfortunately, groundwater dynamics are highly complex and its quantification is difficult to obtain as compared to surface water, which can use more accessible methods. However, through the use of models, it is possible to use multiple methodologies to determine information on groundwater resources. One of the most applied methodologies for calculating the recharge of unconfined aquifers is the Water Table Fluctuation (WTF) method, which can be used to calculate the level variation of the aquifer using local precipitation data. In the state of São Paulo in the municipality of Bofete, the accumulation of the recharge area of the Guarani Aquifer was calculated. The aquifer recharge values were found to be around 30% to 48% of the total precipitation, showing the relation between the meteorological water and the groundwater. The results were discussed in the scope of groundwater recharge integration in watershed plans, showing how this information can be used by regulatory agencies and watershed committees.

Keywords: Recharge. Groundwater. Guarani Aquifer.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Representação esquemática do ciclo hidrológico. | 17 |
| Figura 2 - Perfis esquemáticos dos aquíferos no Estado de São Paulo..... | 19 |
| Figura 3 - Representação esquemática do SAG e o zoneamento. | 22 |
| Figura 4 – Representação esquemática de localização do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Brasil). | 23 |
| Figura 5 - Aquífero confinado, superfície potenciométrica e artesianismo..... | 24 |
| Figura 6 - Localização do município de Bofete no Estado de São Paulo. | 26 |
| Figura 7 - Representação esquemática dos municípios inseridos na área de afloramento (e recarga) do aquífero Guarani - SP. | 27 |
| Figura 8 - Mapa de Relevo do município de Bofete. | 29 |
| Figura 9 - Relevo suave que predomina no município de Bofete. | 30 |
| Figura 10 - Morro das Três Pedras - Morros testemunhos e escarpas. | 30 |
| Figura 11 - Morro de Bofete. | 31 |
| Figura 12 - Captação para abastecimento urbano em Bofete, Córrego do Tanque. . | 32 |
| Figura 13 - Localização do aterro sanitário, a ETE, e o ponto de captação de água superficial no Córrego do Tanque, no Município de Bofete..... | 33 |
| Figura 14 - Localização no mapa dos postos de medição e serviços de saneamento no município de Bofete..... | 45 |
| Figura 15 - Localização dos postos de medição e serviços de saneamento no município de Bofete, em imagem de satélite..... | 46 |
| Figura 16 - Hidrógrafa hipotética de um poço, demonstrando a obtenção do valor de ΔH | 48 |
| Figura 17 - Precipitação Acumulada e Anomalias de precipitação, ano de 2014..... | 51 |
| Figura 18 - Precipitação Acumulada e Anomalias de precipitação, ano de 2015..... | 52 |
| Figura 19 - Elementos relevantes ao transporte de umidade na América do Sul para um verão normal ou climatológico (A) e para um verão seco de 2014 (B)..... | 53 |
| Figura 20 - Séries da estação pluviométrica E5-064 em Bofete, nos meses de verão, no período de 2012 a 2016. | 55 |
| Figura 21 - Séries da estação pluviométrica E5-016 em Bofete, nos meses de verão, no período de 2012 a 2016. | 55 |
| Figura 22 – Série de dados da estação pluviométrica E5-064 acumulado anual..... | 57 |
| Figura 23 - Série de dados da estação pluviométrica E5-016 acumulado anual..... | 58 |
| Figura 24 – Gráfico do monitoramento piezométrico no município de Bofete nos anos de 2012 a 2016. | 60 |
| Figura 25 - Gráfico das precipitações e piezometria no município de Bofete entre os anos de 2012 a 2016..... | 60 |
| Figura 26 - Gráfico da evapotranspiração no município de Bofete entre os anos de 2004 a 2010. | 61 |
| Figura 27 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2012..... | 65 |
| Figura 28 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2012). | 65 |
| Figura 29 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2013..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2013)..... | 69 |
| Figura 31 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2014..... | 73 |
| Figura 32 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2014)..... | 73 |
| Figura 33 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2015..... | 77 |
| Figura 34 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2015)..... | 77 |
| Figura 35 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2016..... | 81 |
| Figura 36 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2016)..... | 81 |
| Figura 37 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2016..... | 82 |
| Figura 38 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2016)..... | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados locais do poço de monitoramento. | 44 |
| Tabela 2 - Estatísticas do rendimento específico de 17 estudos..... | 47 |
| Tabela 3 - Dados médios para o solo tipo arenosos. | 50 |
| Tabela 4 - Tipo de cultura e valores de z. | 50 |
| Tabela 5 - Classificação dos anos com El Niño e La Niña por intensidade, de acordo com os valores do índice ONI, de 1972 a 2016..... | 54 |
| Tabela 6 - Valores de precipitação acumulada anual em Bofete – SP, estação pluviométrica E5-064..... | 56 |
| Tabela 7 - Estatísticas de precipitação no município de Bofete, estação pluviométrica E5-064 nos anos de 2012 a 2016. | 56 |
| Tabela 8 - Estatísticas de precipitação no município de Bofete, estação pluviométrica E5-016 nos anos de 2012 a 2016. | 58 |
| Tabela 9 - Níveis piezométricos no município de Bofete nos anos de 2012 a 2016. | 59 |
| Tabela 10 - Valores de Evapotranspiração acumulados anuais - município de Bofete. | 61 |
| Tabela 11 - Precipitação nos meses do ano de 2012. | 62 |
| Tabela 12 - Média da temperatura nos meses do ano de 2012. | 62 |
| Tabela 13 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano 2012. | 63 |
| Tabela 14 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2012. | 64 |
| Tabela 15 - Média da precipitação nos meses do ano de 2013. | 66 |
| Tabela 16 - Média da temperatura nos meses do ano de 2013. | 66 |
| Tabela 17 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2013. | 67 |
| Tabela 18 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2013. | 68 |
| Tabela 19 - Média da precipitação nos meses do ano de 2014. | 70 |
| Tabela 20 - Média da temperatura nos meses do ano de 2014. | 71 |
| Tabela 21 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2014. | 71 |
| Tabela 22 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2014. | 72 |
| Tabela 23 - Média da precipitação nos meses do ano de 2015. | 74 |
| Tabela 24 - Média da temperatura nos meses do ano de 2015. | 75 |
| Tabela 25 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2015. | 75 |
| Tabela 26 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2015. | 76 |
| Tabela 27 - Média da precipitação nos meses do ano de 2016. | 78 |
| Tabela 28 - Média da temperatura nos meses do ano de 2016. | 79 |

| | |
|---|----|
| Tabela 29 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2016. | 79 |
| Tabela 30 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2016. | 80 |
| Tabela 31 - Valores de recarga anual - município de Bofete. | 83 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| APRM-SAG | Área de Proteção e Recuperação de Mananciais – Sistema Aquífero Guarani |
| CAD | Capacidade de Água Disponível no Solo |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CIIAGRO | Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas |
| CLAPs | Comissões Locais de Apoio ao Projeto Piloto |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| DAEE | Departamento de Águas e Energia Elétrica |
| EL | <i>El Niño</i> |
| ESPERE | <i>Estimation de La Pluie Efficace et de La Recharge</i> |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgotos |
| FF | Frentes Frias |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| JBN | Jato de Baixos Níveis |
| LN | <i>La Niña</i> |
| ONI | <i>Oceanic Niño Index</i> |
| PERH | Política Estadual de Recursos Hídricos |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos |
| RIMAS | Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas |
| SABESP | Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo |
| SAG | Sistema Aquífero Guarani |
| SEADE | Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados |
| SIAGAS | Sistema de Informações de Águas Subterrâneas |
| UGRHI | Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” |
| WTF | <i>Water Table Fluctuation</i> |
| XLSTAT | <i>Statistical Software for Microsoft Excel</i> |
| ZCAS | Zona de Convergência do Atlântico Sul |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 - Método do Balanço Hídrico | 35 |
| Equação 2 - Lei de Darcy | 36 |
| Equação 3 - <i>Water Table Fluctuation</i> | 47 |
| Equação 4 - Capacidade Máxima de Água Disponível | 50 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVOS DA PESQUISA | 16 |
| 2.1 | OBJETIVOS GERAIS | 16 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 3.1 | NOÇÕES GERAIS SOBRE AQUÍFEROS | 17 |
| 3.2 | O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI | 21 |
| 3.3 | ÁREA DE AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANI NO ESTADO DE SÃO PAULO | 23 |
| 3.4 | MUNICÍPIO DE BOFETE – SP | 26 |
| 3.5 | CONSIDERAÇÕES SOBRE RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS | 34 |
| 3.6 | GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS | 37 |
| 3.7 | A RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO FERRAMENTA DOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS | 42 |
| 4 | METODOLOGIA | 43 |
| 4.1 | DADOS DISPONÍVEIS | 43 |
| 4.2 | MODELAGEM PROPOSTA | 46 |
| 4.3 | BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO THORTHWAITE E MATHER | 49 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 5.1 | ANÁLISE CLIMÁTICA E PLUVIOMÉTRICA NO PERÍODO ENTRE 2012 A 2016 | 51 |
| 5.2 | ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA EM BOFETE | 55 |
| 5.3 | BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO THORTHWAITE E MATHER | 61 |
| 5.3.1 | Balanço hídrico ano 2012 | 62 |
| 5.3.2 | Balanço hídrico ano 2013 | 66 |
| 5.3.3 | Balanço hídrico ano 2014 | 70 |
| 5.3.4 | Balanço hídrico ano 2015 | 74 |
| 5.3.5 | Balanço hídrico ano 2016 | 78 |
| 5.4 | CÁLCULO DA RECARGA LOCAL | 83 |
| 6 | CONCLUSÕES | 88 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 89 |

| | | |
|-----|--|-----------|
| 7.1 | PROPOSTA DE INTRODUIZIR INFORMAÇÕES SOBRE A RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E GESTÃO DE AQUÍFEROS NOS PLANOS DE BACIA A NÍVEL ESTADUAL..... | 89 |
| 7.2 | NORMATIVA..... | 91 |
| 7.3 | CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA E QUESTÕES ABERTAS | 91 |
| | REFERÊNCIAS..... | 93 |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade sempre esteve atrelado ao manejo dos recursos naturais, do mesmo modo a utilização das águas subterrâneas é antiga, com indícios desde a pré-história (MANZIONE, 2015). Antigos filósofos gregos intuíaam sobre o ciclo hidrológico e a interação das águas subterrâneas com as superficiais (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). No entanto, apenas no século XVII que a ideia de interação entre as águas superficiais e subterrâneas tornou-se clara (CLEARY, 2007).

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), a água subterrânea representa 97% da água disponível doce, apesar de sua contribuição e importância, sempre foi “desconhecida e misteriosa”, despertando o interesse dos profissionais de diversas áreas. Além de geólogos há engenheiros, biólogos, físicos, agrônomos, entre outros, que atuam e contribuem para o seu conhecimento e utilização (MANZIONE, 2015).

No Brasil o interesse surgiu devido às necessidades de abastecimento de água nas regiões secas, e a partir disso surgiram as atividades técnicas em torno das águas subterrâneas (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Usualmente os dados de água subterrânea são obtidos através de perfurações e técnicas de alto custo econômico, ao contrário do que ocorre com as águas superficiais, que dispõe de métodos mais fáceis e baratos (CLEARY, 2007). Com o desenvolvimento da tecnologia foi possível progredir em metodologias de software digitais, para solucionar, modular ou estimar os problemas das águas subterrâneas. Entretanto, o usuário deve ter entendimento e consciência do tipo de modelagem e do problema que deseja resolver (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Um dos desafios a serem solucionados é estimar a taxa de recarga do aquífero. A recarga depende de diversas variáveis no tempo e espaço do sistema aquífero em questão, de sua localização, do clima local, pluviosidade, geologia, entre outros. Assim é um parâmetro difícil de medir e até mesmo de estimar (LUCAS, 2012).

Há diferentes métodos de realizar a estimativa da recarga das águas subterrâneas, contudo o comportamento não é linear, salvo no caso de tendências de longo prazo. O modelo da oscilação da superfície livre do aquífero, *Water Table Fluctuation (WTF)*, assume que a elevação no nível freático tem relação com a

recarga do aquífero, utilizando parâmetros de tempo e rendimento específico do local (MANZIONE, 2015).

Essa análise da recarga auxilia na gestão de recursos hídricos, pois suas estimativas podem fornecer dados sobre o volume que poderá ser captado de modo sustentável, indicando possíveis ameaças aos recursos hídricos e a relação das precipitações com as águas subterrâneas (FERDOWSIAN; PANNELL, 2009).

Outro ponto importante é a ocupação das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) para agricultura, devido à fragilidade do solo e do potencial contaminante de produtos químicos da zona saturada do aquífero (GOMES et al., 2006).

O presente estudo propõe a discussão de como os dados de recarga das águas subterrâneas podem contribuir para uma gestão de recursos hídricos mais efetiva, visto o aumento do uso de águas subterrâneas, principalmente no Estado de São Paulo, onde os reservatórios e mananciais superficiais não atendem mais as demandas da população e há uma grande porcentagem de utilização das águas subterrâneas (HIRATA et al., 2015).

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Analisar o padrão de recarga do Aquífero Guarani a partir de estimativas em área de afloramento no Estado de São Paulo, município de Bofete, para fornecer subsídios aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos para um gerenciamento mais eficiente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

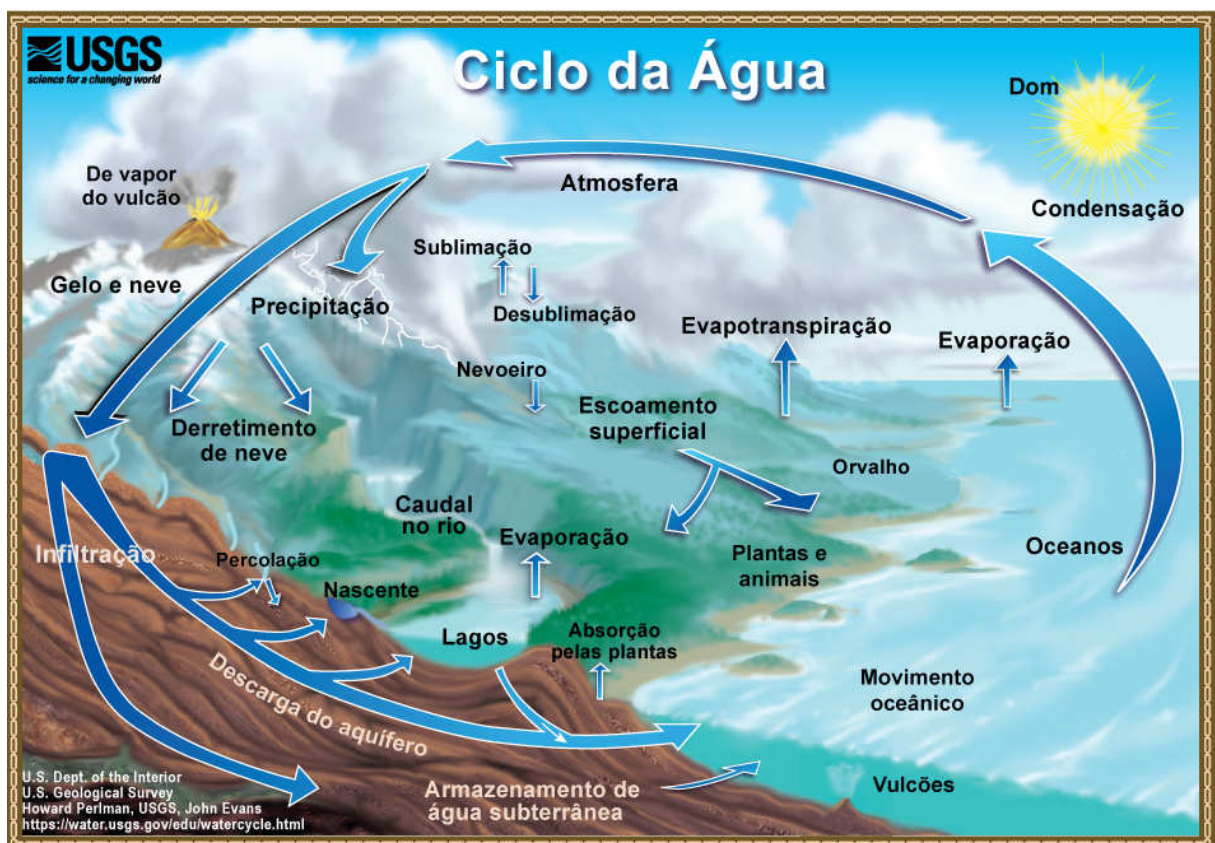
- Avaliar níveis piezométricos e pluviométricos no município de Bofete-SP;
- Verificar o percentual efetivo da precipitação no período que se torna recarga das águas subterrâneas;
- Discutir os resultados quanto aos possíveis subsídios dessas informações geradas à gestão dos recursos hídricos;
- Propor maneiras de introduzir informações sobre a recarga das águas subterrâneas e gestão de aquíferos nos planos de bacia a nível estadual.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 NOÇÕES GERAIS SOBRE AQUÍFEROS

A água circula em nosso planeta nos diferentes estados físicos como sólido, líquido e gasoso, e nos mais variados sistemas naturais de armazenamento. As águas dos reservatórios, de um modo geral, estão em constante circulação, estimuladas pela energia do sol. Assim, a água que é evaporada dos oceanos, lagos, do solo e etc., sobe para a atmosfera formando nuvens, que precipita em forma de chuvas, abastece os cursos d'água, infiltra no solo, e pode ser captada para utilização. Esta circulação de água é conhecida como ciclo hidrológico, representado na Figura 1 (IRITANI; EZAKI, 2008).

Figura 1 – Representação esquemática do ciclo hidrológico.



A água proveniente das chuvas, que infiltra no solo, primeiro atinge a zona não saturada, assim denominada, pois o solo está parcialmente preenchido com

água e ar. Nesta zona a água é em parte absorvida pela vegetação, ou outros seres, e evapotranspira, e outra porção restante pode continuar em movimento, pela ação da gravidade, atingindo níveis mais profundos, que seria a zona saturada (IRITANI; EZAKI, 2008).

O nível freático é considerado o limite entre a zona saturada e não saturada. Na zona saturada, onde os poros estão todos preenchidos com água, é o local onde a água que circula é denominada água subterrânea (IRITANI; EZAKI, 2008).

Assim, o aquífero pode ser descrito como uma formação geológica capaz de armazenar e transmitir água em seus poros, que são os espaços vazios entre os grãos formadores do solo e das rochas sedimentares, possibilitando a captação através da perfuração de poços. A água pode circular também através das fraturas, e espaços de dissolução, em alguns tipos de rochas (CLEARY, 2007) (IRITANI; EZAKI, 2008).

Aquitardos são formações que também armazenam água, mas a água fica entre camadas confinantes, assim possui baixa permeabilidade, não sendo viável pra captação, contudo transmite a água através de grandes áreas. O aquíclode ocorre quando a camada confinante é impermeável, sem capacidade de transmitir água, apenas de armazenar (CLEARY, 2007).

Os aquíferos podem ser classificados entre confinados, livres (não confinados), e semiconfinados, o que diferencia é a presença do nível freático no aquífero livre e a pressão a que estão submetidos. A superfície freática está acima da zona de saturação e em contato com a pressão atmosférica (CLEARY, 2007).

O aquífero confinado está submetido a uma pressão maior do que a atmosférica, pois possui uma camada confinante acima dela e não possui a zona não saturada. O nível da água é denominado potenciométrico, pois um poço perfurado neste tipo de aquífero vai elevar a água de acordo com a pressão a que estava submetida (IRITANI; EZAKI, 2008).

No caso do aquífero semiconfinado ele possui no seu topo ou na sua base camadas que podem ser permeáveis onde ocorre a circulação vertical da água subterrânea, contudo são camadas com permeabilidade mais baixa do que a do aquífero. Pode ocorrer também que essas camadas semiconfinantes possuam fraturas que permitem o fluxo lento da água (BORGHETTI, N. et al., 2004).

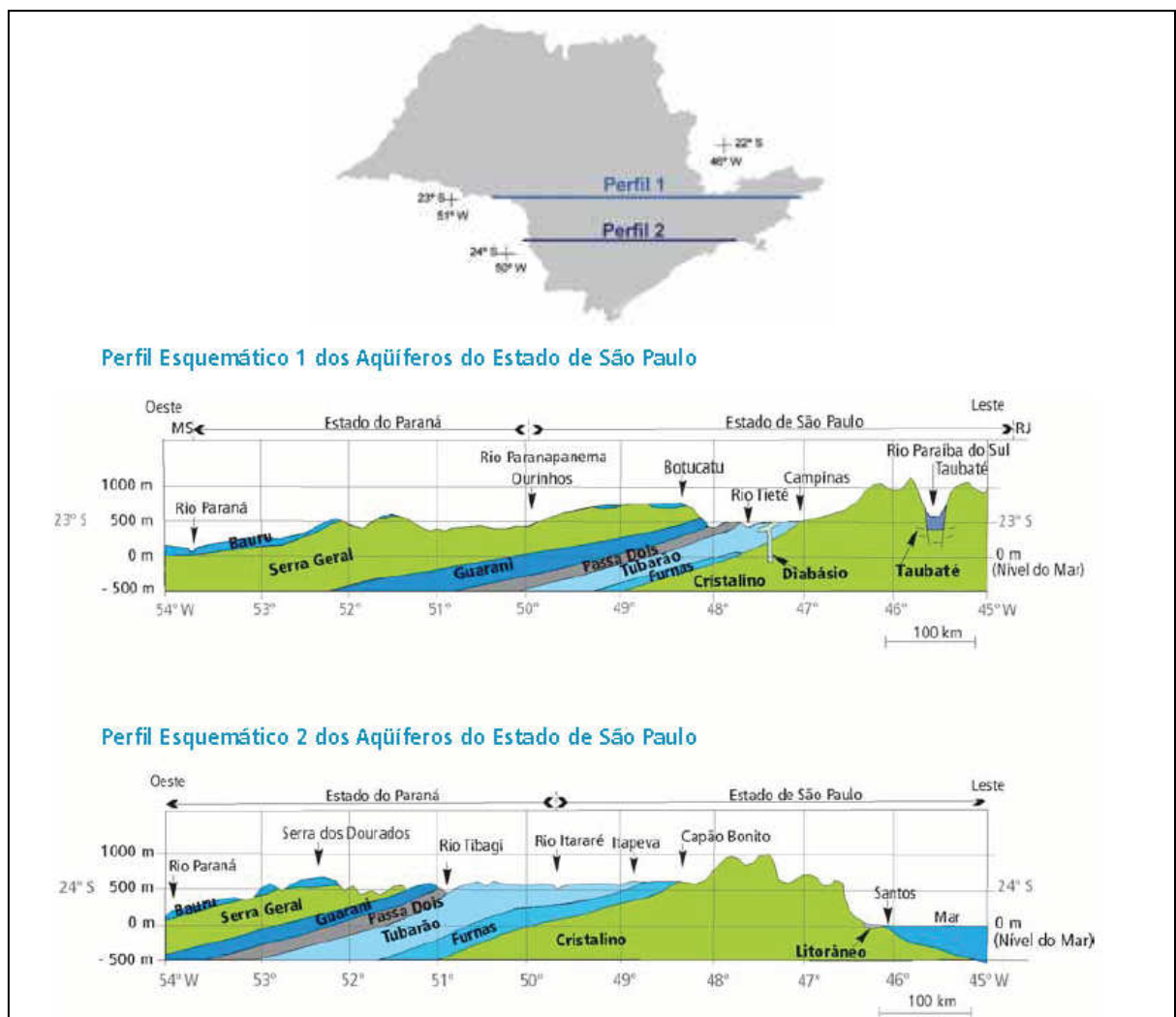
Os aquíferos também podem ser identificados de acordo com a porosidade do material constituinte da rocha, ou seja, granular (também denominado sedimentar ou

poroso), fissural e cárstico. No aquífero fissural a porosidade ocorre através das fraturas conectadas da rocha (IRITANI; EZAKI, 2008).

No aquífero poroso a água se movimenta através dos poros formados entre os grãos das rochas sedimentares, ou do solo. No aquífero cárstico os espaços onde a água subterrânea flui são cavidades originadas pela dissolução das rochas, sendo a principal rocha em que ocorre esse fenômeno o calcário (MANZIONE, 2015).

No Estado de São Paulo as unidades aquíferas são principalmente sedimentares e fraturadas. Os sedimentares são os aquíferos Bauru, Guarani, Taubaté, São Paulo e Tubarão. Os aquíferos fraturados são o Serra Geral e o Cristalino, conforme demonstrado na Figura 2, os perfis esquemáticos dos aquíferos (MANZIONE, 2015).

Figura 2 - Perfis esquemáticos dos aquíferos no Estado de São Paulo.



Fonte: (IRITANI; EZAKI,2008).

A água subterrânea, se comparada com a superficial, tem um movimento muito mais lento. A velocidade máxima é cerca de 1 m/dia, seu fluxo é laminar e o tempo médio de residência no solo é de aproximadamente 280 anos, em aquíferos profundos pode chegar a 30.000 anos. A água superficial tem a velocidade alta em torno de 1 m/s, o fluxo é turbulento e o tempo médio de residência é de semanas. Essas diferenças mostram as características da água subterrânea, que é uma reserva de água com garantias, contudo no caso de contaminação a dificuldade para solucionar esse problema é maior e mais demorada (CLEARY, 2007).

A porosidade é considerada como o volume de vazios no solo, em relação ao volume total do solo, ou seja, a quantidade de água que pode ser armazenada depende da porosidade. No entanto, a facilidade com que a água subterrânea flui entre os poros é chamada permeabilidade e depende da interconectividade entre os vazios das partículas do solo, assim uma baixa permeabilidade dificulta a captação de água para utilização (IRITANI; EZAKI, 2008).

As bacias hidrográficas são delimitadas a partir dos cursos d'água superficiais e os divisores de água nem sempre correspondem com os limites das águas subterrâneas. Porém, de modo similar, podem ser feitas as bacias hidrográficas subterrâneas, a partir das linhas equipotenciais, onde um divisor de bacia seriam pontos onde não existem conexão entre os aquíferos (CLEARY, 2007).

Contudo o processo de recarga e bombeamento das águas subterrâneas podem modificar esses limites. Deste modo, a análise local, em nível de bacia ou sub-bacia hidrográfica podem ser eficientes, pois as dificuldades e o entendimento da dinâmica subterrânea acontecem localmente.

A água subterrânea pode atingir o leito dos rios, produzindo o fluxo de base, ou seja, no período de estiagem o escoamento do rio é proveniente das águas subterrâneas. Nesse caso, o curso d'água é chamado de rio efluente, pois é alimentado pelo aquífero e isso ocorre devido a cota do nível d'água superficial ser, ou estar, menor do que a cota potenciométrica do aquífero (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

O rio pode também alimentar um aquífero, chamado de rio influente, ocorrendo o caso contrário, quando a cota do curso d'água está mais elevada do que a da água subterrânea do aquífero (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

3.2 O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

A área do SAG abrange quatro países: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, conforme ilustrado na Figura 3, sendo que no Brasil encontram-se 71% da sua área. A área total aproximada do SAG é de 1.087.879 km² (OEA, 2009). É considerado um dos maiores sistemas aquíferos do mundo e sua área tem extensão similar à dos territórios da França, Inglaterra e Espanha juntos (ROCHA, 1997).

O SAG pode ser classificado como um sistema aquífero sedimentar, sendo eficaz no fornecimento e armazenamento de água, assim possui uma boa produtividade. A exploração no aquífero livre é mais viável devido à profundidade do nível estático. As águas do SAG são, de modo geral, de boa qualidade e aptas ao consumo humano (IPT, 2011; OEA, 2009). Apesar disso, em alguns locais pode ter contaminação natural com Arsênio e Flúor.

O sistema apresenta variações quanto as suas características locais de tipo de solo e áreas de confinamento, ou de afloramento. Assim, de acordo com o estudo realizado pela OEA (2009), foram delimitadas três áreas que apesar de similares, devem ser geridas de acordo com suas particularidades, que são as zonas de afloramento – ZA, zona de confinamento – ZC e zona de forte confinamento – ZFC (Figura 3).

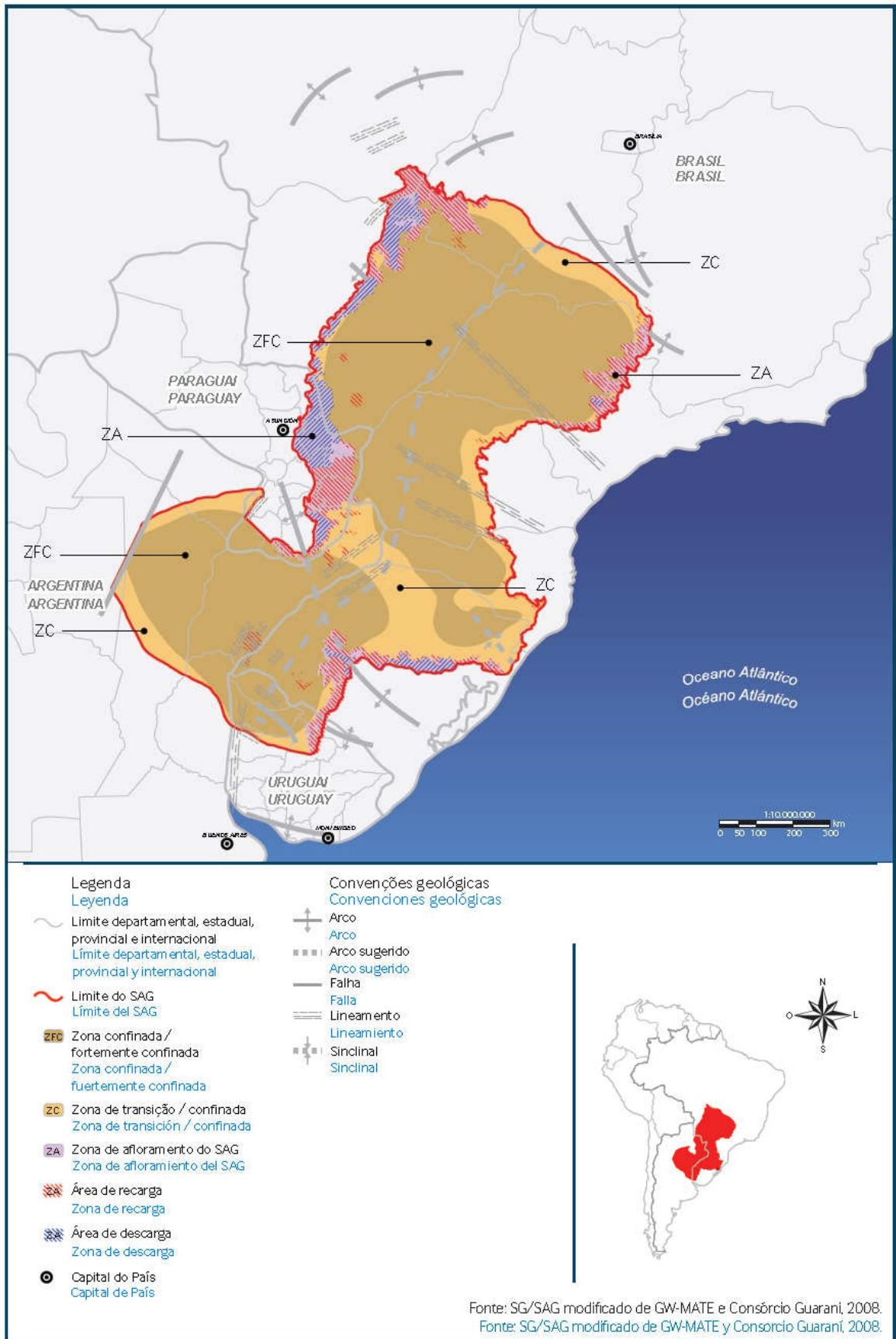
No Brasil as formações geológicas do sistema são a Formação Botucatu e Piramboia. Estima-se que essas formações na área do Brasil possuem entre 130 e 250 milhões de anos (OEA, 2009).

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos de granulação média a muito fina, seus grãos são selecionados e esféricos. A Formação Piramboia também possui arenitos de granulação média a fina, contudo são grosseiros em alguns locais, apresentam estratificação com silte ou argila (DAEE; IG; IPT; CPRM, 2005).

Aproximadamente 90% de toda água explotada do SAG é realizada pelo Brasil, sendo que o Estado de São Paulo é o maior usuário (OEA, 2009).

Nas cidades de grande porte o abastecimento público não é restrito às águas subterrâneas, contudo há uma abundância de poços particulares, principalmente em comércios, indústrias, serviços e condomínios, integrando o abastecimento fornecido pela rede pública, que muitas vezes não atende à demanda (HIRATA et al., 2015).

Figura 3 - Representação esquemática do SAG e o zoneamento.



Fonte: (OEA, 2009)

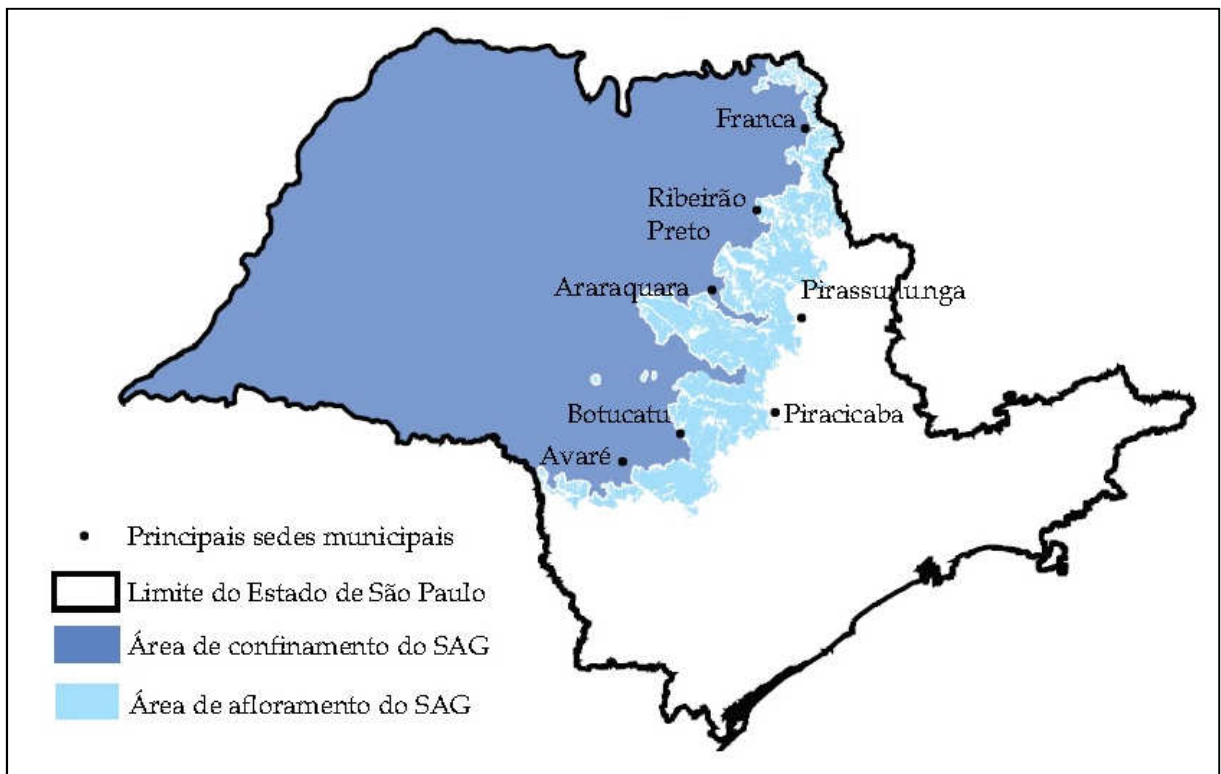
Conforme levantamento do IPT (2011), alguns poços da área de afloramento do SAG em São Paulo não atendem especificidades técnicas construtivas, como laje de proteção, facilitando o risco de contaminação. É também necessária a constante atualização dos dados dos poços do SAG, para ter parâmetros de análise e adotar as medidas necessárias para o adequado uso e preservação do recurso.

3.3 ÁREA DE AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANI NO ESTADO DE SÃO PAULO

A área de afloramento do SAG no Estado de São Paulo tem aproximadamente 15.000 Km². A área total do SAG em São Paulo é de 143.000 Km², conforme ilustra a Figura 4.

A recarga nessa área de afloramento é em torno de 200 mm/ano. Os poços em sua maioria têm vazões inferiores a 50 m³/h. As maiores vazões, de acordo com as outorgas dadas, são para o uso de irrigação (IPT, 2011).

Figura 4 – Representação esquemática de localização do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Brasil).

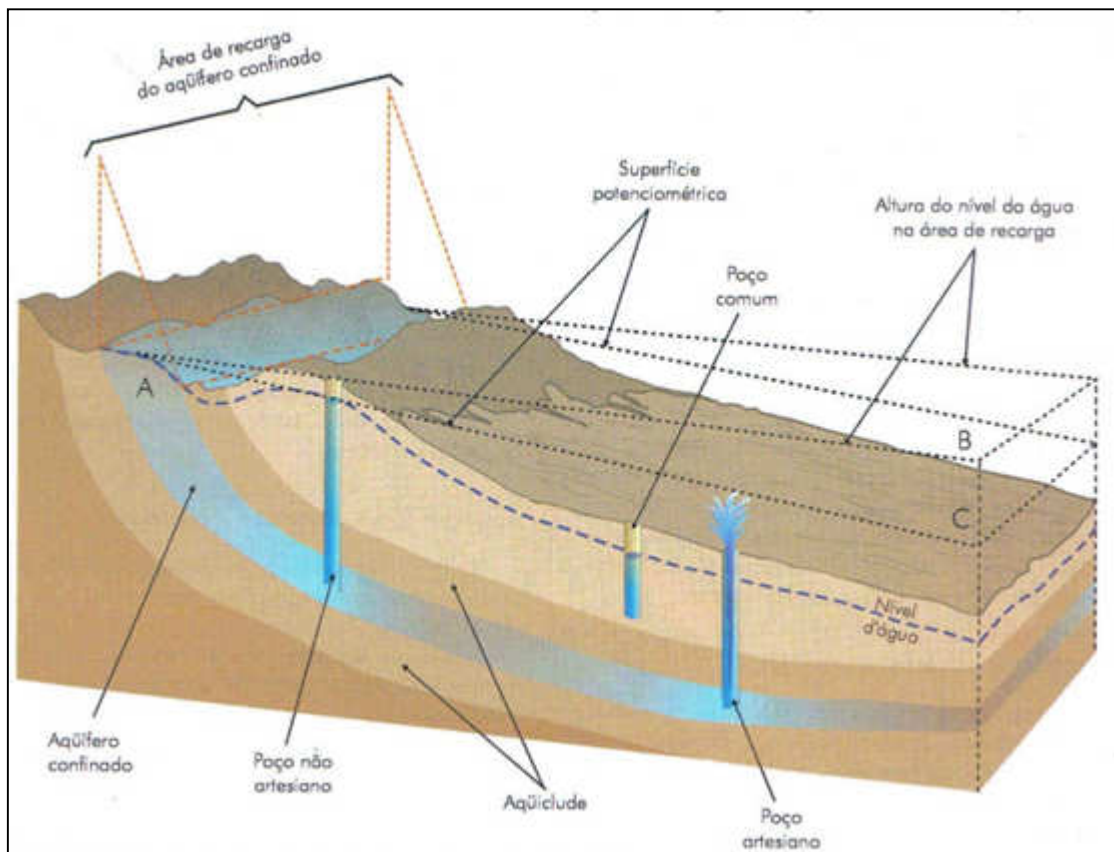


Fonte: IPT (2011).

No Estado de São Paulo 80% dos municípios utilizam as águas subterrâneas para o seu abastecimento, totalmente ou parcialmente, sendo que a maioria são os municípios classificados como de pequeno e médio porte (IPT, 2011).

O aquífero livre é assim denominado porque tem como limite superior o nível freático e está sob pressão atmosférica. Essas áreas também chamadas de áreas de afloramento têm a importante função de recarga do aquífero confinado, onde o excedente da precipitação infiltra no solo (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000), conforme demonstra a Figura 5.

Figura 5 - Aquífero confinado, superfície potenciométrica e artesianismo.



Fonte: (KARMANN, 2000)

São 105 municípios do Estado de São Paulo inseridos na área de afloramento do SAG, totalmente ou parcialmente. Desses municípios, 85% são classificados como de pequeno porte, ou seja, com população abaixo de 50.000 habitantes. Cerca de 57% dos municípios inseridos na área de afloramento do SAG utilizam água subterrânea para abastecimento (IPT, 2011).

Assim, a busca por utilização de fontes alternativas para abastecimento público tem revelado as águas subterrâneas cada vez mais como um complemento ao sistema de reservatórios de águas superficiais já existentes, sendo que a água subterrânea constitui-se numa fonte alternativa estratégica para os mais diversos usos (HIRATA et al., 2015).

Dentro da área de afloramento do SAG estão inseridas parcialmente 9 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHIs: 04 – Pardo, 05 – Piracicaba / Capivari / Jundiá, 08 – Sapucaí / Grande, 09 – Mogi Guaçu, 10 – Tietê /Sorocaba, 13 – Tietê Jacaré, 14 – Alto Paranapanema, 16 – Tietê / Batalha, e 17 – Médio Paranapanema.

De acordo com o estudo realizado pelo IPT (2011), a área de afloramento do SAG, no Estado de São Paulo, possui nove Unidades de Conservação de Proteção Integral, ou seja, exclusivamente para preservação da natureza, e 16 Unidades de Conservação de Uso Sustentável, que preza pelo equilíbrio entre o uso dos recursos e a preservação do ambiente. Contudo, no Estado de São Paulo, a área ocupada com cobertura vegetal e corpos d'água representa 24% da área de afloramento do SAG, em contrapartida a agricultura cobre cerca de 75% dessa área de afloramento.

Na UGRHI 10 – Médio Tietê/ Sorocaba, onde está o município de Bofete, a porcentagem de cobertura vegetal em relação a área total da bacia, está dividida em: mata 1,04%, vegetação secundária 7,86%, cerrado 0,15%, cerradão 0,15%, vegetação de várzea 0,22% e reflorestamento 4,15%. Sendo assim, o total de cobertura vegetal é de 13,57% da área da bacia (IPT, 2008).

A coleta de esgotos na área de afloramento do SAG em São Paulo é de 100% em 43% dos municípios, entre 99 a 90% em 40% dos municípios, e 89 a 60% em 17% dos municípios (IPT, 2011).

De todo o esgoto coletado nessa área, apenas 52% recebe tratamento adequado, o que constitui em grande potencial contaminante do solo e das águas. Outro potencial contaminante é a deposição de resíduos sólidos de modo inadequado, contudo na área de afloramento esse tipo de prática não é comum, sendo identificado como inadequado apenas o município de Jaú (IPT, 2011).

3.4 MUNICÍPIO DE BOFETE – SP

O município de Bofete está localizado na porção central do Estado de São Paulo (

Figura 6) e possui uma área de aproximadamente 653,541 Km² (IBGE, 2016).

Figura 6 - Localização do município de Bofete no Estado de São Paulo.



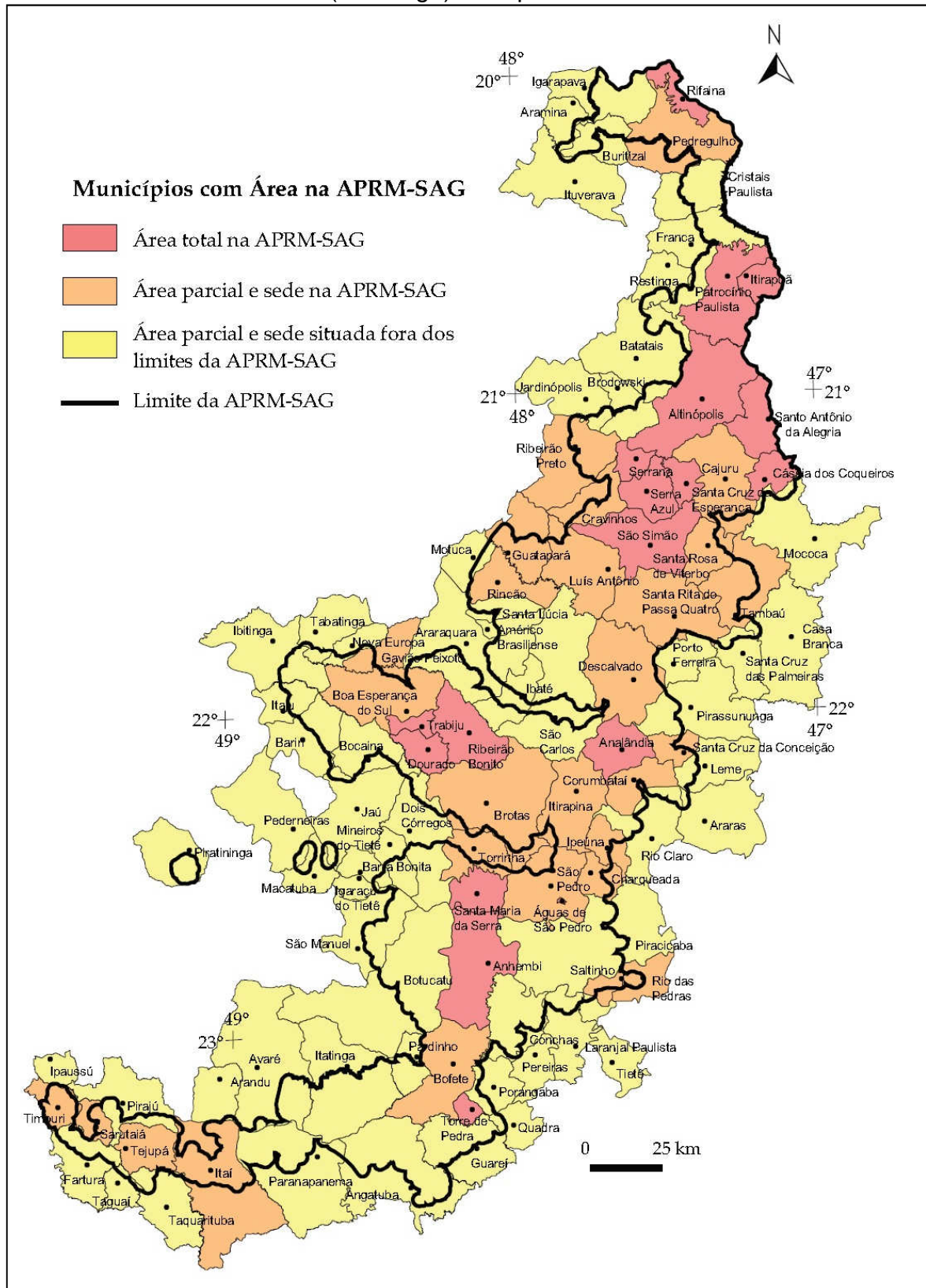
Fonte: (WIKIPÉDIA, 2006)

Esse município faz parte da UGHRI 10 – Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê (BH-SMT), sendo parte da sub-bacia do Médio Tietê Inferior. Possui a população estimada em 11.236 habitantes no ano de 2017, classificado como município de pequeno porte, segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017).

Os limites municipais de Bofete estão totalmente inseridos na área de afloramento do SAG em São Paulo, ilustrado na Figura 7, que demonstra a proposta da criação da Área de Proteção e Recuperação de Mananciais – Sistema Aquífero Guarani (APRM – SAG) (IPT, 2011).

Atenção especial deve ser dada a sub-bacia do Médio Tietê Inferior, a respeito da suscetibilidade do solo, pois apresenta muito alta suscetibilidade de erosão. Além disso, Bofete é um dos municípios com maior criticidade a respeito da vulnerabilidade do SAG tanto na zona urbana quanto na rural (IPT, 2008).

Figura 7 - Representação esquemática dos municípios inseridos na área de afloramento (e recarga) do aquífero Guarani - SP.



Fonte: (IPT, 2011).

Na área de afloramento do SAG a prática do agronegócio é predominante. No município de Bofete a atividade econômica predominante é a agropecuária, além do cultivo de eucalipto e cítricos, agricultura familiar, granjas, mineração, comércio e loteamento imobiliário (IPT, 2009).

De acordo com estudo do IPT (2009) a área de pasto ocupa aproximadamente 43% da área do município, seguido da área de mata com 30% e reflorestamento 17%, nessa última o intuito é voltado para atividade econômica com o plantio de cítricos e árvores para produção de papel/celulose. Contudo a atividade de mineração (1% da área) é a mais preocupante devido ao impacto negativo no ambiente.

Os biomas predominantes em Bofete se enquadram em Cerrado e Mata Atlântica (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOFETE, 2016).

De acordo com IBGE (2015) em relação a trabalho e rendimento o município possui apenas 17% da população ocupada, sendo que 33% da população possui renda mensal per capita de até meio salário mínimo. Ainda assim, o PIB per capita é de R\$ 13.950,00 e o percentual das receitas oriundas de fontes externas é de 82,5%, o que demonstra uma grande dependência econômica.

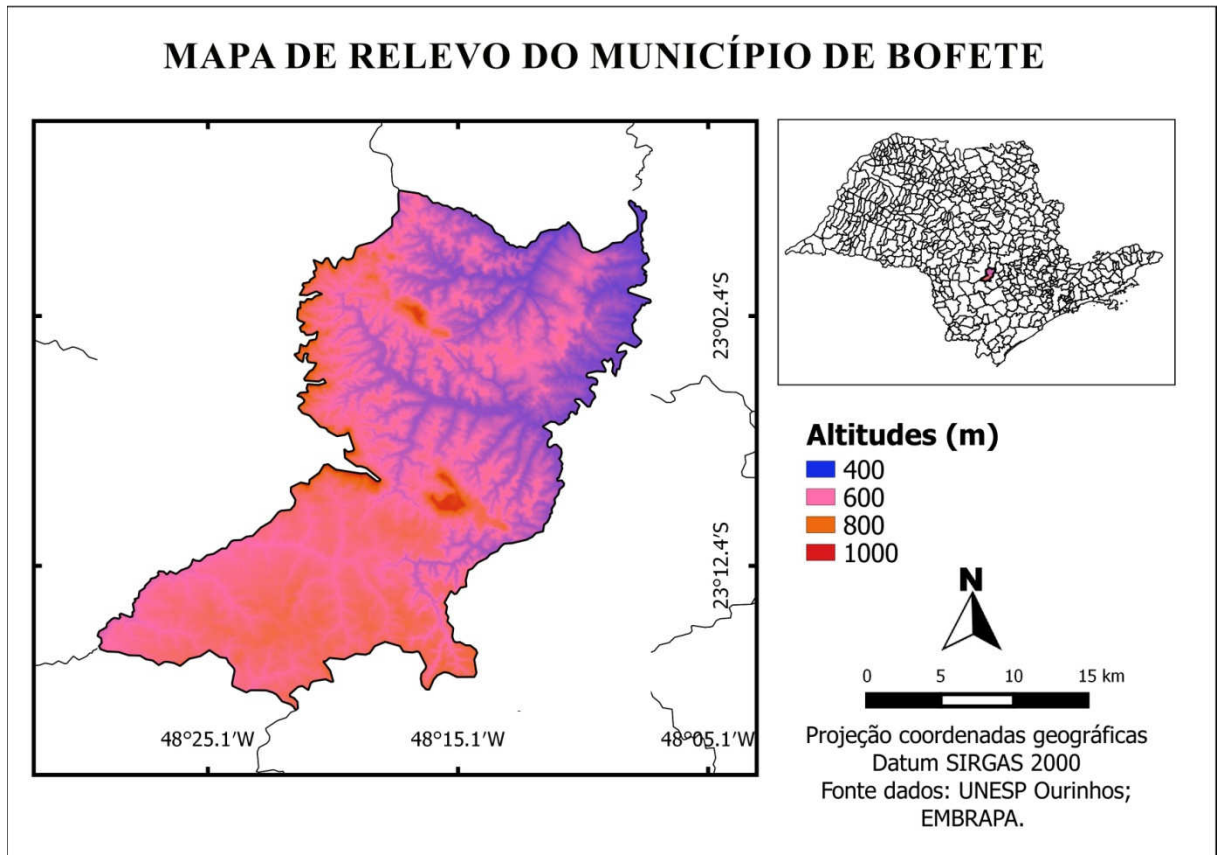
A taxa de urbanização dos municípios no SAG de um modo geral é alta, sendo predominante o intervalo entre 79,8% a 94,3% o que demonstra a concentração de pessoas na área urbana (IPT, 2011).

Em Bofete a taxa de urbanização é de 63,76%, a densidade demográfica é de 16,30 hab/Km², a taxa geométrica de crescimento anual – tendência de crescimento em Bofete é de 1,50% a.a. (SEADE, 2017). O município conta com equipamentos urbanos e possui uma escola de ensino médio, cinco escolas de ensino fundamental e três estabelecimentos de saúde do Sistema Único de Saúde - SUS (IBGE, 2015).

O clima é classificado como Cwa, de acordo com a classificação climática de Koeppen, que significa clima mesotérmico (subtropical e temperado), com invernos secos e verões quentes e chuvosos (acima de 22°C), sendo a temperatura média anual de 21,5 °C e a precipitação média anual de 1490,6 mm (CEPAGRI, 2018).

De acordo com CEPAGRI (2018) a altitude média do município é de 570,0 m; segundo IPT (2009) na sede do município de Bofete a altitude é de 520,0 m, com máximo de 978,0 m no topo do Morro da Bela Vista e o mínimo de 480,0 m próximo à calha do Rio do Peixe. As altitudes do município podem ser observadas na Figura 8, no mapa de relevo.

Figura 8 - Mapa de Relevo do município de Bofete.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O município está predominantemente sobre a formação Piramboia, constituída de arenitos, assim a sua topografia é suave como ilustra a Figura 9, com exceção dos morros e escarpas, sendo os mais conhecidos o Morro das Três Pedras (Figura 10), Morro de Bofete (Figura 11) e “O Gigante adormecido” (IPT, 2009).

Figura 9 - Relevo suave que predomina no município de Bofete.



Fonte: (IPT, 2009)

Figura 10 - Morro das Três Pedras - Morros testemunhos e escarpas.



Fonte: (ATIVA CINEMA DIGITAL, 2012).

Figura 11 - Morro de Bofete.



Fonte: (CAMARGO, 2013)

De acordo com o planejamento realizado no município, o atendimento sanitário da população urbana será de 100% desde 2010 a 2040. A projeção prevê pequeno aumento populacional, por exemplo, no distrito sede o aumento seria de 1443 habitantes, o que representa 25,6% entre 2011 e 2040 (ENGEORPS, 2011).

A demanda de água tratada disponibilizada para distribuição no município foi de 13,72 l/s em 2010 e a projeção é de 15,27 l/s em 2019, atingindo 16,92 l/s em 2040 (ENGEORPS, 2011). Segundo IPT (2008) o consumo de água estimado no município para os anos de 2015 a 2019 é de 132,3 l/hab. dia.

As perdas de água tratada no sistema são estimadas em 20%, pela empresa de saneamento local, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Contudo o abastecimento público não atinge a área rural, que opta por soluções individualizadas, utilizando principalmente poços rasos (ENGEORPS, 2011).

O manancial utilizado para a captação de água para abastecimento público depende da localização dos bairros. Na sede a captação é realizada no Córrego do Tanque, afluente do Rio do Peixe. De acordo com IPT (2009), a captação é

realizada nas coordenadas 48°15'15.154" O e 23°6'24.668" S, no Datum SIRGAS 2000, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Captação para abastecimento urbano em Bofete, Córrego do Tanque.



Fonte: GOOGLE EARTH.

Entretanto, nesse ponto há contaminação a montante de efluentes oriundos de fossas sépticas e lançados no corpo d'água, além da atividade pecuária que possui pastagens próximas ao ponto de captação da água (ENGEORPS, 2011).

No distrito de São Roque Novo a captação de água é realizada numa nascente próxima a área urbana. Nos distritos de Jardim Santo Inácio e Portal das Colinas é utilizada captação de água subterrânea, através de poços profundos (ENGEORPS, 2011).

O sistema produtor tem como principal problema a barragem do Córrego do Tanque, que rompeu em 2009 e até o momento não foram encontradas fontes de que já foi reconstruída. Segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) em 2014 foi aberto processo de licitação (ENGEORPS, 2011).

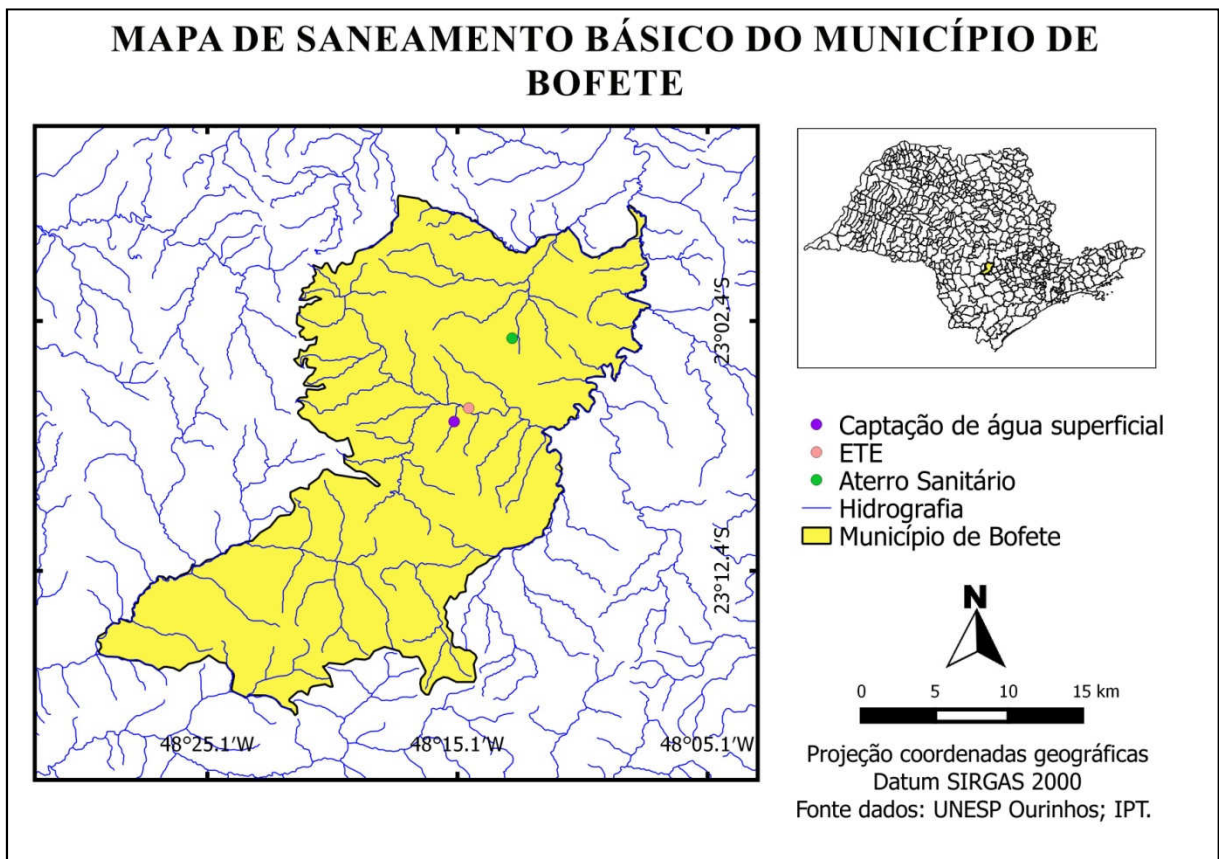
Outro grande problema é o volume de captação superficial que se aproxima da disponibilidade que o Córrego do Tanque oferece, sendo insuficiente em períodos de estiagem (ENGEORPS, 2011).

No caso de esgotamento sanitário, o município possui Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), localizada nas coordenadas 48°14'40.298" O e 23°05'52.443" S, no Datum SIRGAS 2000, conforme Figura 13 (IPT, 2009). O plano feito por ENGEORPS (2011) informa que na área urbana a coleta e tratamento de esgotos representaram 75,8% com referência da população em 2010 e a projeção é que alcance os 100% em 2019.

A vazão média de esgotos lançado em 2010 foi de 7,72 l/s, sendo que a projeção é que esse valor aumente para 11,34 l/s em 2019, atingindo 12,71 l/s em 2040 (ENGEORPS, 2011).

O total do resíduo sólido doméstico gerado pelo município diariamente é de aproximadamente 4,8 toneladas. O sistema de coleta consegue atender o município todo e os resíduos são destinados para um aterro da própria cidade (ENGEORPS, 2011). O aterro sanitário está localizado nas coordenadas 48°12'54.122" O e 23°3'5.058" S, no Datum SIRGAS 2000, conforme Figura 13 (IPT, 2009).

Figura 13 - Localização do aterro sanitário, a ETE, e o ponto de captação de água superficial no Córrego do Tanque, no Município de Bofete.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As áreas de afloramento e recarga foram identificadas como as áreas com maior potencial de exploração (OEA, 2009). A recarga das águas subterrâneas é também um componente do ciclo hidrológico (GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE, 2016). A recarga pode ser explicada como a água que infiltra no solo e alimenta a zona saturada do aquífero, adicionando volume à reserva de água subterrânea (IPT, 2011).

As vazões de exploração para atender à demanda deverão ser estimadas de acordo com a relação entre a recarga e a retirada de água, que envolve fatores locais do solo e ocupação do território, além da precipitação do local. Outro fator é o adequado projeto e construção dos poços, evitando contaminações e influência entre os poços e a manutenção periódica que deve ser realizada (HIRATA et al., 2015).

O monitoramento das águas subterrâneas constitui-se num instrumento de gestão dos recursos hídricos, necessário para compreensão da disponibilidade frente à demanda e dos mecanismos do aquífero de recarga e descarga, possibilitando assim a exploração e manejo sustentável do aquífero (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

No aquífero livre, que corresponde às zonas de afloramento, possui interação com as águas superficiais, sendo que a maior parcela da recarga é proveniente da precipitação. Nessas áreas o fluxo é mais rápido, as águas são mais recentes e possuem menos de 100 anos. São áreas muito vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas (IPT, 2011).

De acordo com OEA (2009), aproximadamente 10 a 20 mm/ano corresponde à recarga profunda no SAG, sendo que isso representa um volume de 0,8 a 1,4 Km³/ano de água. Segundo HIRATA et al. (2015) a recarga na área de afloramento corresponde a aproximadamente 150 – 200 mm/ano e a água subterrânea possui velocidade acima de 5 mm/ano.

O modo como ocorre a recarga pode ser dividida em três principais tipos: a recarga direta, onde observa-se a percolação direta da água para o aquífero; a recarga indireta que pode ocorrer por interação com os cursos d'água superficiais; e a localizada que acontece devido a concentração de água num determinado local,

por questões de geomorfologia do terreno, ou outras características locais (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

Como resultado dessa recarga pode-se obter a recarga efetiva do aquífero, onde a água consegue atingir o nível freático e a recarga potencial em que a água infiltra no solo, mas pode não atingir o aquífero (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

Para estimar a recarga de um aquífero há na literatura uma variedade de métodos, cada um considera diferentes variáveis e aplicam-se a diversas situações, sendo que podem ser aplicados métodos para as zonas saturadas, não saturadas, águas superficiais e também os métodos baseados no balanço hídrico (GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE, 2016).

Como exemplo, os métodos que estão fundamentados na zona saturada são principalmente: a Lei de Darcy, os Traçadores, a modelação numérica e a variação do nível freático. No caso da zona não saturada, além dos anteriormente citados, há também os métodos do lisímetros e do plano de fluxo zero (ZFP) (GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE, 2016).

O método do balanço hídrico utiliza a variação no armazenamento (ΔS) através das vazões que entram e saem do sistema, de acordo com a Equação 1:

$$P = ET + \Delta S + R_{off} + D \quad \text{Equação 1}$$

Onde P é a precipitação, ET é a evapotranspiração, ΔS é a alteração no armazenamento, R_{off} é o escoamento superficial, D é a drenagem para fora do sistema (MANZIONE, 2015).

Os métodos que utilizam o balanço hídrico são mais fáceis de adequar às circunstâncias, contudo há muitas variáveis, onde cada uma possui uma incerteza relacionada à sua medição e essa propagação de incertezas pode levar a grandes erros na estimativa da recarga (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

Outro método utilizado é o de traçadores, que constitui no uso de substâncias químicas para a estimativa da recarga que efetivamente atinge o aquífero, mas este método não utiliza dados de série temporal. As incertezas agregadas ao método estão relacionadas aos erros na preparação da concentração dos traçadores e nos cálculos da estimativa do processo de transporte deles na água (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

A equação elaborada por Henry Darcy e conhecida como a Lei de Darcy, utilizada para estimativa de recarga, é baseada no conceito de que a quantidade de água, por unidade de tempo e de área, que passa por um meio poroso e saturado é correspondente ao gradiente potencial total da água nesse meio. Para isso foi definida uma constante de proporcionalidade, conhecida como condutividade hidráulica (K) do solo saturado, que representa a facilidade com que a água se movimenta nos espaços do solo. Assim, esta constante depende de fatores locais da estrutura do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). A equação é expressa pela Equação 2:

$$Q = K \cdot A \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{Equação 2}$$

Onde Q é a vazão de água que passa pelos poros, K é a constante de proporcionalidade que representa a condutividade hidráulica, A é área da seção transversal, $h_1 - h_2$ é a variação da carga hidráulica, e L a distância entre h_1 e h_2 (MANZIONE, 2015).

A representação matemática através da modelagem, aplicada ao aquífero para estimativa da recarga, constitui num importante instrumento de medida e gestão, de modo que gera dados para avaliação da utilização do recurso e diagnósticos para preservação da natureza, de modo a inserir outras variáveis que interferem na recarga, tais como uso e ocupação do solo e alterações climáticas (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

Todo método de estimativa de recarga possui suas incertezas, que são intrínsecas ao método e, portanto, é interessante adotar mais de uma metodologia para avaliar os resultados obtidos. Um ponto que reforça essa ideia é que a estimativa da recarga vai sendo delimitada de acordo com os dados disponíveis (CHANG; CARNIER NETO, 2008).

Segundo Maziero e Wendland (2005) os métodos baseados na interação entre precipitação e nível piezométrico podem ser mais eficazes na estimativa da recarga subterrânea, apesar disso, o método WTF pode superestimar a quantificação da recarga, pois não considera as descargas. Ainda assim, deve ser considerado se no local há fontes de recarga indiretas que podem afetar a estimativa.

Outro fator é que devido à complexidade para estimativas da recarga, é importante o estudo local, para assim entender o comportamento do aquífero em determinada área e auxiliar no manejo e gestão sustentável do recurso (GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE, 2016).

A estimativa da reserva do aquífero é um estudo complexo, que possui restrições devido à falta de medidas, ou imprecisão dos dados como, por exemplo, o balanço hídrico da região. A reserva total é a soma das reservas ativas e estáticas, a reserva ativa está relacionada ao fluxo de água no aquífero, que se renova e a estática corresponde à porção armazenada nas rochas e poros ou confinada (OEA, 2009).

3.6 GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A utilização das águas subterrâneas tem como benefícios a resistência em épocas sem precipitação, pois possui grande armazenamento de água, sendo que a água geralmente é de boa qualidade (HIRATA et al., 2015).

Contudo, as águas subterrâneas, por não ficarem tão “visíveis” quanto as superficiais, muitas vezes não recebem um cuidado especial, pois como todo recurso natural e como componente do ciclo hidrológico está conectado ao território, ao clima, ao uso do solo e às atividades do entorno, tudo isso influencia na quantidade e qualidade dessa água.

Importante salientar que, de acordo com OEA (2009) o tempo de resposta do aquífero é muito lento, metro por ano, diferente das águas superficiais, o que torna ainda mais grave os problemas com impactos ambientais, sendo imprescindível sua prevenção. Além disto, a distribuição espacial das águas subterrâneas é diferente das águas superficiais.

Assim, o uso e ocupação do solo influi na forma como o SAG vai ser explorado e essa integração deve ser observada para uma melhor gestão dos recursos. Muitas são as atividades antrópicas que geram impactos ambientais, de diversas magnitudes, portanto deve-se ter atenção especial às áreas mais vulneráveis, que são as áreas de afloramento do aquífero e recarga, buscando cooperação entre todos os atores envolvidos (OEA, 2009; IPT, 2011).

Para que seja efetivado o manejo sustentável e a preservação do aquífero é importante a instalação e operação da rede de monitoramento, que vai gerar dados

para análise e gestão do recurso e de estudos que podem ser realizados (OEA, 2009). Além das medidas de proteção, é necessário o cuidado com o uso e ocupação do solo, as legislações específicas, a fiscalização e o suporte dos órgãos gestores (IPT, 2011).

O DAEE já possui a rede piezométrica básica do Estado de São Paulo, que foi iniciada em 2007, e tenta de modo integrado com a Agência Nacional de Águas (ANA), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e a Companhia Ambiental de Saneamento do Estado de São Paulo (CETESB) gerar informações para gestão e pesquisa (LOBO et al., 2011).

A rede de monitoramento hidrológica consiste numa importante ferramenta para gerar banco de dados, contudo ainda é limitada a alguns pontos do Estado, e é necessária uma discussão e definição da sua utilização na gestão dos recursos hídricos, interação entre a rede, a outorga e os planos de bacia (LOBO et al., 2011).

Aos poucos as informações estão sendo geradas e a rede ampliada, mas ainda falta a contrapartida dos gestores e órgãos componentes do sistema hídrico para dar a devida atenção aos dados e as informações que podem ser obtidas a partir deles. A rede de monitoramento deve ser bem utilizada, como uma parceria, inserindo essas informações nos instrumentos do plano de recursos hídricos.

De acordo com a Constituição Federal (BRASIL, 1988) no Brasil a gestão das águas subterrâneas tem o domínio em nível estadual, sendo que cada estado, de acordo com as características locais e usos da água, define parâmetros para concessão de outorga e cadastro de uso desse recurso. No Estado de São Paulo, de maneira prática, a gestão quantitativa está dissociada da qualitativa, sendo que mais de um órgão estadual realiza a gestão das águas nesse sentido.

Contudo, conforme prevê a legislação nacional na Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), a gestão deverá ser integrada. Outro ponto a ser observado é a integração das águas subterrâneas e superficiais, pois fazem parte do mesmo sistema hidrológico, no entanto são compartimentadas em diferentes setores na outorga de uso.

A Lei 7.663/91, da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (ESTADO DE SÃO PAULO, 1991), também preconiza a gestão integrada, descentralizada e participativa. Contudo, a gestão ainda carece de uma sociedade civil organizada, consciente, que é de extrema importância para o funcionamento do sistema, pois

são as pessoas da base, que moram e convivem no dia a dia com os recursos, que vão preservar, denunciar e auxiliar em obras e projetos de melhoria.

É relevante também ressaltar a Lei Estadual n.º 9.866/97 (ESTADO DE SÃO PAULO, 1997), que institui a criação de áreas de proteção e recuperação de mananciais - APRM, porém a lei incentivou até o momento a criação de APRM de águas superficiais. No Estado de São Paulo foi realizado o Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de Afloramento do SAG, sendo a primeira proposta de uma APRM de aquífero criada (IPT, 2011; MANZIONE, 2015).

A definição de domínio das águas é diferente em cada país de abrangência do SAG, os países federativos, como no Brasil e Argentina, o domínio das águas é compartilhado entre os estados e o governo central, em países de Estados unitários como no Paraguai e Uruguai, as águas ficam sob o domínio do governo central (ANA, 2013).

Essa adoção causa problemas nas políticas relacionadas às águas subterrâneas que ainda são insuficientes e desconectadas. É necessária a gestão não somente em nível local, mas como no caso do SAG, em nível internacional, pois do modo como está estabelecido, cada órgão competente faz da sua maneira, de acordo com sua escala de abrangência (VILLAR, 2010).

Os espaços por onde as águas subterrâneas circulam, abrange mais de um comitê, dificultando assim a definição da área de planejamento e gestão, sendo necessária a adoção de outras formas de gestão (ANA, 2013).

A tomada da bacia hidrográfica como unidade de gestão foi um importante progresso, contudo as águas subterrâneas não seguem os limites geográficos das bacias hidrográficas, determinadas pelas águas superficiais, e também não respeita os limites político-administrativos dos municípios e Estados, desse modo é difícil articular as políticas administrativas com os recursos hídricos (MANZIONE, 2014; VILLAR, 2010).

No Brasil o território do SAG abrange aproximadamente 40 comitês de bacias hidrográficas a nível estadual e 4 comitês de bacias hidrográficas interestaduais (ANA, 2013).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) - Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997) e a instituição do Sistema Nacional de Recursos Hídricos avançaram no sentido de incentivar a participação da sociedade na gestão e nas decisões e de tirar a centralidade do governo.

A proposta de um modelo de organização e gestão deve abranger as diversidades econômicas, social, hídricas e ambientais (ANA, 2013). Assim, a gestão de áreas pequenas dentro das bacias hidrográficas atende a gestão das águas subterrâneas localmente, com suas características e conflitos próprios.

Aos poucos ações estão sendo tomadas para que ocorra a organização para adequada gestão. Os países que possuem o aquífero em seu território possuem normas para gestão e preservação das águas. Contudo a grande diversidade entre os diferentes países, estados e municípios traz a necessidade de articulação de modo que a legislação seja ajustada, contemplando as especificidades de cada região (ANA, 2013).

É necessário o estabelecimento de acordos para gestão conjunta entre os diferentes países e estados, mas diferenças em nível local devem ser contempladas para a adequada gestão. Alguns problemas decorrentes das águas subterrâneas transfronteiriças, como no caso do aquífero Guarani, são locais e precisam da atuação de soluções nessas áreas específicas.

Um exemplo desse tipo de atuação são as Comissões Locais de Apoio ao Projeto Piloto (CLAPs) no Brasil, em Ribeirão Preto, através das CLAPs foi realizado o zoneamento de poços e essas comissões têm o apoio técnico do DAEE, além de Universidades (ANA, 2013).

O plano de bacia é um importante instrumento de gestão dos recursos, porém sua aplicação ainda é falha e os municípios que não seguem suas metas e princípios não sofrem nenhum tipo de punição. O enquadramento dos corpos d'água superficiais ainda foi muito pouco implantado e menos ainda das águas subterrâneas. A outorga não consegue regularizar e atingir a maioria dos poços existentes, portanto ainda não consiste numa representação da realidade de captação das águas subterrâneas (VILLAR, 2010).

As questões relacionadas ao manejo da natureza envolvem muitos parâmetros, difíceis de estimar, visto os ciclos dinâmicos e complexos, tal como o ciclo hidrológico, que se relaciona com a geomorfologia local, o clima, o uso do território, impactos antrópicos. Portanto, a aplicação de modelos é uma ferramenta fundamental para estimar dados quantitativos, qualitativos, entre outros, de extrema importância para o gerenciamento do recurso.

As lacunas de conhecimento a respeito das águas subterrâneas no Brasil configuram um obstáculo na administração do recurso de modo integrado. Do

mesmo modo, a dissociação da gestão de águas superficiais e águas subterrâneas não considera que o escoamento de base dos cursos d'água superficial tem origem nas águas subterrâneas (ANA, 2013).

A exploração sem controle e ordenação pode causar a redução do fluxo de base dos rios e a deterioração da qualidade da taxa de recarga, caso ocorra mudanças no uso agrícola do solo (ANA, 2013).

Nesse contexto, é importante entender que toda informação, medidas, e previsões futuras contém incertezas intrínsecas ao método, aos parâmetros, ou ao corpo técnico responsável. Na natureza, na economia e na política também há incertezas relacionadas. Assim, aprender a estimar e lidar com essa realidade é um avanço para melhoria dos dados e modelagem aplicados às decisões em recursos hídricos (MANZIONE, 2014).

Os resultados das modelagens e das previsões em recursos hídricos podem auxiliar na prevenção de conflitos, pois os modelos fornecem respostas e informações para projeções futuras sobre o uso das águas, tais como disponibilidade frente a crescente demanda, além da construção de cenários alterando as possibilidades futuras. Essas informações são a base para os tomadores de decisão, na elaboração de metas, projetos, planos de bacia, legislação e acordos, que visam a proteção do recurso e seu uso sustentável (MANZIONE, 2014).

Entretanto, os modelos possuem as incertezas relacionadas aos dados mensurados e às metodologias utilizadas. A compreensão das incertezas associadas é necessária para os tomadores de decisão e para a sociedade como um todo, pois o habitual na gestão é lidar com situações e respostas binárias, que não contempla o modelo com suas incertezas (MANZIONE, 2014).

As águas subterrâneas possuem muitas fontes de incertezas na sua modelagem devido à complexidade do sistema e a falta de dados e informações, pois se relaciona com dados geográficos, geológicos, climatológicos, além da sua relação e interação com as águas superficiais, da precipitação, dos cursos d'água, das áreas de recarga e confinamento.

Para gestão é necessário conhecimento e informação sobre os recursos disponíveis, contudo em recursos hídricos a informação e banco de dados são dispersos, e muitas vezes faltantes, principalmente no que diz respeito às águas subterrâneas (VILLAR, 2010).

Há falta de informações técnicas a respeito das águas subterrâneas, que muitas vezes não são consideradas prioridade, tanto por ser um manancial “escondido”, como também pela dificuldade de compreensão da sociedade da sua importância e dos impactos negativos associados às atividades humanas. Como consequência a legislação não é bem estruturada, faltando articulação entre os diferentes órgãos gestores (VILLAR, 2010).

Assim, o estudo da recarga do aquífero traz informações de mais de um componente do ciclo hidrológico, de forma a refinar os modelos e melhorar o entendimento e conhecimento dos fenômenos hidrológicos.

3.7 A RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO FERRAMENTA DOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A PNRH - Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), instituiu que a água é um bem de domínio público e a gestão e ordenação cabe ao governo, através dos seis instrumentos: os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, a outorga de direito de uso, a cobrança, a compensação a municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

O acesso ao direito de uso da água se faz através da outorga, que deve ser concedida junto com o licenciamento ambiental. Esse instrumento garante o controle dos usos da água, através da avaliação das questões hidrológicas e hidráulicas, além da qualidade da água (ANA, 2011).

A outorga também garante a alocação de água para o usuário, por exemplo, um empreendedor precisa de garantias de que haverá a quantidade de água necessária para suas atividades, caso não tenha ele irá deslocar seu empreendimento para outro local, uma bacia com disponibilidade hídrica. Desse modo, a outorga além de verificar a disponibilidade hídrica, garante o cumprimento das normas (ANA, 2011).

O enquadramento dos corpos d'água em classes, que deve ser realizado de acordo com os usos preponderantes, é também um parâmetro para concessão da outorga, uma condicionante (ANA, 2011). Esse instrumento pretende de um modo geral preservar os recursos hídricos e pode ser expandido de modo a abranger as águas subterrâneas.

Segundo ANA (2011), a análise da vazão disponível para exploração em poços é feita através dos testes de bombeamento e da avaliação de recarga do aquífero, que seria a reposição da água pela contribuição das precipitações. “[...] É importante que a **vazão máxima** a ser captada seja **sustentável** em termos de recarga, uma vez que a superexploração (retirada excessiva de água) pode levar o aquífero à exaustão [...]” (ANA, 2011, p.25).

A recarga da água subterrânea faz parte da dinâmica do ciclo hidrológico, sendo que esse parâmetro é fundamental para o conhecimento do aquífero e da interação com as águas superficiais. As informações de recarga, unidas com o monitoramento hidrológico da rede Estadual do DAEE, constituem-se em subsídios para melhoria do gerenciamento e gestão dos recursos hídricos.

A informação da recarga é um parâmetro importante de análise da situação dos recursos hídricos para os tomadores de decisão, que deve ser utilizado junto aos instrumentos da PNRH - Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), tais como na outorga e no enquadramento dos recursos hídricos.

A outorga integrada é alvo de grandes debates, é de conhecimento dos técnicos da área a necessidade de desenvolver e aplicar metodologias de modo que consiga fazer acontecer. Portanto, é necessário expandir o conhecimento das águas subterrâneas, assim entender e estimar a recarga representa um avanço nesse sentido, pois ela representa e alguma medida uma ligação entre as águas superficiais e subterrâneas.

Em vista disso, o desafio é realizar modelagem e gerar informações a respeito das águas subterrâneas, como ferramenta para a gestão (MANZIONE, 2014).

No momento atual, onde diversas regiões já sofreram com crises hídricas, de diversas causas, é primordial o conhecimento dos volumes de recarga dos aquíferos e de sua relação com as águas superficiais (VILLAR, 2010).

4 METODOLOGIA

4.1 DADOS DISPONÍVEIS

Os dados piezométricos estão disponíveis através da CPRM (2016) através da Rede Integrada de Monitoramento Águas Subterrâneas (RIMAS). O poço de monitoramento que gerou os dados utilizados está localizado nas coordenadas

48°15'14.866" O e 23°4'46.531" S, no Datum SIRGAS 2000 (Figura 14 e Figura 15), é denominado como Sítio Dona Maria n.º 3500027885, e possui profundidade de 60,0 m. No Tabela 1 estão descritas as características locais do poço.

Tabela 1 – Dados locais do poço de monitoramento.

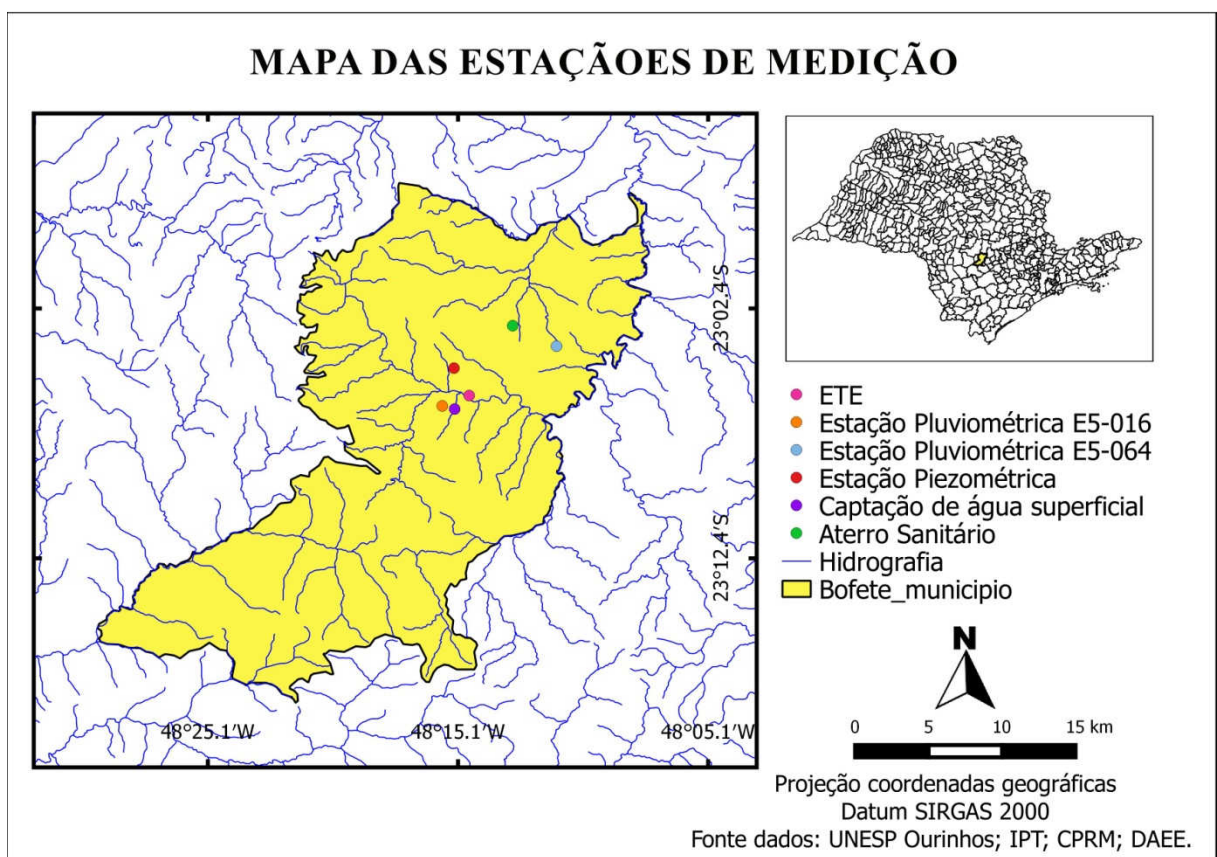
| Perfil Construtivo | DADOS LITOLÓGICOS | | | |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---|
| | De (m): | Até (m): | Litologia: | Descrição Litológica: |
| | 0 | 11 | Arenito fino | Arenito fino, bem selecionado, maduro, com granulometria milimétrica. |
| | 11 | 17 | Arenito fino | Arenito fino cinza, selecionado, granulometria milimétrica. |
| | 17 | 21 | Arenito fino | Arenito castanho bem selecionado |
| | 21 | 26 | Arenito fino | Arenito branco com matriz argilosa 26 35 |
| | 26 | 35 | Arenito fino | Arenito fino castanho, selecionado. |
| | 35 | 37 | Arenito Argiloso | Arenito argiloso castanho |
| | 37 | 44 | Areia fina | Areia fina cinza selecionada |
| | 44 | 52 | Arenito argiloso | Arenito argiloso marrom |
| | 52 | 55 | Arenito fino | Arenito fino castanho avermelhado bem selecionado |
| | 55 | 58 | Arenito fino | Arenito fino com matriz argilosa castanho claro |
| | 58 | 60 | Arenito fino | Arenito fino, castanho avermelhado |
| | FORMAÇÃO GEOLÓGICA | | | |
| | Profundidade Inicial (m): | Profundidade Final (m): | Tipo de Formação: | |
| | 0,00 | 21,00 | Formação Botucatu | |
| | 21,00 | 60,00 | Formação Piramboia | |

Fonte: (CPRM, 2016)

Os dados pluviométricos foram obtidos do monitoramento hidrológico do DAEE, através do posto E5-064 (Fazenda Santa Terezinha), possui série de medições desde 1971 e está localizado nas coordenadas $48^{\circ}11'9.030''$ O e $23^{\circ}3'54.015''$ S, no Datum SIRGAS 2000 (Figura 14 e Figura 15). Esse posto está em área rural, assim como o posto piezométrico, sendo que a distância entre os postos de monitoramento pluviométrico e piezométrico é de aproximadamente 7,0 Km.

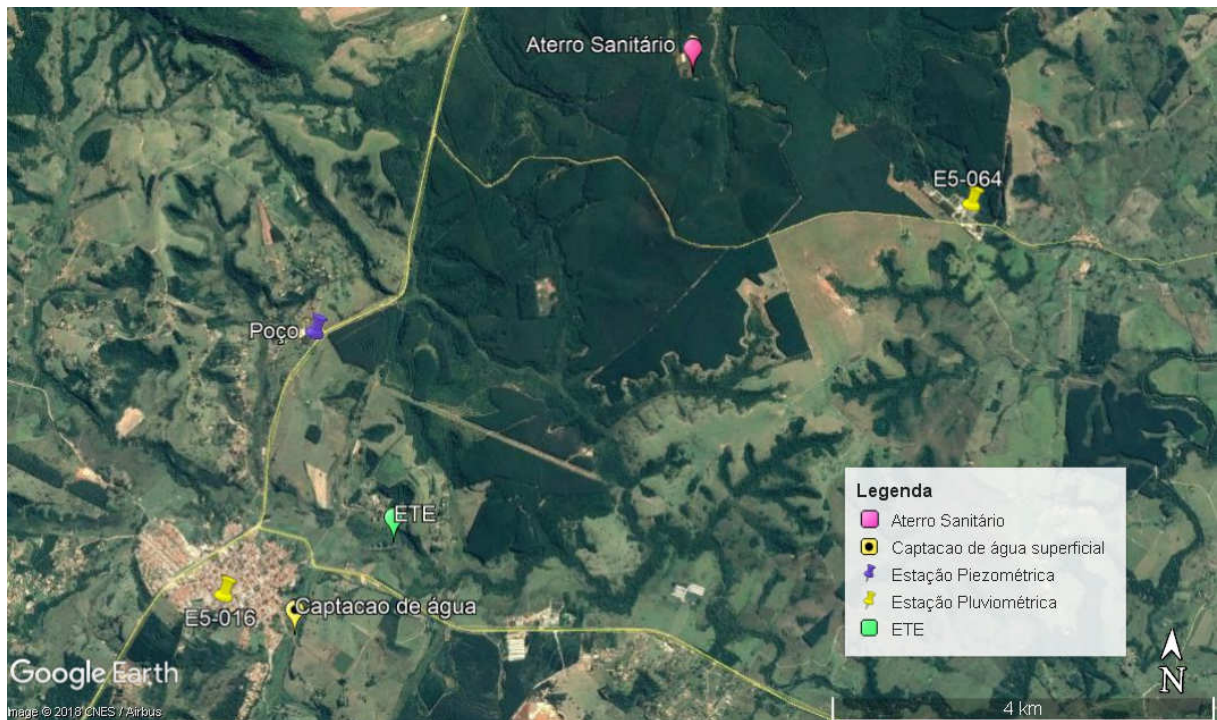
Outro posto pluviométrico local é o E5-016 (Bofete), localizado nas coordenadas $48^{\circ}15'43.025''$ O e $23^{\circ}6'17.029''$ S, no Datum SIRGAS 2000 (Figura 14 e Figura 15). Este último possui dados desde 1958 e foi utilizado para consolidação dos dados, está localizado em zona urbana.

Figura 14 - Localização no mapa dos postos de medição e serviços de saneamento no município de Bofete.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15 - Localização dos postos de medição e serviços de saneamento no município de Bofete, em imagem de satélite.



Fonte: GOOGLE EARTH.

No caso da evapotranspiração foi utilizado o banco de dados do CIIAGRO, contudo foram disponibilizados apenas os dados até o ano de 2011. Assim, para a utilização desse dado, foi feita a média de cada mês do ano da série toda e dividida pelo número de dias do mês correspondente para obter o valor diário.

4.2 MODELAGEM PROPOSTA

4. 2. 1 MÉTODO DA VARIAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE DO AQUÍFERO: WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)

O método WTF é utilizado para zona saturada do aquífero livre, essa metodologia é aplicável em um amplo período de tempo, de área, e também de magnitude de recarga (SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

É fundamentado na percepção de que a variação do nível freático (elevação) corresponde à variação do armazenamento, num determinado período de tempo, conforme a Equação 3:

$$\Delta S^{gw} = R = S_y \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Equação 3}$$

Onde ΔS^{gw} é o armazenamento de água, R é a recarga, S_y é o rendimento específico do aquífero, ΔH a variação do armazenamento de água, e Δt o intervalo de tempo (MANZIONE, 2015).

Contudo esse método possui incertezas associadas ao valor do rendimento específico (S_y), ou porosidade específica como é denominado por SCANLON; HEALY; COOK, (2002), pois essa variável repercute no valor final da estimativa de recarga. Esse parâmetro é representativo e específico da região estudada, sendo uma estimativa da ordem de grandeza, de acordo com as características locais. A Tabela 2, mostra valores de rendimento específico para os diferentes tipos de solo.

Tabela 2 - Estatísticas do rendimento específico de 17 estudos.

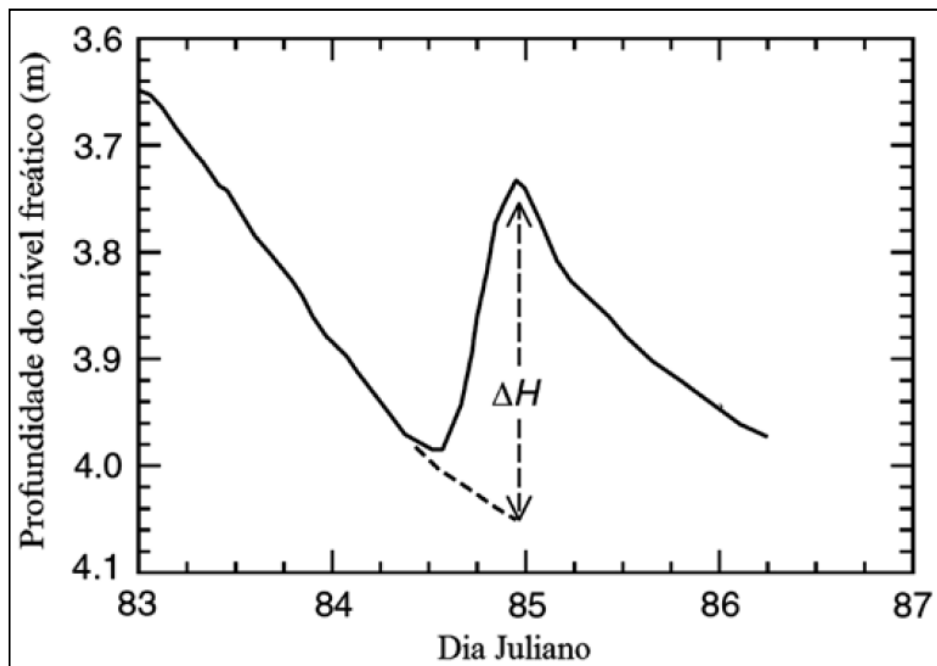
| Material | Rendimento específico (S_y) médio | Coefficiente de variação (%) | Rendimento específico mínimo | Rendimento específico máximo | Número de determinações |
|---------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Argila | 0,02 | 59 | 0,0 | 0,05 | 15 |
| Silte | 0,08 | 60 | 0,03 | 0,19 | 16 |
| Argila arenosa | 0,07 | 44 | 0,03 | 0,12 | 12 |
| Areia Fina | 0,21 | 32 | 0,10 | 0,28 | 17 |
| Areia média | 0,26 | 18 | 0,15 | 0,32 | 17 |
| Areia grossa | 0,27 | 18 | 0,20 | 0,35 | 17 |
| Areia com cascalho | 0,25 | 21 | 0,20 | 0,35 | 15 |
| Cascalho fino | 0,25 | 18 | 0,21 | 0,35 | 17 |
| Cascalho médio | 0,23 | 14 | 0,13 | 0,26 | 14 |
| Cascalho grosso | 0,22 | 20 | 0,12 | 0,26 | 13 |

Fonte: Traduzido de HEALY; COOK apud Johnson, 2002.

Como já citado anteriormente, no município de Bofete a geologia predominante é de arenito de granulação média a fina, e por essa característica da formação Piramboia, o município conta com a atividade de extração de areia. Assim, o valor de S_y utilizado para o cálculo da estimativa de recarga foi de 0,20, por não ter sido realizado o cálculo no local, então foi adotado um valor médio, razoável para a região estudada.

O valor da variação do armazenamento de água (ΔH) é obtido através da diferença entre o ponto mais alto do nível e o ponto mais baixo, sendo que para obter o ponto mais baixo a curva de recessão é extrapolada até o mesmo período de tempo do pico, como demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Hidrógrafa hipotética de um poço, demonstrando a obtenção do valor de ΔH .



Fonte: (LUCAS; GUANABARA; WENGLAND, 2012)

A recessão pode ser entendida como o decaimento do nível freático, devido a ausência de precipitações que seria a entrada de água no sistema. Pode ser estimada por decaimento exponencial. Desse modo, a retirada de água do aquífero pode ser devido ao fluxo de base dos cursos d'água, o que pode ser denominado recessão de água subterrânea (SANTOS; CELLIGOI, 2002).

Este método é recomendado para aquíferos com boa transmissividade, pois caso contrário a curva pode ser deslocada, essa é uma das desvantagens do método.

A recarga é um instrumento para a gestão eficiente do aquífero, pois ela disciplina a exploração da água subterrânea (GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE, 2016)

De acordo com GONÇALVES; SANTAROSA; MANZIONE (2016) os resultados obtidos com o método WTF demonstram que a estimativa da recarga tem relação com a geomorfologia local.

Para o presente estudo, a planilha utilizada para o cálculo é denominada *Estimation de La Pluie Efficace et de La Recharge* (ESPERE), que tem como objetivo estimar a chuva efetiva e a recarga. Para seu funcionamento foi necessária a instalação do *Statistical Software for Microsoft Excel* (XLSTAT), que é um software usado para análises de dados e estatísticas dentro do Microsoft Excel.

Com os dados de pluviometria e piezometria locais, além da evapotranspiração, foi realizada a estimativa da recarga no período entre 2012 e 2016, na planilha de cálculo ESPERE e após o cálculo foi verificado a porcentagem efetiva da precipitação que se tornou recarga no local.

4.3 BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO THORTHWAITE E MATHER

Para o balanço hídrico pelo método de Thorthwaite e Mather foram utilizados os dados disponibilizados no aplicativo GIOVANNI (NASA, 2018), de precipitação e temperatura. A localização informada foi da estação pluviométrica E5-064, nas coordenadas decimais como exige o sistema: -48,2 O e -23,1S, e para download dos dados, foram inseridas as coordenadas: -48,25 O, -23,15 S; e -48,15 L, -23,05 N.

Foi selecionada a opção série temporal (time series choice) e média da área (area averaged), no intervalo de tempo de 01/01/2012 a 30/12/2016. Em seguida foi selecionado medições (measurements), precipitação (precipitation), plataforma TRMM (platform TRMM), taxa de precipitação (precipitation rate), e TRMM_3B42_daily_v7 (mm/Day).

Os dados de temperatura utilizados foram da série MERRA, conjunto M2TMNXFLX_v5.12.4 em graus celsius. Foi selecionado medições (measurements),

temperatura do ar (air temperature), plataforma MERRA (Platform MERRA 2 Model), e temperatura do ar da superfície (surface air temperature).

Para o cálculo da Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD) foi utilizada a Equação 4, e os dados da Tabela 3 média para solo arenoso.

$$CAD = \frac{(CC - PMP)Da z}{10} \quad \text{Equação 4}$$

Onde CAD é a capacidade máxima de água disponível (mm); CC é a umidade do solo à capacidade de campo (%peso); PMP é a umidade do solo ao ponto de murcha permanente (%peso); Da é a densidade aparente do solo (g/cm³); e z representa a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm) (SANTOS, 2013).

Tabela 3 - Dados médios para o solo tipo arenosos.

| Textura do solo: Arenoso | | |
|---------------------------------|------------------|-------------------|
| Da (g/cm³) | CC(%peso) | PMP(%peso) |
| 1,65 | 9 | 4 |

Fonte: Adaptado de Santos (2013)

Para o valor de z (profundidade efetiva do sistema radicular da cultura em cm) é necessário saber o tipo de cultura, foi estimado o z médio de 43,3 mm, tirando a média das culturas de cana de açúcar, pastagem e laranja, que são as mais comuns no município de Bofete. Os valores estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipo de cultura e valores de z.

| Cultura | z máx (cm) |
|-----------------------|-------------------|
| Cana de açúcar | 40 |
| Pastagem | 30 |
| Laranja | 60 |
| Média | 43,3 |

Fonte: Adaptado de Folegatti (2004)

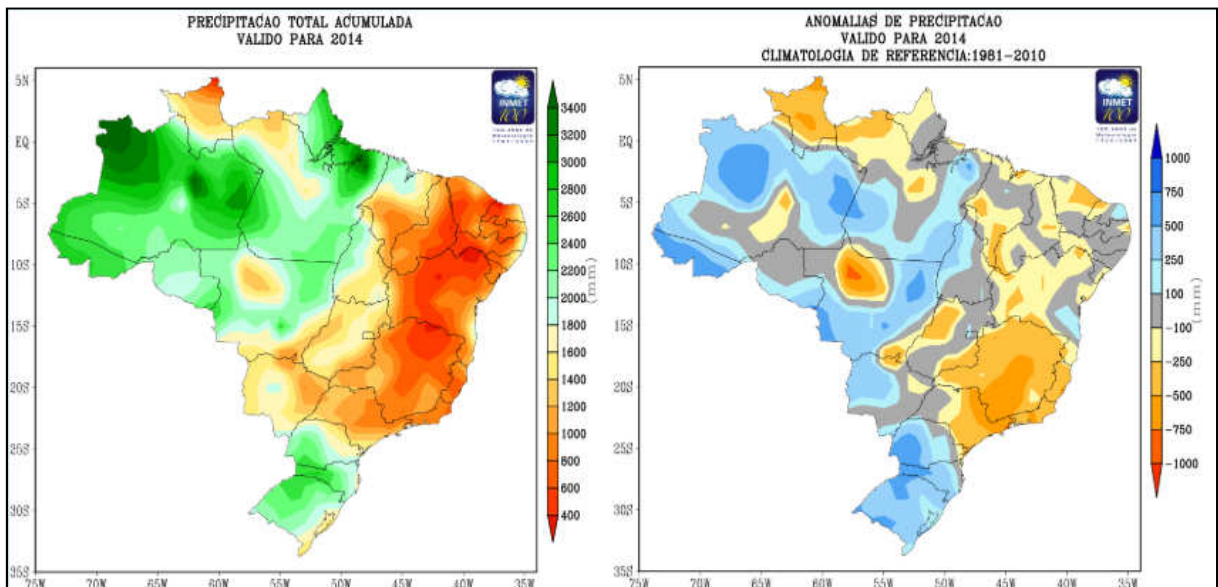
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE CLIMÁTICA E PLUVIOMÉTRICA NO PERÍODO ENTRE 2012 A 2016

Entre os anos de 2012 a 2016 ocorreram fenômenos climáticos que alteraram o regime de chuvas no Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, onde está inserido o município de Bofete, a área do presente estudo.

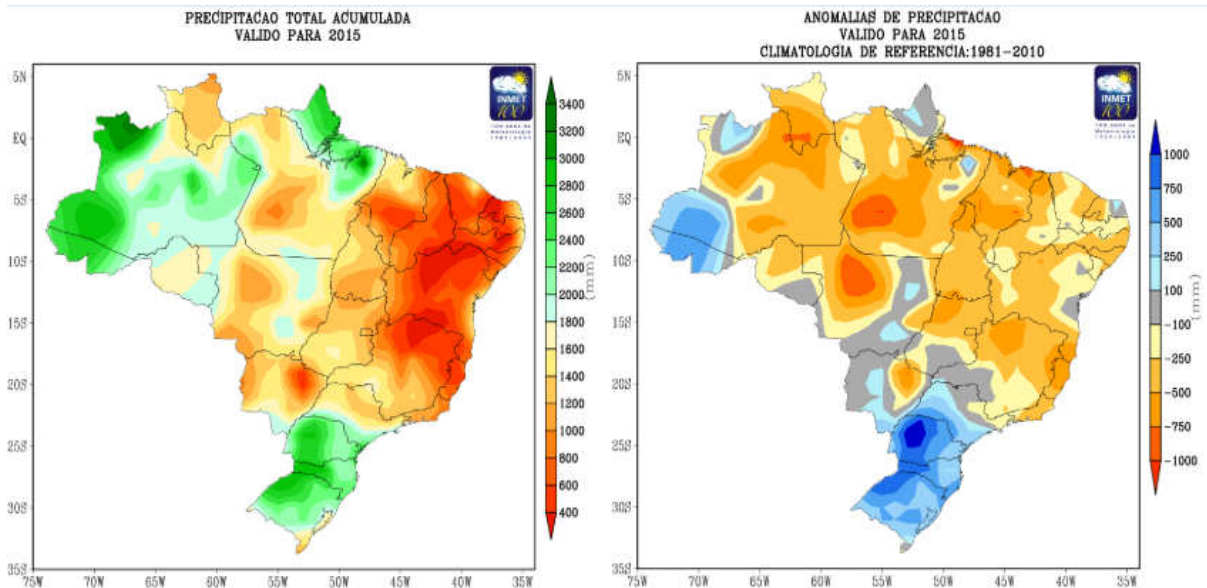
Em especial no ano de 2014, em que as precipitações no Estado de São Paulo ficaram abaixo da média, demonstrado nas Figura 17 e Figura 18, e que ficou conhecida como a “crise hídrica”, afetando o abastecimento público e a economia de um modo geral, visto que no período da escassez de chuvas as altas temperaturas aumentaram a demanda por água (MARENGO et al., 2015).

Figura 17 - Precipitação Acumulada e Anomalias de precipitação, ano de 2014.



Fonte: (INMET, 2016)

Figura 18 - Precipitação Acumulada e Anomalias de precipitação, ano de 2015.

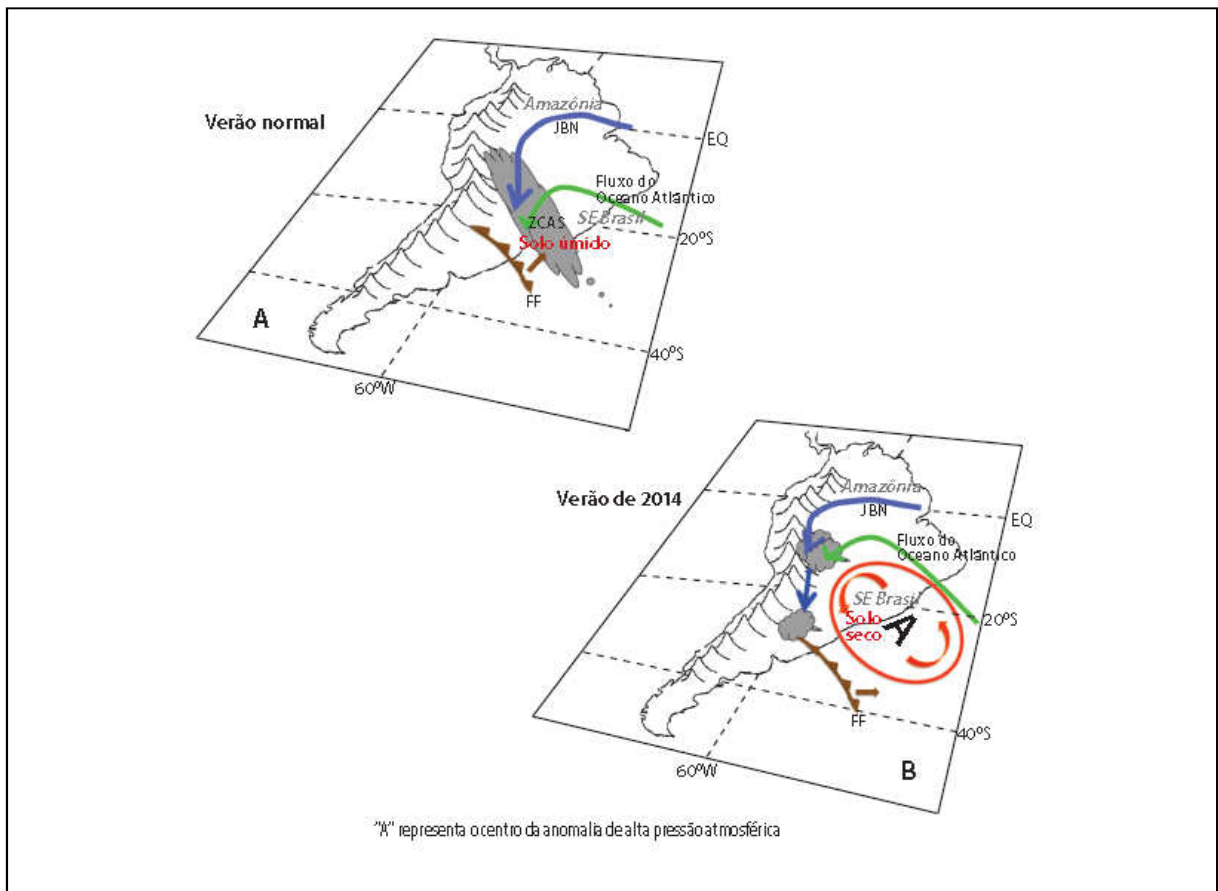


Fonte: (INMET, 2016)

Contudo em 2014 a ZACAS não conseguiu trazer a umidade da Amazônia para o sudeste e nem as frentes frias conseguiram atingir a região, por conta de um bloqueio atmosférico, assim denominado por “barrar” a ação desses fenômenos, como demonstrado na Figura 19. Assim, as precipitações ficaram abaixo do esperado (MARENGO et al., 2015).

Esse bloqueio é um sistema de alta pressão, também chamado anticiclone, que transporta o ar seco para a superfície terrestre e impede a subida do ar úmido. Esse bloqueio foi atípico, pois teve a duração de 45 dias e o que ocorre habitualmente é durar de 7 a 8 dias, com ocorrência em latitudes médias a altas (MARENGO et al., 2015).

Figura 19 - Elementos relevantes ao transporte de umidade na América do Sul para um verão normal ou climatológico (A) e para um verão seco de 2014 (B).



Fonte: (MARENGO et al., 2015)

Em 2015 ocorreu um fenômeno parecido, um sistema de alta pressão, mas em menor intensidade e duração, somado a isso, o solo ainda não havia se recuperado da seca do ano anterior e não havia umidade suficiente para o transporte para a atmosfera, o que provocou novamente a redução das precipitações (MARENGO et al., 2015).

Não há como afirmar uma relação direta a um fenômeno apenas, mas sim a um conjunto de fatores, entre eles o desmatamento na Amazônia, as mudanças climáticas globais, medidas inadequadas de gestão de recursos hídricos e a falta de conhecimento e moderação da sociedade. No entanto são aspectos para os quais o governo deve estar atento e promover medidas de prevenção (MARENGO et al., 2015).

Nos anos de 2015 e 2016 ocorreu outro fenômeno climático, o *El Niño* (EL) que favoreceu as precipitações na região sudeste e atinge também a região centro-

oeste. O fenômeno influenciou principalmente os meses de setembro a dezembro de 2015 e em 2016 de janeiro a março (RAMOS; REBELLO, 2016).

De acordo com GOLDEN GATE WEATHER SERVICES (2016), o evento de EL entre 2015 e 2016 foi classificado como muito forte pela *Oceanic Niño Index* (ONI), demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos anos com El Niño e La Niña por intensidade, de acordo com os valores do índice ONI, de 1972 a 2016.

| El Niño | | | | La Niña | | |
|---------|----------|---------|----------------|---------|----------|---------|
| Fraco | Moderado | Forte | Muito Forte | Fraco | Moderado | Forte |
| 1952-53 | 1951-52 | 1957-58 | 1982-83 | 1954-55 | 1955-56 | 1973-74 |
| 1953-54 | 1963-64 | 1965-66 | 1997-98 | 1964-65 | 1970-71 | 1975-76 |
| 1958-59 | 1968-69 | 1972-73 | 2015-16 | 1971-72 | 1995-96 | 1988-89 |
| 1969-70 | 1986-87 | 1987-88 | | 1974-75 | 2011-12 | 1998-99 |
| 1976-77 | 1994-95 | 1991-92 | | 1983-84 | | 1999-00 |
| 1977-78 | 2002-03 | | | 1984-85 | | 2007-08 |
| 1979-80 | 2009-10 | | | 2000-01 | | 2010-11 |
| 2004-05 | | | | 2005-06 | | |
| 2006-07 | | | | 2008-09 | | |
| 2014-15 | | | | 2016-17 | | |
| | | | | 2017-18 | | |

Fonte: Traduzido de (GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2016)

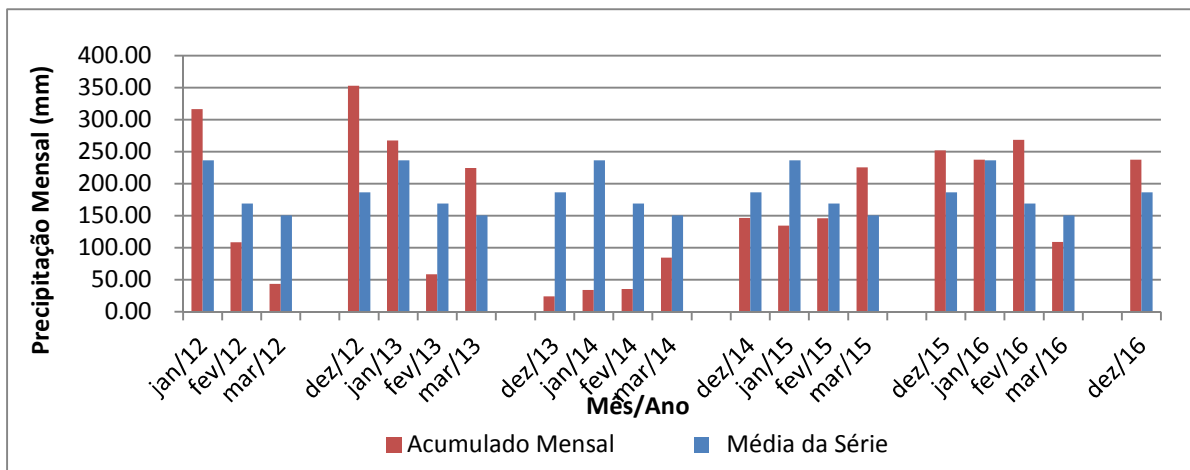
O evento climático conhecido como EL é caracterizado pelo aumento anormal da temperatura da superfície do mar, no Oceano Pacífico na porção Equatorial. No caso do fenômeno denominado *La Niña* (LN) ocorre o contrário, ou seja, a diminuição da temperatura da superfície do mar. No Brasil o fenômeno EL causa o aumento da temperatura e das precipitações no Sul e Sudeste e eventos de secas no Nordeste (FERREIRA, et al., 2017).

O evento de 2015 – 2016 ficou abaixo apenas do mais forte de todos que ocorreu em 1997-1998 e 1982-1983, o fenômeno perdeu a intensidade em maio, sendo que a temperatura da superfície do mar foi aos poucos diminuindo (RAMOS; REBELLO, 2016).

5.2 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA EM BOFETE

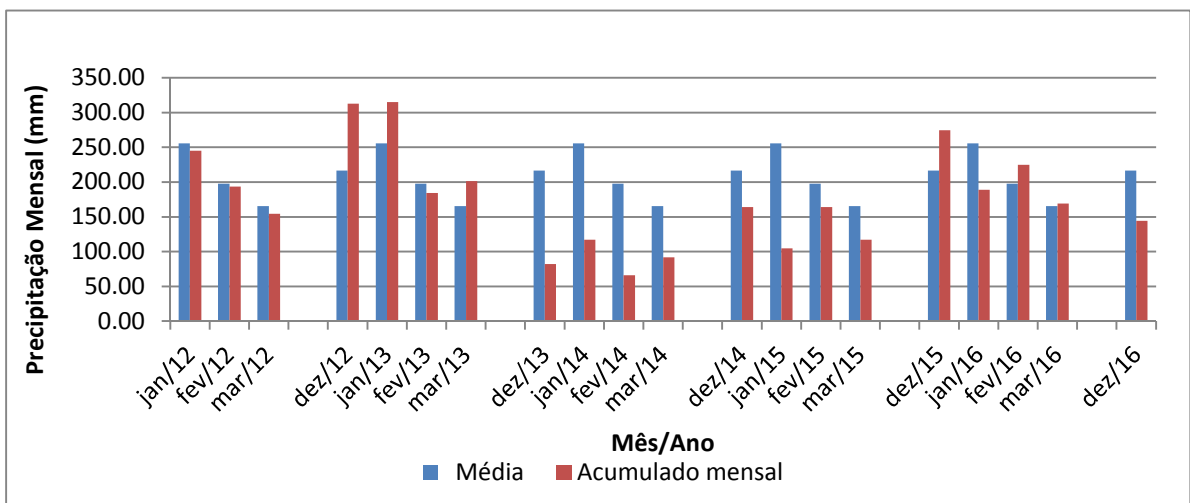
O município de Bofete tem como característica os verões quentes e chuvosos, sendo assim as maiores precipitações, de um modo geral, ocorrem principalmente nos meses de dezembro a março. Nos anos de 2014 e 2015 os índices pluviométricos ficaram abaixo da média esperada para o verão conforme ilustra as Figura 20 e Figura 21, dados obidos do monitoramento hidrológico do DAEE.

Figura 20 - Séries da estação pluviométrica E5-064 em Bofete, nos meses de verão, no período de 2012 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21 - Séries da estação pluviométrica E5-016 em Bofete, nos meses de verão, no período de 2012 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a estimativa da recarga foi utilizado os dados da estação pluviométrica E5-064, nos anos de 2012 a 2016, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de precipitação acumulada anual em Bofete – SP, estação pluviométrica E5-064.

| ANO | Precipitação (mm) |
|-------------|--------------------------|
| 2012 | 1.404 |
| 2013 | 1.148 |
| 2014 | 797 |
| 2015 | 1.510 |
| 2016 | 1.119 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como verificado na Tabela 6 a maior precipitação no período estudado foi no ano de 2015 com 1510 mm, e a menor em 2014 com 797 mm. A média da série desde 1971 até os dados atuais é de 1308 mm, assim o valor de 2014 apresenta 60% da média. A Tabela 7 demonstra os máximos e mínimos mensais da série para cada ano, e a média das precipitações na estação pluviométrica.

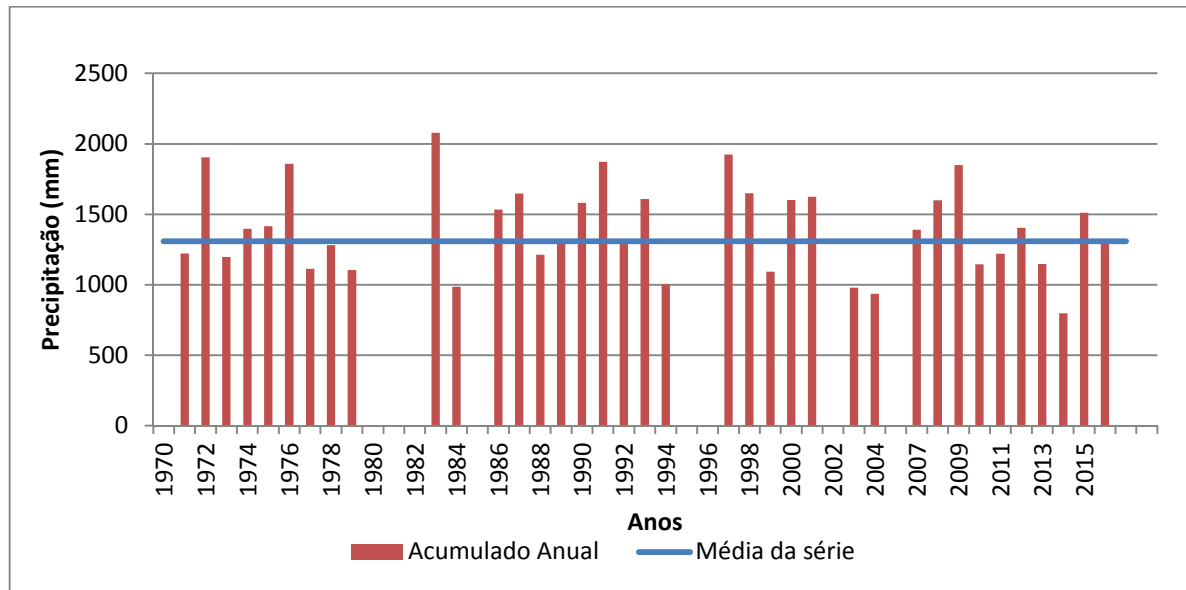
Tabela 7 - Estatísticas de precipitação no município de Bofete, estação pluviométrica E5-064 nos anos de 2012 a 2016.

| PRECIPITAÇÃO ACUMULADO MENSAL (mm) | | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|----------------------|
| ANO | Máximo | Mínimo | Média | Desvio Padrão |
| 2012 | 353 | 0 | 117 | 113 |
| 2013 | 268 | 24 | 96 | 74 |
| 2014 | 152 | 0 | 66 | 48 |
| 2015 | 252 | 18 | 126 | 83 |
| 2016 | 268 | 0 | 108 | 86 |
| Geral | 353 | 0 | 102 | 83 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A estação pluviométrica E5-064 está localizado em área rural e possui série de dados desde 1970 a 2017, sendo que nos anos de 1970, 2005 e 2017 está com dados inexistentes na maior parte do ano, assim como os demais anos que foram retirados do gráfico da série de dados (Figura 22). O ano seco de 2014 claramente foi o mais baixo de precipitação, assim os valores mais próximos deste ano seriam os anos de 2002 a 2004.

Figura 22 – Série de dados da estação pluviométrica E5-064 acumulado anual.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A estação pluviométrica E5-016 está inserido na área urbana e possui série de dados desde 1958 a 2017 (Figura 23), sendo que no ano de 1960 a maior parte do ano está com dados inexistentes e nos anos de 1959 e 1960 pelo menos três meses estão sem dados e, portanto, foram retirados do gráfico, assim como os demais anos com dados faltantes.

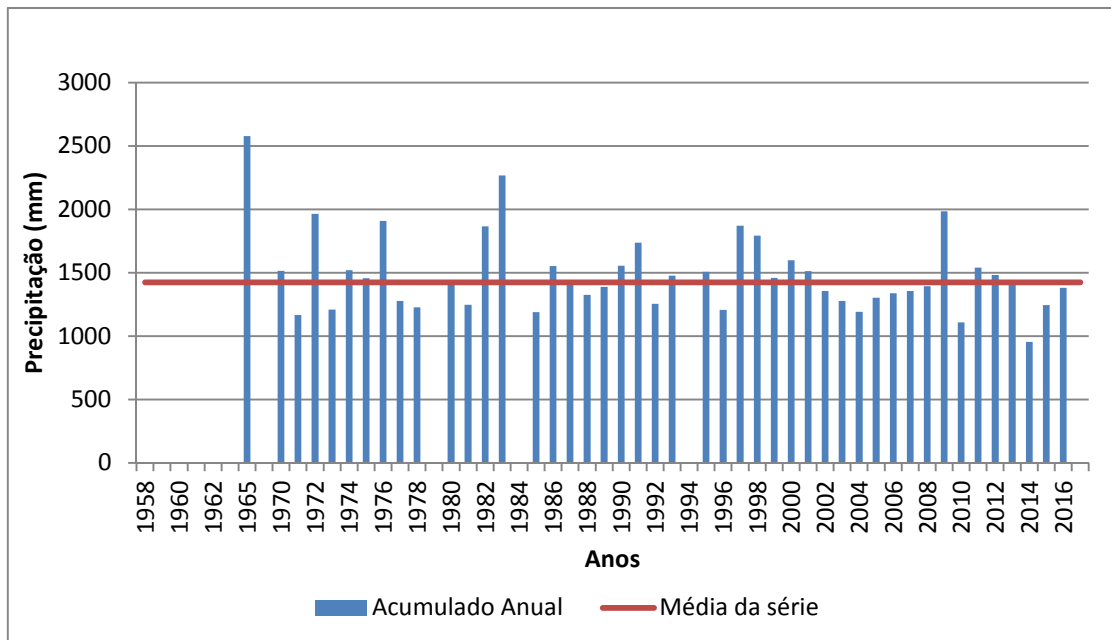
Comparando o posto E5-064 com o posto pluviométrico E5-016 (Bofete) que possui dados desde 1958, o valor do precipitado acumulado no ano de 2014 foi de 954 mm, que representa aproximadamente 67% da média, que foi de 14123 mm para essa série de dados. Esses dados demonstram que o ano de 2014 realmente foi um ano com baixas precipitações na região, devido às alterações climáticas e locais que provocaram a alteração no regime de chuvas. Na Tabela 8 estão os valores médios mensais para o intervalo estudado.

Tabela 8 - Estatísticas de precipitação no município de Bofete, estação pluviométrica E5-016 nos anos de 2012 a 2016.

| PRECIPITAÇÃO ACUMULADO MENSAL (mm) | | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|----------------------|
| ANO | Máximo | Mínimo | Média | Desvio Padrão |
| 2012 | 313 | 1 | 123 | 101 |
| 2013 | 315 | 1 | 118 | 83 |
| 2014 | 220 | 2 | 80 | 65 |
| 2015 | 275 | 0 | 104 | 93 |
| 2016 | 225 | 0 | 115 | 70 |
| Geral | 315 | 0 | 108 | 82 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 - Série de dados da estação pluviométrica E5-016 acumulado anual.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O poço de monitoramento piezométrico selecionado pertence à rede do RIMAS (CPRM, 2016), no município de Bofete, em local identificado como Sítio Dona Maria n.º 3500027885, e possui profundidade de 60,00 m.

O período de dados utilizados desse poço foi de 2012 a 2016. De acordo com a Tabela 9, no período selecionado, o nível médio diário da água subterrânea foi de -17,94 m valor representativo da série de dados visto que o desvio padrão é de 0,47. O valor máximo foi de -16,91 m em Março de 2013 e o mínimo foi de -18,72 m em outubro de 2015.

Tabela 9 - Níveis piezométricos no município de Bofete nos anos de 2012 a 2016.

| NÍVEL PIEZOMÉTRICO (m) | | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------|
| ANO | Máximo | Mínimo | Variação (Max. – Mín.) | Média | Desvio Padrão |
| 2012 | -17,43 | -17,81 | 0,38 | -17,63 | 0,10 |
| 2013 | -16,91 | -17,82 | 0,91 | -17,32 | 0,18 |
| 2014 | -17,56 | -18,52 | 0,96 | -18,08 | 0,28 |
| 2015 | -18,44 | -18,72 | 0,28 | -18,57 | 0,07 |
| 2016 | -17,90 | -18,58 | 0,68 | -18,11 | 0,15 |
| Média | -16,91 | -18,72 | 1,81 | -17,94 | 0,47 |

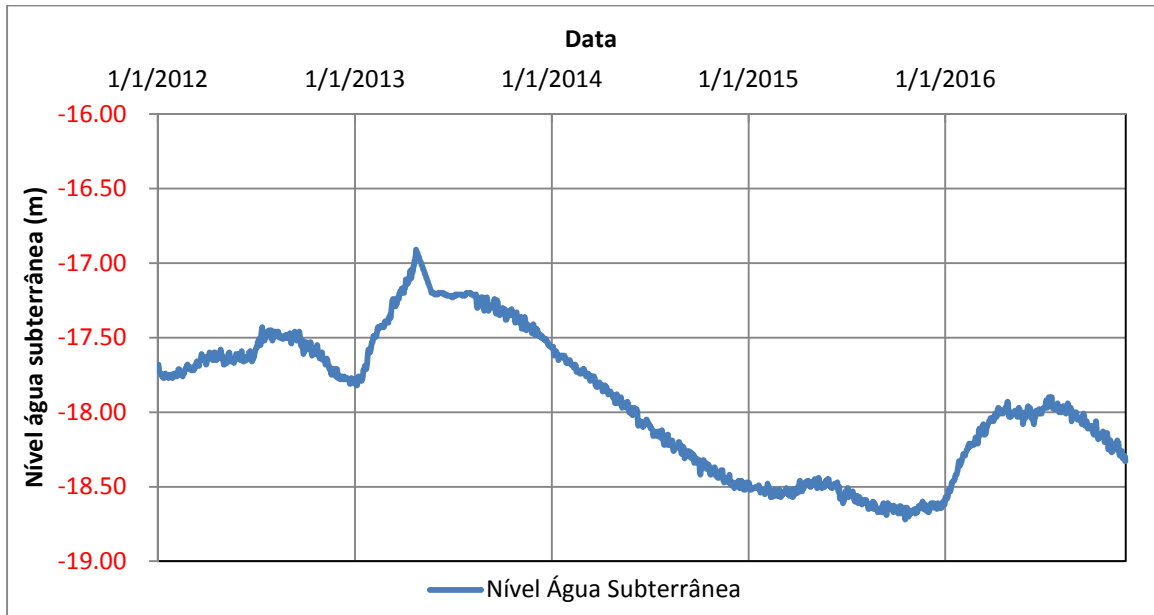
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Observa-se maior variação no nível piezométrico nos anos de 2013 e 2014, correspondendo a uma variação de 0,91 m e 0,96 m respectivamente, a menor variação foi em 2012 com 0,38 m, como também pode ser observado na Figura 24.

A distância entre os dois postos de monitoramento o pluviométrico e piezométrico é de aproximadamente 7,0 Km. No gráfico da Figura 25 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** observa-se a interação das águas subterrâneas e superficiais, onde após o período de chuvas, próximo a janeiro de 2013, a curva do nível freático sobe e no período de seca a curva entra em declínio, que seria a recessão da água subterrânea, certamente alimentando o fluxo de base dos cursos d'água até o retorno do período chuvoso.

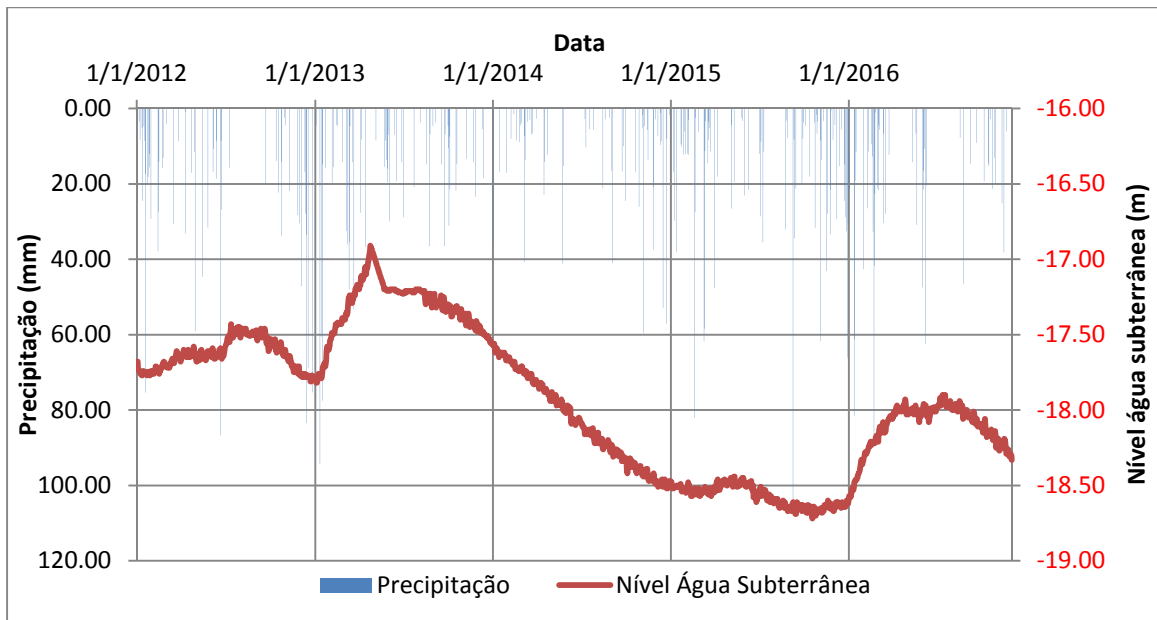
Em 2015, que foi o ano com maior precipitação acumulada, percebe-se que a curva de nível não responde imediatamente, sendo que o nível volta a subir próximo de dezembro e janeiro de 2016. Provavelmente o ocorrido se deu por conta das fracas precipitações em 2014, período imediatamente anterior, que fez com que a recuperação fosse mais lenta.

Figura 24 – Gráfico do monitoramento piezométrico no município de Bofete nos anos de 2012 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 25 - Gráfico das precipitações e piezometria no município de Bofete entre os anos de 2012 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para refinar o método foi utilizada a evapotranspiração do município, obtidas pelo CIIAGRO conforme Figura 26 contudo não foram disponibilizados os dados do

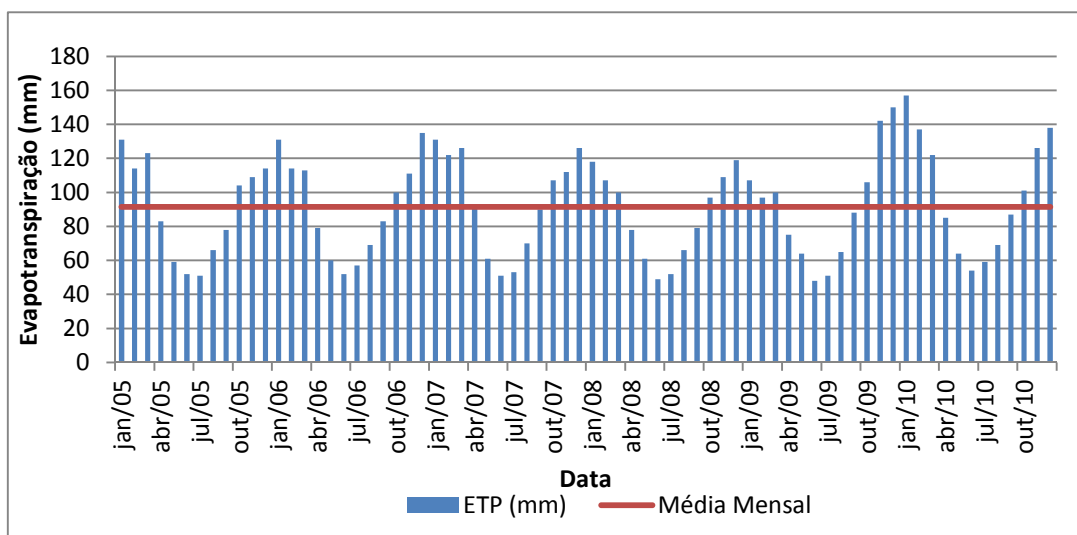
período estudado, assim foi adotado o valor médio da série disponível de 2005 a 2010 para 2012 a 2016 (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores de Evapotranspiração acumulados anuais - município de Bofete.

| ANO | Evapotranspiração Média (mm) |
|-------------|-------------------------------------|
| 2012 | 1.118 |
| 2013 | 1.111 |
| 2014 | 1.115 |
| 2015 | 1.115 |
| 2016 | 984 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 26 - Gráfico da evapotranspiração no município de Bofete entre os anos de 2004 a 2010.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.3 BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO THORTHWAITE E MATHER

O cálculo do balanço hídrico, a partir de dados de precipitação e evapotranspiração revelam os valores de entradas e saídas de água do solo, mostrando os déficits ou excedentes que podem ocorrer em determinadas épocas do ano. A equação do balanço hídrico pode ser comparada com a equação da continuidade, onde com a diferença entre entradas e saídas (de água) do sistema o resultado é a variação de armazenamento (de água) neste sistema (SANTOS, 2013).

Para o cálculo pelo método de Thorthwaite e Mather foram utilizados os dados disponibilizados no aplicativo GIOVANNI (NASA, 2018), de precipitação e temperatura.

5.3.1 Balanço hídrico ano 2012

Os dados de precipitação acumulada em cada mês do ano de 2012 estão apresentados na Tabela 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e as médias dos dados de temperatura estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 11 - Precipitação nos meses do ano de 2012.

| PRECIPITAÇÃO (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Mês | Acumulado mensal (2012) |
| janeiro | 250,64 |
| fevereiro | 132,66 |
| março | 72,45 |
| abril | 146,55 |
| maio | 119,91 |
| junho | 260,67 |
| julho | 53,97 |
| agosto | 0,90 |
| setembro | 40,52 |
| outubro | 142,27 |
| novembro | 43,79 |
| dezembro | 239,91 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 12 - Média da temperatura nos meses do ano de 2012.

| TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------|----------------------------|
| Mês | Média mensal (2012) |
| janeiro | 22,05 |
| fevereiro | 24,51 |
| março | 23,50 |
| abril | 22,18 |
| maio | 18,29 |
| junho | 17,92 |
| julho | 17,70 |
| agosto | 19,11 |
| setembro | 21,22 |
| outubro | 24,07 |
| novembro | 22,24 |
| dezembro | 25,10 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o cálculo do CAD foi utilizada a Equação 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Foi obtido o valor de 36 mm para o CAD local. No caso da evapotranspiração (ETP) foi calculada utilizando dados locais de i que é o índice térmico (mensal), N é o comprimento do dia com radiação solar, ND número de dias no mês, e ETP_p que é a evapotranspiração potencial (Tabela 13).

Tabela 13 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano 2012.

| Mês | T(°C) | i | N | ND | ETP_p (mm) | ETP (mm) |
|------------|--------------|------------|----------|-----------|-----------------------------|-----------------|
| jan | 22,0 | 9,45382578 | 13,2 | 31 | 86,6 | 98,4 |
| fev | 24,5 | 11,0969388 | 12,7 | 28 | 111,8 | 110,5 |
| mar | 23,5 | 10,4148984 | 12,1 | 31 | 101,1 | 105,3 |
| abr | 22,2 | 9,54089527 | 11,5 | 30 | 87,8 | 84,2 |
| mai | 18,3 | 7,12579528 | 10,9 | 31 | 55,1 | 51,7 |
| jun | 17,9 | 6,90513753 | 10,7 | 30 | 52,4 | 46,7 |
| jul | 17,7 | 6,77672671 | 10,8 | 31 | 50,8 | 47,3 |
| ago | 19,1 | 7,61366373 | 11,3 | 31 | 61,2 | 59,6 |
| set | 21,2 | 8,92133873 | 11,9 | 30 | 78,9 | 78,2 |
| out | 24,1 | 10,7990391 | 12,5 | 31 | 107,1 | 115,3 |
| nov | 22,2 | 9,58158589 | 13,1 | 30 | 88,4 | 96,6 |
| dez | 25,1 | 11,5043117 | 13,3 | 31 | 118,5 | 135,7 |
| Ano | 21,5 | 109,73 | - | - | 999,8 | 1029,4 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o balanço hídrico, demonstrado na Tabela 14, foram inseridos os dados médios de precipitação (P) obtidos pelo aplicativo GIOVANNI da NASA (2018), e de ETP calculado anteriormente.

Tabela 14 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2012.

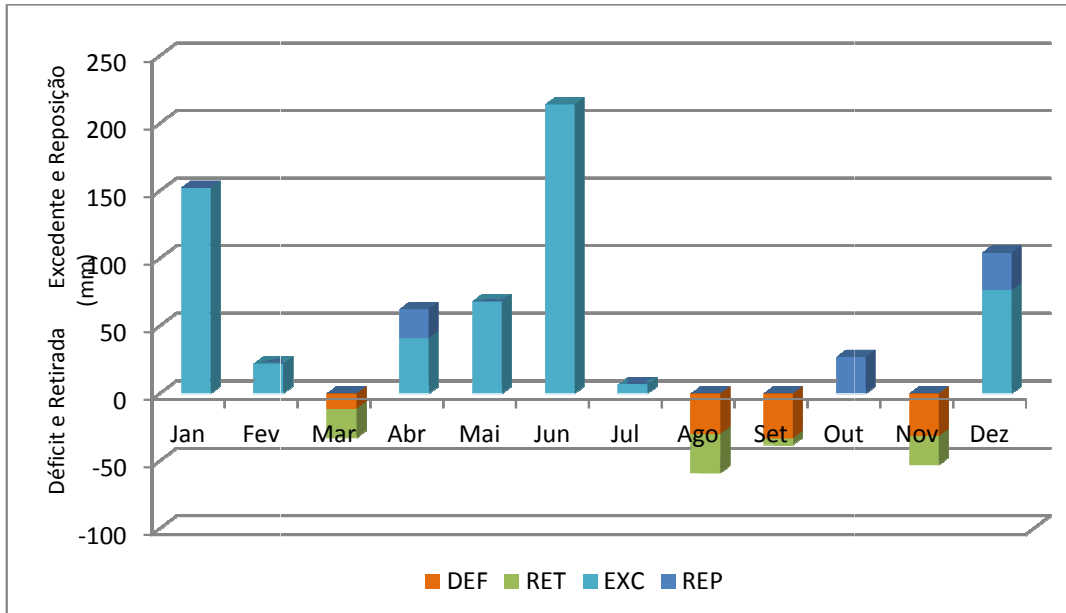
| Local: Bofete – SP (2012) | | | | | | | | CAD: 36 mm | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|
| MÊS | P | ETP | P-ETP | NA | ARM | ALT | ETR | DEF | EXC | RET | REP |
| JAN | 251 | 98 | 152 | 0 | 36 | 0 | 98 | 0 | 152 | 0 | 0 |
| FEV | 133 | 110 | 22 | 0 | 36 | 0 | 110 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| MAR | 72 | 105 | -33 | -33 | 14 | -22 | 94 | 11 | 0 | 22 | 0 |
| ABR | 147 | 84 | 62 | 0 | 36 | 22 | 84 | 0 | 41 | 0 | 22 |
| MAI | 120 | 52 | 68 | 0 | 36 | 0 | 52 | 0 | 68 | 0 | 0 |
| JUN | 261 | 47 | 214 | 0 | 36 | 0 | 47 | 0 | 214 | 0 | 0 |
| JUL | 54 | 47 | 7 | 0 | 36 | 0 | 47 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| AGO | 1 | 60 | -59 | -59 | 7 | -29 | 30 | 30 | 0 | 29 | 0 |
| SET | 41 | 78 | -38 | -96 | 2 | -5 | 45 | 33 | 0 | 5 | 0 |
| OUT | 142 | 115 | 27 | -7 | 29 | 27 | 115 | 0 | 0 | 0 | 27 |
| NOV | 44 | 97 | -53 | -53 | 8 | -21 | 65 | 32 | 0 | 21 | 0 |
| DEZ | 240 | 136 | 104 | 0 | 36 | 28 | 136 | 0 | 77 | 0 | 28 |
| ANO | 1,504 | 1,018 | 475 | - | - | 0 | 924 | 106 | 581 | 76 | 76 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Onde: P = precipitação média mensal (mm); ETP = evapotranspiração calculada (mm); NA = negativo acumulado (mm); ARM = armazenamento; ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão; ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); DEF = deficiência hídrica; EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm); RET = retirada (ALT negativas); REP = reposição (ALT positivas) (SANTOS, 2013).

Com os valores obtidos no balanço hídrico para o período estudado foram elaborados os gráficos com os déficits e retiradas, excedentes e reposição (Figura 27 e Figura 28).

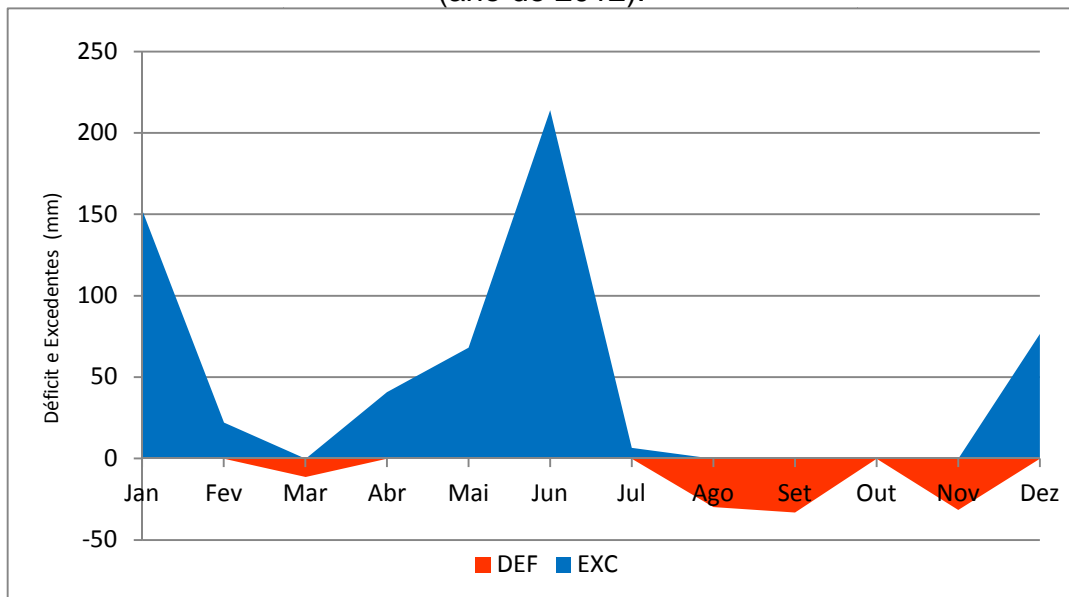
Figura 27 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2012.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os gráficos e o balanço hídrico mostram que no ano de 2012 o município de Bofete foi deficiente em água apenas nos meses de março, agosto, setembro e novembro, contudo após cada mês de déficit e retirada houve períodos de excedente e reposição, como abril, outubro e dezembro, regulando o ano como um todo e evitando a falta do recurso.

Figura 28 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2012).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.3.2 Balanço hídrico ano 2013

De modo análogo ao item anterior foi realizado o cálculo pelo método de Thorthwaite e Mather para o ano de 2013. Os dados de precipitação acumulada em cada mês do ano de 2013 estão apresentadas na Tabela 15, e as médias dos dados de temperatura estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 15 - Média da precipitação nos meses do ano de 2013.

| PRECIPITAÇÃO (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Mês | Acumulado mensal (2013) |
| janeiro | 166,53 |
| fevereiro | 191,59 |
| março | 184,75 |
| abril | 98,33 |
| maio | 131,94 |
| junho | 112,40 |
| julho | 32,40 |
| agosto | 4,05 |
| setembro | 80,14 |
| outubro | 89,99 |
| novembro | 120,39 |
| dezembro | 100,58 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 16 - Média da temperatura nos meses do ano de 2013.

| TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------|----------------------------|
| Mês | Média mensal (2013) |
| janeiro | 22,45 |
| fevereiro | 23,46 |
| março | 22,26 |
| abril | 19,83 |
| maio | 19,09 |
| junho | 18,30 |
| julho | 16,53 |
| agosto | 17,79 |
| setembro | 20,06 |
| outubro | 20,88 |
| novembro | 22,11 |
| dezembro | 24,08 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi utilizado o valor de 36 mm para o CAD local. Para a evapotranspiração (ETP) foi calculada utilizando dados locais de i que é o índice térmico (mensal), N é o comprimento do dia com radiação solar, ND número de dias no mês, e ETP_p que é a evapotranspiração potencial (Tabela 17).

Tabela 17 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2013.

| Mês | T(°C) | i | N | ND | ETP_p (mm) | ETP (mm) |
|------------|--------------|------------|----------|-----------|-----------------------------|-----------------|
| jan | 22,45 | 9,71726509 | 13,2 | 31 | 92,9 | 105,6 |
| fev | 23,46 | 10,3852054 | 12,7 | 28 | 102,5 | 101,3 |
| mar | 22,26 | 9,59490359 | 12,1 | 31 | 91,2 | 95,0 |
| abr | 19,83 | 8,05217979 | 11,5 | 30 | 70,3 | 67,3 |
| mai | 19,09 | 7,60308167 | 10,9 | 31 | 64,5 | 60,6 |
| jun | 18,30 | 7,13328412 | 10,7 | 30 | 58,7 | 52,4 |
| jul | 16,53 | 6,113464 | 10,8 | 31 | 46,7 | 43,4 |
| ago | 17,79 | 6,83011106 | 11,3 | 31 | 55,0 | 53,6 |
| set | 20,06 | 8,19273961 | 11,9 | 30 | 72,1 | 71,5 |
| out | 20,88 | 8,70675534 | 12,5 | 31 | 78,9 | 84,9 |
| nov | 22,11 | 9,49157291 | 13,1 | 30 | 89,7 | 97,9 |
| dez | 24,08 | 10,801713 | 13,3 | 31 | 108,7 | 124,5 |
| Ano | 20,6 | 102,62 | - | - | 931,2 | 957,9 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o balanço hídrico, demonstrado na Tabela 18, foram inseridos os dados médios de precipitação (P) obtidos pelo aplicativo GIOVANNI da NASA (2018), e de ETP calculado anteriormente.

Tabela 18 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2013.

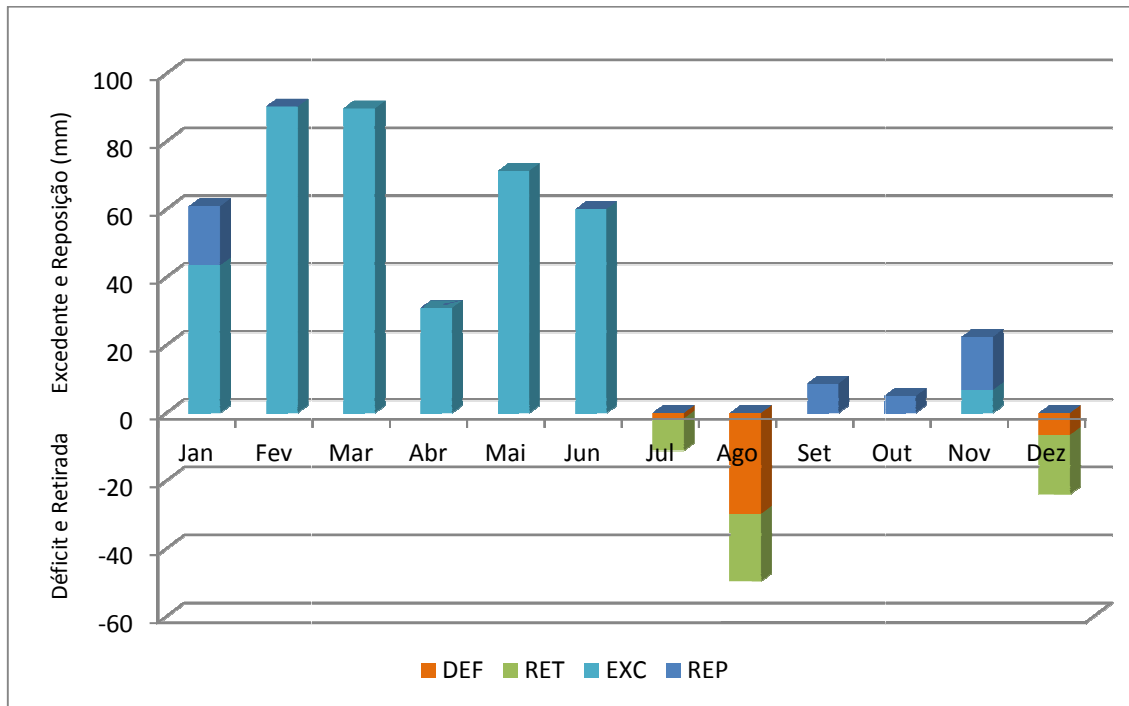
| Local: Bofete - SP (2013) | | | | | | | | CAD: 36 mm | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|
| MÊS | P | ETP | P-ETP | NA | ARM | ALT | ETR | DEF | EXC | RET | REP |
| JAN | 167 | 106 | 61 | 0 | 36 | 17 | 106 | 0 | 44 | 0 | 17 |
| FEV | 192 | 101 | 90 | 0 | 36 | 0 | 101 | 0 | 90 | 0 | 0 |
| MAR | 185 | 95 | 90 | 0 | 36 | 0 | 95 | 0 | 90 | 0 | 0 |
| ABR | 98 | 67 | 31 | 0 | 36 | 0 | 67 | 0 | 31 | 0 | 0 |
| MAI | 132 | 61 | 71 | 0 | 36 | 0 | 61 | 0 | 71 | 0 | 0 |
| JUN | 112 | 52 | 60 | 0 | 36 | 0 | 52 | 0 | 60 | 0 | 0 |
| JUL | 32 | 43 | -11 | -11 | 27 | -9 | 42 | 2 | 0 | 9 | 0 |
| AGO | 4 | 54 | -50 | -61 | 7 | -20 | 24 | 30 | 0 | 20 | 0 |
| SET | 80 | 72 | 9 | -31 | 15 | 9 | 72 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| OUT | 90 | 85 | 5 | -20 | 20 | 5 | 85 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| NOV | 120 | 98 | 22 | 0 | 36 | 16 | 98 | 0 | 7 | 0 | 16 |
| DEZ | 101 | 124 | -24 | -24 | 19 | -17 | 118 | 6 | 0 | 17 | 0 |
| ANO | 1,313 | 1,018 | 355 | - | - | 0 | 920 | 38 | 393 | 47 | 47 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Onde: P = precipitação média mensal (mm); ETP = evapotranspiração calculada (mm); NA = negativo acumulado (mm); ARM = armazenamento; ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão; ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); DEF = deficiência hídrica; EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm); RET = retirada (ALT negativas); REP = reposição (ALT positivas) (SANTOS, 2013).

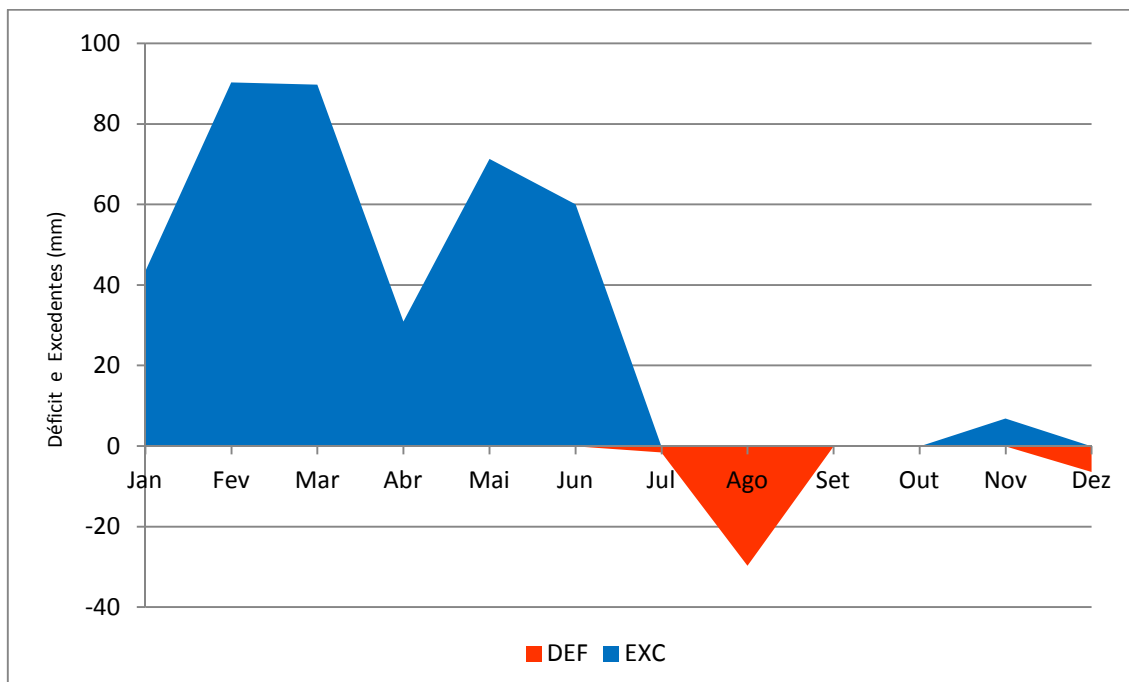
Com os valores obtidos no balanço hídrico para o período estudado foram elaborados os gráficos com os déficits e retiradas, excedentes e reposição (Figura 29 e Figura 30).

Figura 29 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2013.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 30 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2013).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em 2013 os cálculos e os gráficos do balanço hídrico demonstram déficit e retirada nos meses de julho, agosto e dezembro, e mesmo no período após a seca em setembro, outubro e novembro houve reposição da água. Interessante notar que no período de janeiro a junho houve excedentes e reposição regulando o período como um todo.

5.3.3 Balanço hídrico ano 2014

De modo semelhante ao item anterior foi realizado o cálculo pelo método de Thornthwaite e Mather para o ano de 2014. Os dados de precipitação acumulada em cada mês do ano de 2014 estão apresentadas na Tabela 19, e as médias dos dados de temperatura estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 19 - Média da precipitação nos meses do ano de 2014.

| PRECIPITAÇÃO (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Mês | Acumulado mensal (2014) |
| janeiro | 101,59 |
| fevereiro | 104,30 |
| março | 133,04 |
| abril | 102,02 |
| maio | 41,54 |
| junho | 14,84 |
| julho | 38,09 |
| agosto | 29,99 |
| setembro | 96,23 |
| outubro | 41,78 |
| novembro | 200,99 |
| dezembro | 223,72 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi utilizado o valor de 36 mm para o CAD local. Para a evapotranspiração (ETP) foi calculada utilizando dados locais de i que é o índice térmico (mensal), N é o comprimento do dia com radiação solar, ND número de dias no mês, e ETP_p que é a evapotranspiração potencial (Tabela 21).

Tabela 20 - Média da temperatura nos meses do ano de 2014.

| TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------|----------------------------|
| Mês | Média mensal (2014) |
| janeiro | 25,37 |
| fevereiro | 26,11 |
| março | 23,84 |
| abril | 21,86 |
| maio | 19,49 |
| junho | 18,97 |
| julho | 17,82 |
| agosto | 19,68 |
| setembro | 22,14 |
| outubro | 23,44 |
| novembro | 22,85 |
| dezembro | 23,65 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 21 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2014.

| Mês | T(°C) | i | N | ND | ETPp (mm) | ETP (mm) |
|------------|--------------|------------|----------|-----------|------------------|-----------------|
| jan | 25,37 | 11,689393 | 13,2 | 31 | 121,0 | 137,6 |
| fev | 26,11 | 12,2141188 | 12,7 | 28 | 130,3 | 128,7 |
| mar | 23,84 | 10,6407078 | 12,1 | 31 | 103,4 | 107,7 |
| abr | 21,86 | 9,33138257 | 11,5 | 30 | 82,9 | 79,5 |
| mai | 19,49 | 7,84441902 | 10,9 | 31 | 62,0 | 58,2 |
| jun | 18,97 | 7,52865214 | 10,7 | 30 | 57,8 | 51,6 |
| jul | 17,82 | 6,84793147 | 10,8 | 31 | 49,3 | 45,9 |
| ago | 19,68 | 7,95756891 | 11,3 | 31 | 63,5 | 61,8 |
| set | 22,14 | 9,5154687 | 11,9 | 30 | 85,7 | 85,0 |
| out | 23,44 | 10,3723834 | 12,5 | 31 | 99,0 | 106,6 |
| nov | 22,85 | 9,9771383 | 13,1 | 30 | 92,8 | 101,3 |
| dez | 23,65 | 10,5116045 | 13,3 | 31 | 101,3 | 116,0 |
| Ano | 22,1 | 114,43 | - | - | 1049,0 | 1079,7 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o balanço hídrico, demonstrado na Tabela 22, foram inseridos os dados médios de precipitação (P) obtidos pelo aplicativo GIOVANNI da NASA (2018), e de ETP calculado anteriormente.

Tabela 22 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2014.

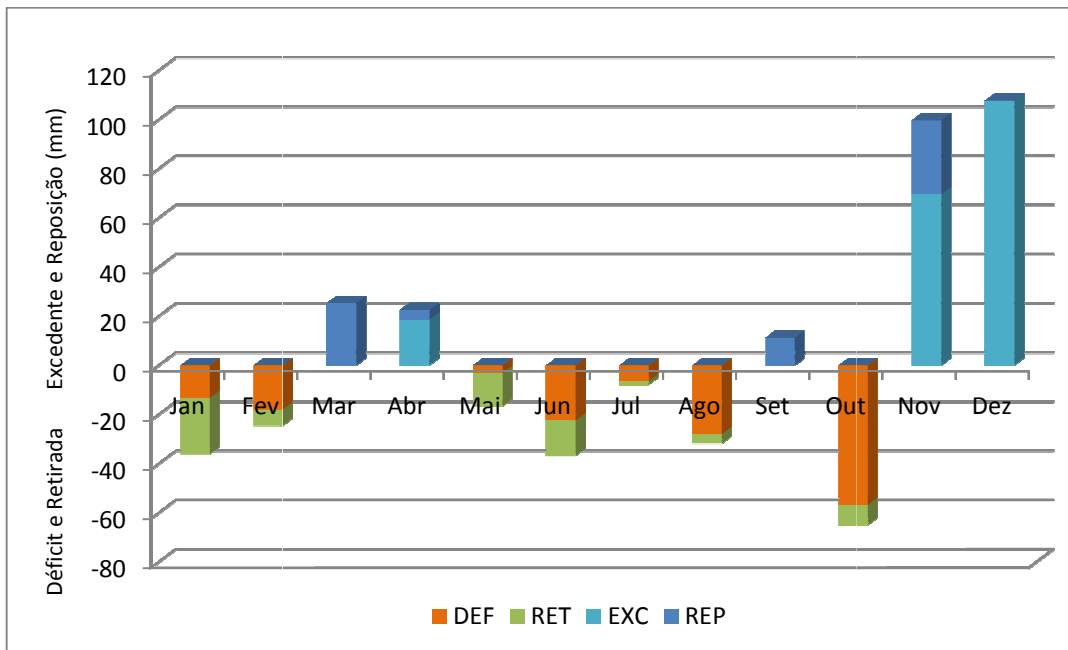
| Local: Bofete - SP (2014) | | | | | | | | CAD: 36 mm | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|
| MÊS | P | ETP | P-ETP | NA | ARM | ALT | ETR | DEF | EXC | RET | REP |
| JAN | 102 | 138 | -36 | -36 | 13 | -23 | 124 | 13 | 0 | 23 | 0 |
| FEV | 104 | 129 | -24 | -60 | 7 | -7 | 111 | 18 | 0 | 7 | 0 |
| MAR | 133 | 108 | 25 | -4 | 32 | 25 | 108 | 0 | 0 | 0 | 25 |
| ABR | 102 | 79 | 23 | 0 | 36 | 4 | 79 | 0 | 19 | 0 | 4 |
| MAI | 42 | 58 | -17 | -17 | 22 | -14 | 55 | 3 | 0 | 14 | 0 |
| JUN | 15 | 52 | -37 | -54 | 8 | -14 | 29 | 22 | 0 | 14 | 0 |
| JUL | 38 | 46 | -8 | -62 | 7 | -2 | 40 | 6 | 0 | 2 | 0 |
| AGO | 30 | 62 | -32 | -93 | 3 | -4 | 34 | 28 | 0 | 4 | 0 |
| SET | 96 | 85 | 11 | -34 | 14 | 11 | 85 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| OUT | 42 | 107 | -65 | -65 | 6 | -8 | 50 | 57 | 0 | 8 | 0 |
| NOV | 201 | 101 | 100 | 0 | 36 | 30 | 101 | 0 | 70 | 0 | 30 |
| DEZ | 224 | 116 | 108 | 0 | 36 | 0 | 116 | 0 | 108 | 0 | 0 |
| ANO | 1,128 | 1,018 | 48 | - | - | 0 | 932 | 148 | 196 | 71 | 71 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Onde: P = precipitação média mensal (mm); ETP = evapotranspiração calculada (mm); NA = negativo acumulado (mm); ARM = armazenamento; ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão; ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); DEF = deficiência hídrica; EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm); RET = retirada (ALT negativas); REP = reposição (ALT positivas) (SANTOS, 2013).

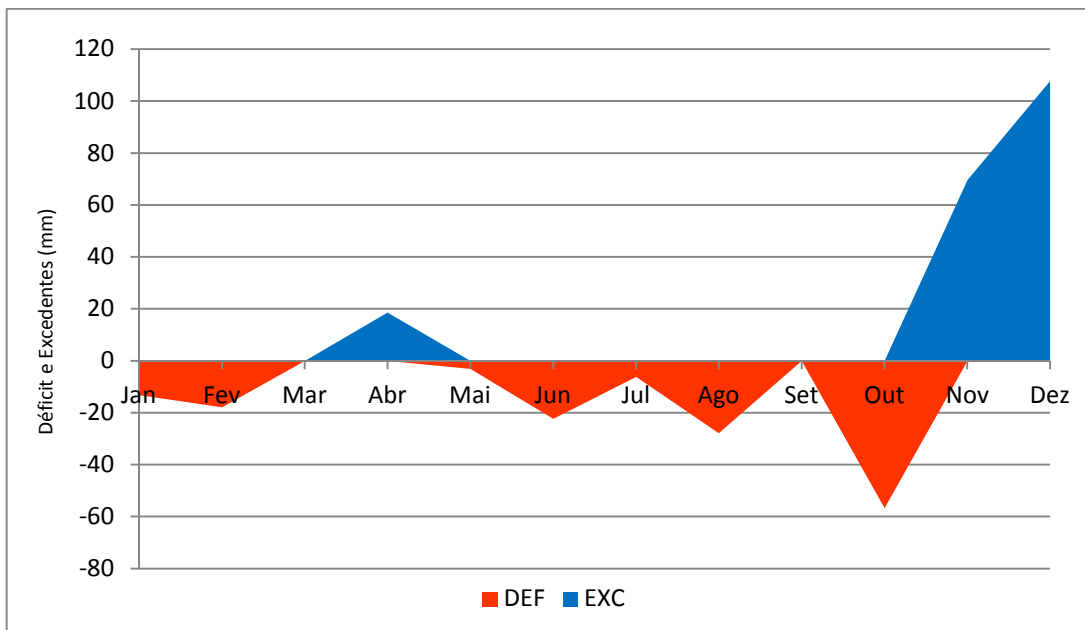
Com os valores obtidos no balanço hídrico para o ano de 2014 foram elaborados os gráficos com os déficits e retiradas, excedentes e reposição (Figura 31 e Figura 32).

Figura 31 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2014.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 32 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O ano de 2014 ficou abaixo das precipitações médias esperadas para o período, conforme explanado nos itens anteriores de análise pluviométrica e

cimatológica em Bofete, os cálculos e os gráficos do balanço hídrico demonstram esse ano de “crise hídrica” com déficit e retirada de água na maior parte do ano, salvo em alguns poucos meses como março, abril e setembro com uma baixa reposição e excedente, e nos meses de novembro e dezembro que há uma recuperação dos níveis, com uma grande parcela de excedentes e reposição.

5.3.4 Balanço hídrico ano 2015

De modo similar ao item anterior foi realizado o cálculo pelo método de Thornthwaite e Mather para o ano de 2015. Os dados de precipitação acumulada em cada mês do ano de 2015 estão apresentadas na Tabela 23, e as médias dos dados de temperatura estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 23 - Média da precipitação nos meses do ano de 2015.

| PRECIPITAÇÃO (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Mês | Acumulado mensal (2015) |
| janeiro | 187,06 |
| fevereiro | 190,60 |
| março | 213,81 |
| abril | 45,09 |
| maio | 107,77 |
| junho | 18,98 |
| julho | 82,22 |
| agosto | 40,95 |
| setembro | 194,74 |
| outubro | 124,88 |
| novembro | 197,53 |
| dezembro | 187,50 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi utilizado o valor de 36 mm para o CAD local. Para a evapotranspiração (ETP) foi calculada utilizando dados locais de i que é o índice térmico (mensal), N é o comprimento do dia com radiação solar, ND número de dias no mês, e ETP_p que é a evapotranspiração potencial (Tabela 25).

Tabela 24 - Média da temperatura nos meses do ano de 2015.

| TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------|----------------------------|
| Mês | Média mensal (2015) |
| janeiro | 25,48 |
| fevereiro | 23,55 |
| março | 22,51 |
| abril | 21,40 |
| maio | 19,12 |
| junho | 18,43 |
| julho | 18,36 |
| agosto | 20,74 |
| setembro | 22,60 |
| outubro | 23,61 |
| novembro | 23,21 |
| dezembro | 23,96 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 25 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2015.

| Mês | T(°C) | i | N | ND | ETPp (mm) | ETP (mm) |
|------------|--------------|------------|----------|-----------|------------------|-----------------|
| jan | 25,48 | 11,7702273 | 13,2 | 31 | 122,6 | 139,4 |
| fev | 23,55 | 10,4494366 | 12,7 | 28 | 100,7 | 99,5 |
| mar | 22,51 | 9,75570603 | 12,1 | 31 | 89,9 | 93,7 |
| abr | 21,40 | 9,03557518 | 11,5 | 30 | 79,2 | 75,9 |
| mai | 19,12 | 7,62174632 | 10,9 | 31 | 59,8 | 56,1 |
| jun | 18,43 | 7,21001731 | 10,7 | 30 | 54,6 | 48,7 |
| jul | 18,36 | 7,16862177 | 10,8 | 31 | 54,1 | 50,3 |
| ago | 20,74 | 8,61617449 | 11,3 | 31 | 73,2 | 71,3 |
| set | 22,60 | 9,81365454 | 11,9 | 30 | 90,8 | 90,0 |
| out | 23,61 | 10,483357 | 12,5 | 31 | 101,3 | 109,0 |
| nov | 23,21 | 10,2168453 | 13,1 | 30 | 97,0 | 105,9 |
| dez | 23,96 | 10,7196915 | 13,3 | 31 | 105,1 | 120,3 |
| Ano | 21,9 | 112,86 | - | - | 1028,3 | 1060,1 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o balanço hídrico, demonstrado na Tabela 26, foram inseridos os dados médios de precipitação (P) obtidos pelo aplicativo GIOVANNI da NASA (2018), e de ETP calculado anteriormente.

Tabela 26 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2015.

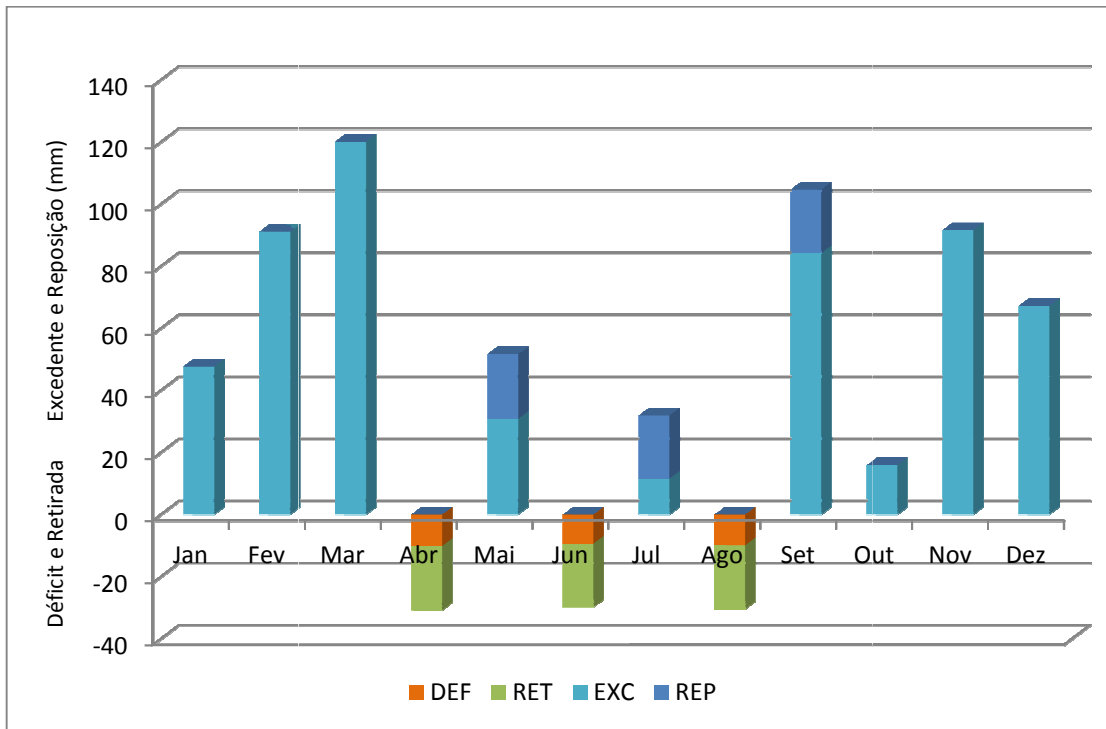
| Local: Bofete - SP (2015) | | | | | | | | CAD: 36 mm | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|------------|-----|-----|-----|
| MÊS | P | ETP | P-ETP | NA | ARM | ALT | ETR | DEF | EXC | RET | REP |
| JAN | 187 | 139 | 48 | 0 | 36 | 0 | 139 | 0 | 48 | 0 | 0 |
| FEV | 191 | 99 | 91 | 0 | 36 | 0 | 99 | 0 | 91 | 0 | 0 |
| MAR | 214 | 94 | 120 | 0 | 36 | 0 | 94 | 0 | 120 | 0 | 0 |
| ABR | 45 | 76 | -31 | -31 | 15 | -21 | 66 | 10 | 0 | 21 | 0 |
| MAI | 108 | 56 | 52 | 0 | 36 | 21 | 56 | 0 | 31 | 0 | 21 |
| JUN | 19 | 49 | -30 | -30 | 16 | -20 | 39 | 9 | 0 | 20 | 0 |
| JUL | 82 | 50 | 32 | 0 | 36 | 20 | 50 | 0 | 12 | 0 | 20 |
| AGO | 41 | 71 | -30 | -30 | 16 | -20 | 61 | 10 | 0 | 20 | 0 |
| SET | 195 | 90 | 105 | 0 | 36 | 20 | 90 | 0 | 84 | 0 | 20 |
| OUT | 125 | 109 | 16 | 0 | 36 | 0 | 109 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| NOV | 198 | 106 | 92 | 0 | 36 | 0 | 106 | 0 | 92 | 0 | 0 |
| DEZ | 187 | 120 | 67 | 0 | 36 | 0 | 120 | 0 | 67 | 0 | 0 |
| ANO | 1,591 | 1,018 | 531 | - | - | 0 | 1,031 | 29 | 560 | 62 | 62 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Onde: P = precipitação média mensal (mm); ETP = evapotranspiração calculada (mm); NA = negativo acumulado (mm); ARM = armazenamento; ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão; ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); DEF = deficiência hídrica; EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm); RET = retirada (ALT negativas); REP = reposição (ALT positivas) (SANTOS, 2013).

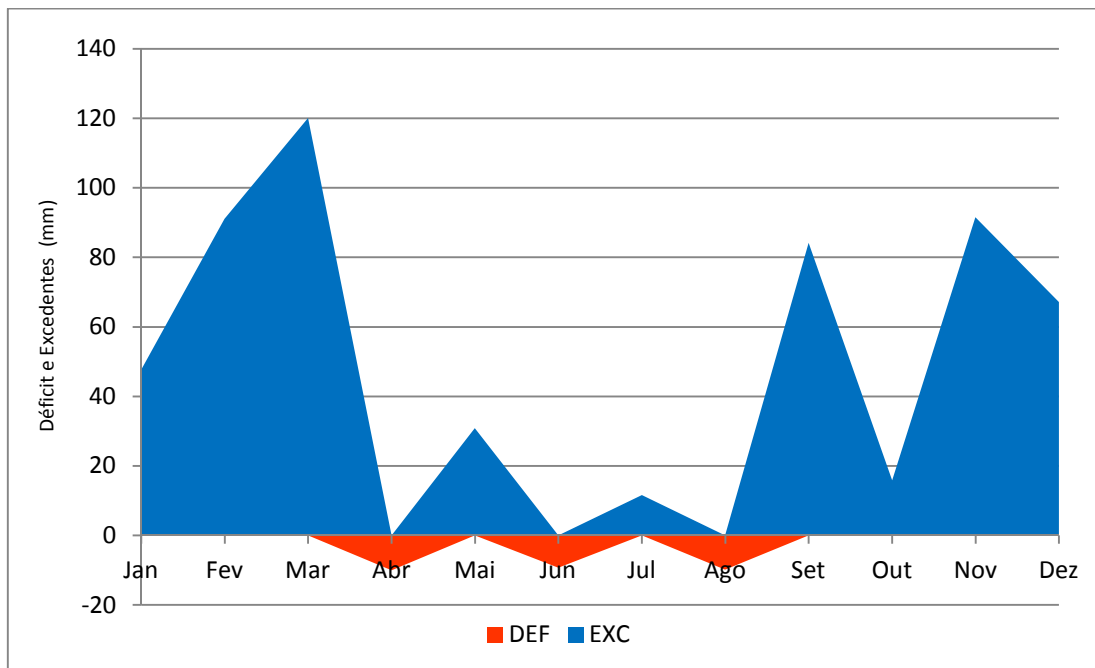
Com os valores obtidos no balanço hídrico para o ano de 2015 foram elaborados os gráficos com os déficits e retiradas, excedentes e reposição (Figura 33 e Figura 34).

Figura 33 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2015.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2015).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em 2015 as precipitações foram dentro do esperado de acordo com a média do local, representando a recuperação do ano anterior (2014). Os gráficos e o cálculo do balanço hídrico demonstram períodos de déficit e retirada em abril, junho e agosto, no entanto os demais meses em sua maioria tiveram excedentes hídricos.

5.3.5 Balanço hídrico ano 2016

Do mesmo modo dos anos anteriores foi realizado o cálculo pelo método de Thornthwaite e Mather para o ano de 2016. Os dados de precipitação acumulada em cada mês do ano de 2016 estão apresentados na Tabela 27, e as médias dos dados de temperatura estão apresentadas na Tabela 28.

Tabela 27 - Média da precipitação nos meses do ano de 2016.

| PRECIPITAÇÃO (mm) | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Mês | Acumulado mensal (2016) |
| janeiro | 242,55 |
| fevereiro | 229,54 |
| março | 185,78 |
| abril | 22,66 |
| maio | 137,22 |
| junho | 168,14 |
| julho | 15,58 |
| agosto | 86,16 |
| setembro | 56,83 |
| outubro | 163,91 |
| novembro | 127,63 |
| dezembro | 169,59 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi utilizado o valor de 36 mm para o CAD local. Para a evapotranspiração (ETP) foi calculada utilizando dados locais de i que é o índice térmico (mensal), N é o comprimento do dia com radiação solar, ND número de dias no mês, e ETP_p que é a evapotranspiração potencial (Tabela 29).

Tabela 28 - Média da temperatura nos meses do ano de 2016.

| TEMPERATURA (°C) | |
|-------------------------|----------------------------|
| Mês | Média mensal (2016) |
| janeiro | 23,12 |
| fevereiro | 24,27 |
| março | 23,15 |
| abril | 23,23 |
| maio | 18,16 |
| junho | 15,36 |
| julho | 17,06 |
| agosto | 18,63 |
| setembro | 19,01 |
| outubro | 21,42 |
| novembro | 22,15 |
| dezembro | 23,89 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 29 - Cálculo da estimativa de ETP pelo método Thornthwaite, ano de 2016.

| Mês | T(°C) | i | N | ND | ETPp (mm) | ETP (mm) |
|------------|--------------|---------------|----------|-----------|------------------|-----------------|
| jan | 23.12 | 10.1577526 | 13.2 | 31 | 98.6 | 112.1 |
| fev | 24.27 | 10.9330094 | 12.7 | 28 | 110.3 | 108.9 |
| mar | 23.15 | 10.1799089 | 12.1 | 31 | 99.0 | 103.1 |
| abr | 23.23 | 10.2352593 | 11.5 | 30 | 99.8 | 95.6 |
| mai | 18.16 | 7.04653544 | 10.9 | 31 | 56.7 | 53.2 |
| jun | 15.36 | 5.46998577 | 10.7 | 30 | 38.6 | 34.5 |
| jul | 17.06 | 6.40933555 | 10.8 | 31 | 49.1 | 45.7 |
| ago | 18.63 | 7.32427602 | 11.3 | 31 | 60.1 | 58.5 |
| set | 19.01 | 7.55465216 | 11.9 | 30 | 63.0 | 62.5 |
| out | 21.42 | 9.0484352 | 12.5 | 31 | 82.8 | 89.1 |
| nov | 22.15 | 9.52025433 | 13.1 | 30 | 89.4 | 97.6 |
| dez | 23.89 | 10.675271 | 13.3 | 31 | 106.3 | 121.8 |
| Ano | 20.8 | 104.55 | - | - | 953.8 | 982.6 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o balanço hídrico, demonstrado na Tabela 30, foram inseridos os dados médios de precipitação (P) obtidos pelo aplicativo GIOVANNI da NASA (2018), e de ETP calculado anteriormente.

Tabela 30 - Cálculo do balanço hídrico climático no município de Bofete, ano 2016.

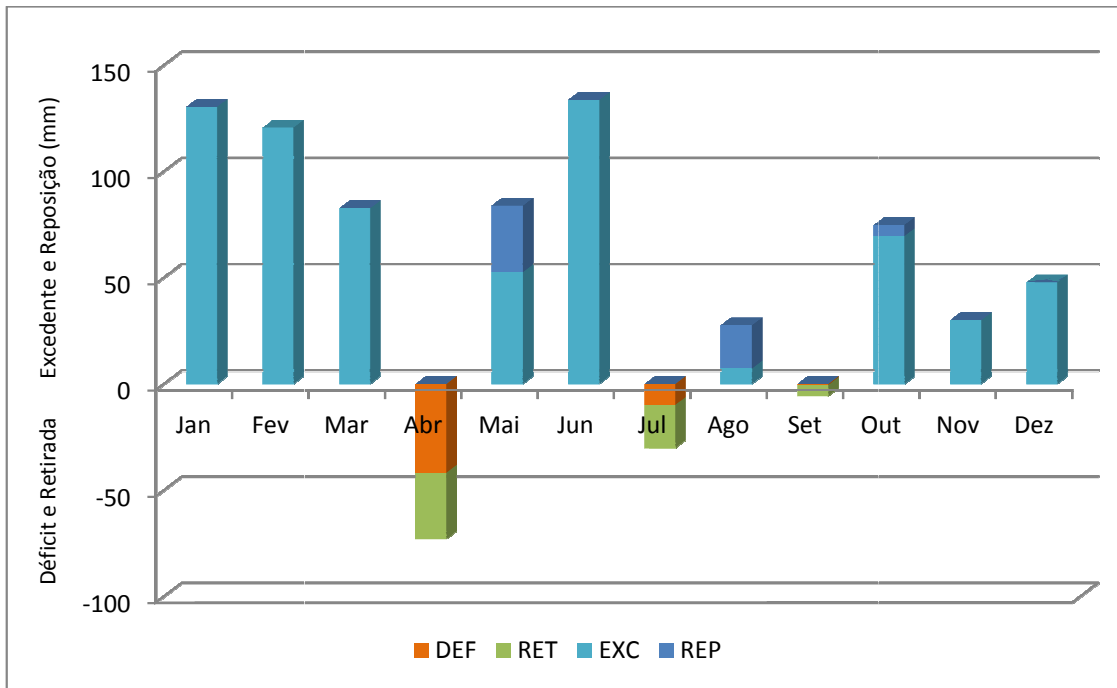
| Local: Bofete - SP (2016) | | | | | | | | CAD: 36 mm | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|------------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| MÊS | P | ETP | P-ETP | NA | ARM | ALT | ETR | DEF | EXC | RET | REP |
| JAN | 243 | 112 | 130 | 0 | 36 | 0 | 112 | 0 | 130 | 0 | 0 |
| FEV | 230 | 109 | 121 | 0 | 36 | 0 | 109 | 0 | 121 | 0 | 0 |
| MAR | 186 | 103 | 83 | 0 | 36 | 0 | 103 | 0 | 83 | 0 | 0 |
| ABR | 23 | 96 | -73 | -73 | 5 | -31 | 54 | 42 | 0 | 31 | 0 |
| MAI | 137 | 53 | 84 | 0 | 36 | 31 | 53 | 0 | 53 | 0 | 31 |
| JUN | 168 | 34 | 134 | 0 | 36 | 0 | 34 | 0 | 134 | 0 | 0 |
| JUL | 16 | 46 | -30 | -30 | 16 | -20 | 36 | 10 | 0 | 20 | 0 |
| AGO | 86 | 58 | 28 | 0 | 36 | 20 | 58 | 0 | 7 | 0 | 20 |
| SET | 57 | 62 | -6 | -6 | 31 | -5 | 62 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| OUT | 164 | 89 | 75 | 0 | 36 | 5 | 89 | 0 | 70 | 0 | 5 |
| NOV | 128 | 98 | 30 | 0 | 36 | 0 | 98 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| DEZ | 170 | 122 | 48 | 0 | 36 | 0 | 122 | 0 | 48 | 0 | 0 |
| ANO | 1,606 | 1,018 | 623 | - | - | 0 | 931 | 52 | 675 | 57 | 57 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Onde: P = precipitação média mensal (mm); ETP = evapotranspiração calculada (mm); NA = negativo acumulado (mm); ARM = armazenamento; ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão; ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); DEF = deficiência hídrica; EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm); RET = retirada (ALT negativas); REP = reposição (ALT positivas) (SANTOS, 2013).

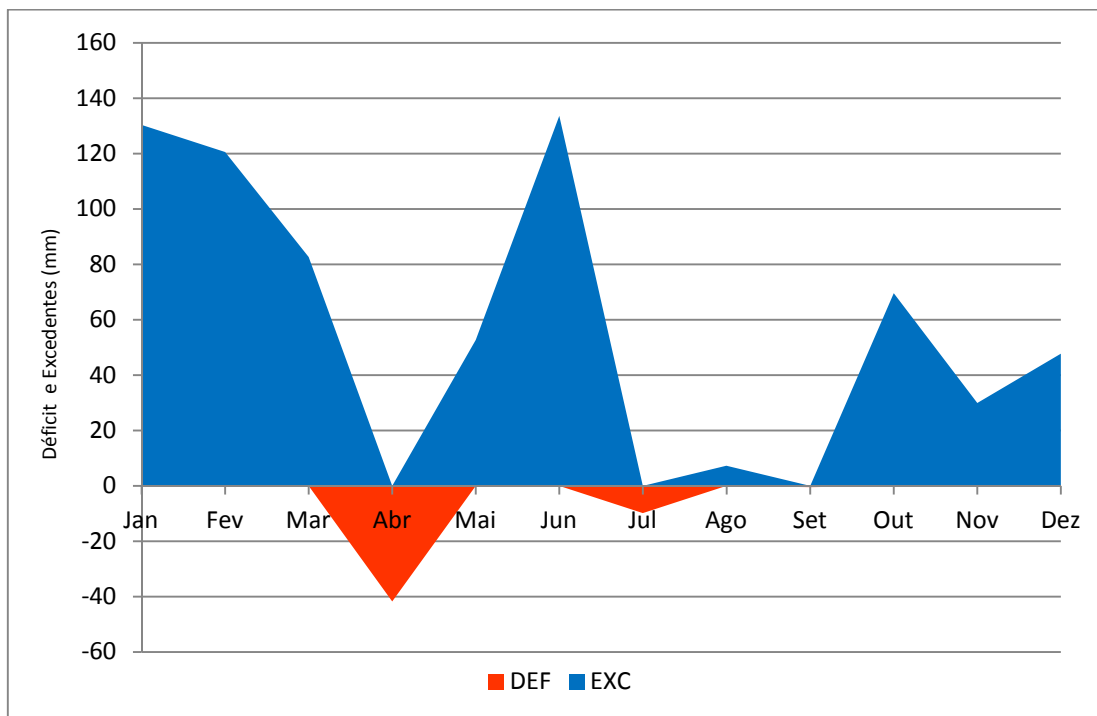
Com os valores obtidos no balanço hídrico para o ano de 2016 foram elaborados os gráficos com os déficits e retiradas, excedentes e reposição (Figura 35 e Figura 36).

Figura 35 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 36 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2016).

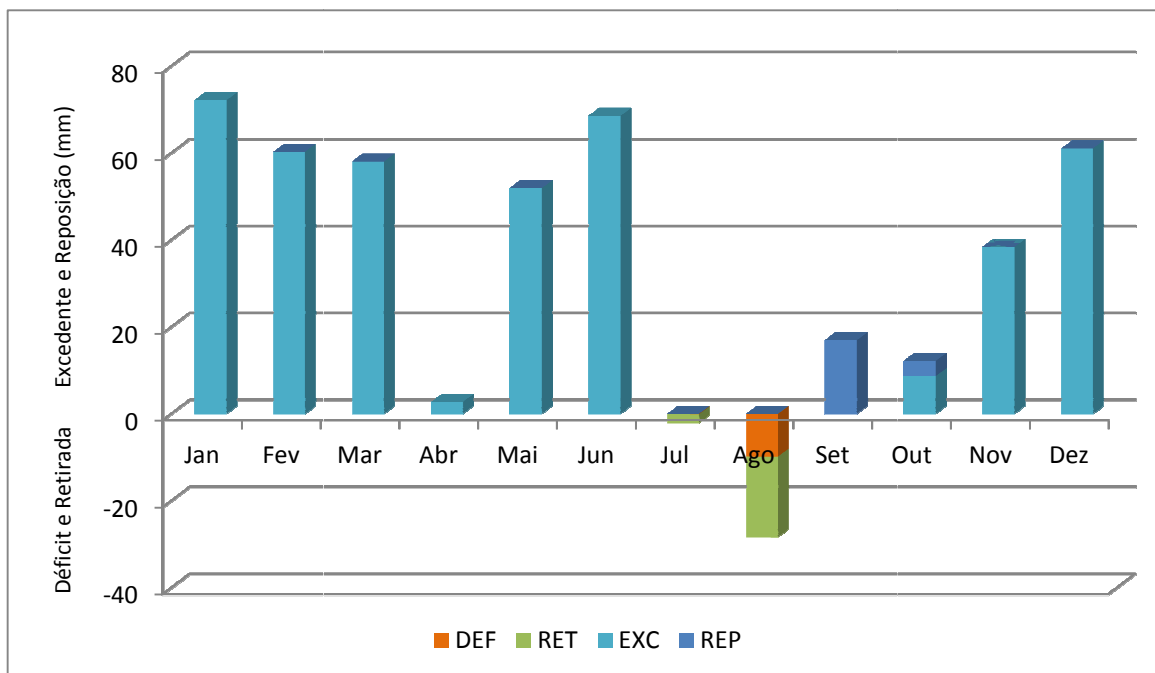


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O ano de 2016, conforme discutido anteriormente, foi favorecido em precipitações, ficando dentro da média para o município. Os gráficos e o cálculo do balanço hídrico demonstram períodos de déficit e retirada apenas em abril e julho, todos os demais meses apresentaram excedentes, sendo que em agosto e setembro os meses com menor excedente e reposição.

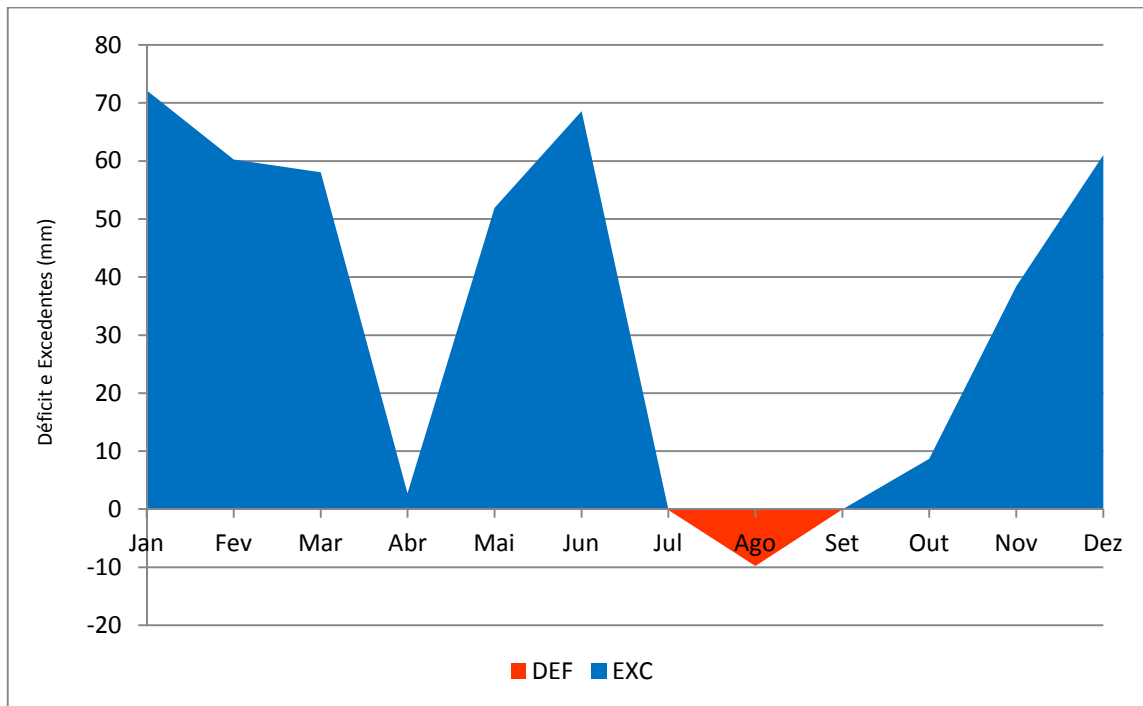
Assim de um modo geral para o período todo de 2012 a 2016 os gráficos e o balanço hídrico, conforme Figura 37 e Figura 38, mostram que o município de Bofete não é deficiente em água, pois mesmo no período de déficit de água em meses como por exemplo julho, agosto e setembro há a possibilidade de retirada de água armazenada no solo, que logo após esse período é repostas. Com uma gestão e planejamento adequados podem-se utilizar os excedentes dos meses anteriores para esse período seco.

Figura 37 – Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, ano de 2016.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 38 - Balanço Hídrico Climático no município de Bofete, déficit e excedentes (ano de 2016).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.4 CÁLCULO DA RECARGA LOCAL

Para calcular a recarga através do WTF foi usada uma planilha Excel de cálculos denominada ESPERE, onde foram inseridos dados de precipitação e oscilação de nível dos anos de 2012 a 2016. O valor do rendimento específico do aquífero (*Specific Yield* - S_y) utilizado foi de 0,20. Com esses dados foi calculada a recarga local para cada ano e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Valores de recarga anual - município de Bofete.

| Ano | Recarga (mm) | % da Precipitação |
|-------------|--------------|-------------------|
| 2012 | 468,00 | 33,33 |
| 2013 | 452,00 | 39,37 |
| 2014 | 382,00 | 47,94 |
| 2015 | 452,00 | 29,94 |
| 2016 | 506,00 | 45,22 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores obtidos referem-se à recarga total, pois o método utilizado não contempla as descargas. As porcentagens de recarga em relação às precipitações

foram entre 30% e 48% no período estudado, isto demonstra a característica do padrão de recarga no local.

De acordo com IPT (2011) há estudos que demonstram que na área de afloramento do SAG a recarga é aproximadamente 200 mm/ano, contudo, segundo a OEA (2009), os excedentes hídricos na área de afloramento do aquífero variam de 350 a 450 mm/ano na região norte e 650 a 750 mm/ano na região sul, esse valor gera uma recarga profunda de 10 a 20 mm/ano, que se aproxima dos valores calculados nesse estudo para o município de Bofete.

O SAG tem potencial de fornecer água e obter a recarga mesmo em períodos que tendem ao declínio. Pode ser observado que os níveis piezométricos sobem e descem a todo o momento, representando pequenos eventos de recuperação, que são computados como recarga.

Após a escassez, em 2015 houve a recuperação das precipitações, gerando o valor de 452,0 mm de recarga, que representou 30% das precipitações no ano. Em 2016 devido ao *EL* o índice pluviométrico foi maior e o valor da recarga chegou a 506,0 mm, o que representou 45% das precipitações no ano.

A estimativa de recarga é representativa do local estudado. As estações pluviométrica e piezométrica estão em baixas altitudes, pois como demonstrado nos mapas, estão próximos ao curso d'água. Esse fator favorece o aumento da recarga nesses pontos, onde a água converge para os pontos mais baixos e há interação com as águas superficiais dos córregos.

O uso da terra é um parâmetro que influencia nas taxas de recarga e no direcionamento das águas pluviais. O município de Bofete conta com a atividade de agropecuária, sendo que aproximadamente 42% da área do município são de pasto. A pecuária favorece a compactação do solo pelos animais dificultando a penetração da água no solo.

O cultivo irrigado de culturas pode influenciar no aumento da recarga devido à irrigação aumentando assim a água que infiltra no solo e possivelmente percola até o nível freático.

De acordo com o estudo realizado por Lucas, Guanabara e Wendland, (2012) em área de afloramento do SAG, na bacia do Ribeirão da Onça, no município de Brotas distante aproximadamente 100 km de Bofete, foram encontrados maiores valores de recarga em áreas de pastagem e cana-de-açúcar respectivamente, em relação às áreas de eucalipto e citros. Os autores calcularam a recarga na bacia

encontrando valores entre 80 mm e 359 mm, que correspondem a 7% e 20% da precipitação anual no local.

Em Bofete há plantação de citros e eucalipto, que representam 17% da área do município, sendo que são cultivos que não favorecem a recarga subterrânea.

Na sub-bacia onde Bofete está inserido, a captação de água é principalmente de fontes superficiais, a demanda é de aproximadamente 1,71 m³/s e o maior uso é para irrigação. No caso das águas subterrâneas a demanda na sub-bacia é de 0,10 m³/s, sendo que o maior uso é industrial (IPT, 2008).

Isso pode gerar um possível conflito a partir do momento em que uma alta parcela das precipitações (entre 30% e 48%) está sendo direcionada para recarga subterrânea, e não no escoamento superficial, onde a demanda é aproximadamente 17 vezes maior em relação à água subterrânea. O abastecimento público é prioritariamente por meio de captações de águas superficiais na sub-bacia.

Outro possível problema que deve ser monitorado é a contaminação do aquífero pelo uso de defensivos agrícolas, pois já foi previsto no Plano de Bacia que o município de Bofete está em área de criticidade relativa intermediária de vulnerabilidade do SAG (IPT, 2008).

5. 3 RECARGA COMO FERRAMENTA DE APOIO AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO

Como pode ser observado nos dados estimados de recarga, o ano de 2014 foi um ano atípico em precipitações por influência de fenômenos climáticos, o SAG ainda conseguiu obter sua recuperação e recarga, realizando pequenas recargas ao longo do ano. Isso mostra a necessidade de monitorar e conhecer a dinâmica das águas subterrâneas, com a finalidade de incorporar nos instrumentos de gestão de recursos hídricos, pois a gestão adequada ocorre a partir do momento que temos o conhecimento e o entendimento do recurso a ser gerido.

Desse modo, para a tomada de decisões e realização de planos em recursos hídricos, é necessário o conhecimento dos parâmetros envolvidos nos processos naturais do ciclo hidrológico e climatológico. A informação da estimativa da recarga faz com que outros parâmetros sejam observados, a fim de obter modelos e estimativas próximas da realidade, estimulando a dedicação no monitoramento hidrológico como um todo.

Na era da informação, dados são amplamente disponibilizados, de forma a aproximar os usuários e contribuir com os tomadores de decisão em recursos hídricos. Os modelos matemáticos e estatísticos auxiliam para a geração de informações e dados, aplicados aos fenômenos da natureza, pois conseguem descrever a realidade, além de realizar previsões (MANZIONE, 2018).

Essas previsões são importantes para projeções climáticas que influenciam no ciclo hidrológico e nas atividades humanas dependentes da água, como abastecimento, irrigação e a economia de um modo geral (MANZIONE, 2018).

As medidas de incerteza e as avaliações que a modelagem pode gerar a partir dos dados do aquífero, como a recarga, podem ser associadas com os instrumentos da PNRH - Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), especialmente na outorga, plano de bacia, cobrança e enquadramento. Como citado anteriormente, a ANA (2011) reconhece a necessidade de conhecer os valores de recarga do aquífero de modo a garantir a exploração sustentável das águas subterrâneas.

Essa análise em nível local da recarga de aquífero pode ser aplicada de modo a subsidiar às decisões quanto a alocação de água no local, ou seja, na outorga e nos planos de recursos hídricos. Até mesmo na cobrança, que pode conter valores diferenciados para cada região de acordo com as características do local, desestimulando o uso desordenado e o uso de áreas vulneráveis.

Os planos de recursos hídricos são planos diretores das águas, que deve conter diagnóstico, análise de alternativas, balanço entre oferta e demanda, além de metas e medidas a serem tomadas, como projetos e programas. Em vista disso, o valor da estimativa da recarga abrange os parâmetros necessários para a elaboração desse planejamento, pois fornece dados para o diagnóstico local, entra no balanço de oferta de água e nas medidas de prevenção, além das metas de proteção e manutenção da água subterrânea.

O monitoramento do aquífero demonstra o comportamento das águas subterrâneas e gera dados para pesquisas, além de informações para os planos de recursos hídricos. Com isso podem ser tomadas medidas para sustentabilidade, sua qualidade e as reservas disponíveis (MANZIONE, 2018)

Contudo somente gerar dados de monitoramento não é suficiente, pois o ciclo da água é um processo dinâmico e a gestão envolve diferentes processos e usuários, sendo que a dinâmica das águas subterrâneas deve ser avaliada, e a componente temporal levada em consideração (MANZIONE, 2018).

A outorga visa a garantia da oferta de água para seus usos múltiplos, com segurança da disponibilidade quantitativa e qualitativa. Na outorga, assim como nos planos de recursos hídricos, para a captação de água através de poços de bombeamento, é importante ter a dimensão do volume disponível, sem danos ao sistema e isso pode ser feito com a inserção da estimativa da recarga (MANZIONE, 2018).

A outorga atualmente, no Estado de São Paulo, é realizada quantitativamente dissociando as águas superficiais das subterrâneas. A outorga integrada é tema polêmico no meio técnico, que tem conhecimento de sua necessidade, mas ainda não elaborou meios de realizar.

O cálculo da recarga e os modelos demonstrando a interação entre as águas subterrâneas e de superfície, constituem-se em um começo para encontrar a solução a essa questão.

Os comitês de bacia podem inserir nos seus planos a informação da recarga, realizando estimativas e cálculos através dos grupos nas câmaras técnicas específicas de águas subterrâneas. Há propostas como as CLAPs em Ribeirão Preto que também podem ser inseridas no sistema, assim como a criação de um comitê do SAG no Brasil, inserindo todos os usuários e níveis de governo envolvidos.

Os valores de recarga e as discussões apresentadas nesse estudo demonstram como novas métricas e análises podem ser inseridas no sistema de gestão e utilizadas pelos tomadores de decisão em recursos hídricos, com a finalidade de preservar o recurso, realizar o manejo sustentável e avaliar todos os parâmetros que permeiam as águas, tais como clima, solo, ocupação do território, entre outros.

6 CONCLUSÕES

No cálculo da estimativa da recarga em Bofete, os valores de recarga anuais encontrados foram na faixa entre 382,0 mm e 506,0 mm, representando uma parcela de 30% a 48% das precipitações.

Foi observado que em 2014, ano que as precipitações foram abaixo da média devido a fenômenos climáticos, o SAG demonstrou o potencial de reabastecer mesmo num período de declínio, realizando pequenas recargas ao longo do ano. É, portanto, um fato relevante que demonstra a necessidade de conhecer a dinâmica das águas subterrâneas, e inserir nos instrumentos de gestão de recursos hídricos, pois a partir do momento que temos conhecimento do recurso a ser gerido pode-se realizar a gestão adequada.

Assim a recarga do aquífero é um componente do ciclo hidrológico fundamental para o manejo sustentável do recurso hídrico subterrâneo. Essa informação e esses dados que podem ser utilizados nos órgãos públicos gestores dos recursos hídricos. No entanto, a falta de dados e desarticulação de órgãos e legislações ainda é um problema em relação à gestão das águas subterrâneas.

O estudo e conhecimento da recarga ressalta também a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, que fornece informação para futura formulação da outorga integrada.

Os dados de recarga da área de afloramento do SAG, a porcentagem que representa das precipitações, e outras relações que podem ser feitas, constituem-se em subsídios para os instrumentos de gestão, principalmente na outorga, que realiza a alocação de água, garantindo a qualidade e quantidade desse recurso ao usuário, e o valor da recarga fornece informação sobre o diagnóstico local, e reservas de água. Os planos de recursos hídricos também devem inserir esse dado, de modo a ter valores para disponibilidade de água, metas de preservação, medidas de manutenção.

Portanto, o presente estudo apresenta novas medidas e análises que devem ser utilizadas nos instrumentos e sistema de gestão, pelos tomadores de decisão em recursos hídricos, com a finalidade de avaliar os parâmetros que permeiam as águas, e realizar o manejo sustentável das águas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 PROPOSTA DE INTRODUIR INFORMAÇÕES SOBRE A RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E GESTÃO DE AQUÍFEROS NOS PLANOS DE BACIA A NÍVEL ESTADUAL

O SAG é um sistema diverso, que necessita do entendimento de seu comportamento. O estudo do aquífero e sua gestão deverão ser realizados em nível local, seja municipal, ou na bacia hidrográfica, pois as características do aquífero em questão são próprias da área, dependendo do tipo de solo, e também das atividades que são exercidas no ambiente. Isto não isenta o diálogo e gerenciamento entre os diferentes estados e países componentes da área do aquífero.

No presente estudo foi utilizado o aquífero livre, contudo para o aquífero confinado a dinâmica é diferente e deve ser utilizada outra abordagem, de acordo com as características locais. No aquífero livre há maior facilidade de adotar a bacia hidrográfica como território para gestão do recurso, pois há maior relação e interação com as águas superficiais do que o aquífero localizado entre camadas confinantes.

De todo modo, o intuito é estimular e inserir o contexto das águas subterrâneas nos comitês de bacia, principalmente via câmaras técnicas. Assim podem ser criadas resoluções para a integração das águas superficiais e subterrâneas que contribuam para que seja alcançada um gestão integrada como preconizada na Lei 9.433/97.

Os planos de recursos hídricos não podem ser estáticos. Assim como o meio ambiente está em constante movimento, os planos devem acompanhar as diversas mudanças naturais, e também de expansão econômica e ocupação do território.

A informação da recarga deverá ser um estudo realizado e inserido nos planos de bacia e nos planos municipais, tanto como diagnóstico da área e dos recursos disponíveis, como medida de disponibilidade e metas de uso e ocupação da área em questão para o desenvolvimento sustentável.

As estruturas municipais referentes às secretarias de obras e meio ambiente e ao corpo técnico, muitas vezes são precárias, têm dificuldades financeiras e técnicas, devido à concentração de recursos federais e estaduais, assim os

municípios devem ser mais bem assessorados na gestão de recursos hídricos e em especial nas águas subterrâneas.

Com as dificuldades de recursos financeiros para todos os estudos e informações necessárias para a gestão, podem ser utilizadas as ferramentas de modelagens, e também convênios do órgão gestor com universidades, comitês e câmaras técnicas para gerar os dados necessários.

Em especial, as universidades como desenvolvedora de pesquisas e detentora de técnicas podem ser utilizadas em conjunto com os órgãos gestores e comitês de bacia, constituindo um ganho de ambos os lados, gerando informação e ampliando os conhecimentos locais, além do ganho econômico com a economia em licitações e contratação de consultorias ambientais para os estudos e diagnósticos em recursos hídricos. Essa parceria enriquece o sistema de gestão em recursos hídricos e também faz com que os dados do monitoramento hidrológico sejam efetivamente trabalhados e utilizados na gestão.

A falta de dados no sistema de gestão é também um dado, que deve fazer com que o órgão gestor e os comitês de bacia se mobilizem em ações para conhecer e preencher as lacunas.

Os eventos críticos do meio ambiente em especial climático, entre outros, devem ser observados e colocados em evidência para precaução de seu impacto nos recursos hídricos. Outro ponto importante é o balanço hídrico, que fornece o conhecimento dos fluxos de base, que têm conexão com as águas subterrâneas.

A recarga local deve principalmente ser usada na outorga de uso de recursos hídricos, no balanço entre a demanda requerida e a disponibilidade oferecida pela natureza de modo sustentável. Dentro da outorga também, dependendo do local, podem ser colocadas áreas de restrições ou condicionantes, de acordo com a criticidade do aquífero na região, e dos cuidados necessários para utilizar e conservar o recurso.

A outorga deve ser baseada em dados e estudos científicos, pois mais do que um instrumento de gestão é um documento técnico-científico com dados locais do manancial em questão. Assim os recursos científicos devem ser utilizados, evitando suposições infundadas.

Na cobrança, com o conhecimento dos dados de recarga, poderão ser colocados valores diferentes dependendo do local da exploração. Numa área importante de afloramento e recarga, ou no caso de um empreendimento potencial

poluidor adotar valores maiores; em áreas e empreendimentos menos impactantes adotar valores menores, estimulando o crescimento em locais que não causem danos ao aquífero, e da mesma forma preservando as águas subterrâneas e seu ciclo natural.

7.2 NORMATIVA

Propomos como normativa que seja exigido um estudo do sistema aquífero em nível local, de bacia hidrográfica, de alguns parâmetros mínimos locais, tais como tipo de aquífero, de solo, rendimento específico, pluviometria, monitoramento do nível de água subterrânea, sistema climático, para conseguir realizar o cálculo da recarga e inserir esse parâmetro na diretoria de outorga, nos planos de bacia e quando possíveis planos municipais, como medida de diagnóstico da situação e disponibilidade do recurso.

A outorga integrada pode iniciar a partir dos dados de recarga, da relação das precipitações com o nível de água subterrâneo. Outro ponto de encontro seria a vazão de base dos cursos d'água superficiais que é mantida através da descarga subterrânea. Assim inserir na vazão $Q_{7,10}$, adotada como referência para captação superficial no DAEE, a água subterrânea.

7.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA E QUESTÕES ABERTAS

A pesquisa conseguiu demonstrar como o conhecimento da recarga local melhora o entendimento do sistema aquífero e sua sazonalidade, mesmo em tempos de fenômenos climáticos adversos. No ano em que as precipitações ficaram abaixo da média ainda assim foi observado valor de recarga das águas subterrâneas, e esse dado gerou muitas questões, uma das respostas encontradas foram as micro recargas ao longo do ano, outras questões levantadas foi o uso local, pois a agricultura irrigada pode ter contribuído em alguma medida, e a geomorfologia local.

Outras questões emergem a partir desta pesquisa, sendo a principal a questão da outorga integrada. Não é novidade este termo e a necessidade de uma ferramenta dessas para a gestão dos recursos hídricos. Contudo, o meio técnico ainda não encontrou formas hábeis e práticas de solucionar essa problematização.

A recarga é uma informação que abriga o contexto de águas superficiais e subterrâneas, demonstrando uma das relações entre os diferentes departamentos em que as águas foram classificadas. Esse parâmetro e todas as informações necessárias para seu cálculo constituem em um avanço no sentido de integração entre as águas subterrâneas e superficiais.

Um ponto importante a ser mais explorado foi o fato de obter um valor expressivo de recarga mesmo no ano de precipitações abaixo da média, e a importância de entender e prever o contexto climatológico no ciclo hidrológico e na disponibilidade de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Encarte especial sobre a crise hídrica. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil informe 2014**. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2015. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/crisehidrica2014.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2013. 121 p. Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, 3. Disponível em: http://www.cbh.gov.br/EstudosETrabalhos/20140114174437_CadHidrico_vol3_completo.pdf. Acesso em: 03 ago. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília: SAG, 2011. 50 p. Cadernos de capacitação em recursos hídricos, 6. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/OutorgaDeDireitoDeUsoDeRecursosHidricos.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2018.
- ATIVA CINEMA DIGITAL. **Os povos da Cuesta** – primeiras pesquisas. Blog Os Povos da Cuesta. 2012. Disponível em: <http://ospovosdacuesta.blogspot.com/2012/07/os-povos-da-cuesta-primeiras-pesquisas.html>. Acesso em: 06 jul. 2018.
- BRASIL. **Lei Federal n.º 9.433 de 08/01/1997**. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Coleção de Leis República Federativa do Brasil, Brasília, DF. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, v. 189, n. 1, Seção 1, p. 37-307, 1997.
- BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.
- BORGHETTI, N. et al. **Aquífero Guarani**: a verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba: Imprensa Oficial, 2004. 214 p.
- CAMARGO, E. J. **Morro de Bofete**. Prefeitura Municipal de Bofete. 2013. Disponível em: <http://www.bofete.sp.gov.br/index.php/component/phocagallery/1/detail/4-imagem-4-titulo-com-ate-45-caracteres>. Acesso em: 06 jul. 2018.
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLOGICAS E CLIMATICAS APLICADAS A AGRICULTURA(CEPAGRI). Universidade Estadual de Campinas. Outras Informações. **Clima dos municípios paulistas**. Campinas: UNICAMP. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_078.html. Acesso em: 03 jan. 2018.
- CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS (CIIAGRO). CIIAGRO on line. **Monitoramento agrometeorológico à partir de**

2004. Disponível em:

<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/Resenha/LResenhaLocal.asp>
Acesso em: 29 dez. 2017.

CHANG, H. K.; CARNIER NETO, D. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga - exemplo do aquífero Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 22, n. 01, p. 39-48, 2008.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.clean.com.br/cleary.pdf>. Acesso em: 23 set. 2016.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas (RIMAS). **Pesquisa**. 2016. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500027885>. Acesso em: 03 maio 2017.

CORPO DE ENGENHEIROS CONSULTORES S.A. (ENGECORPS). **Plano municipal integrado de saneamento básico município**: Bofete. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, 2011.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE/SERH, INSTITUTO GEOLÓGICO – IG/SMA, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT/SCTDE; CPRM-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Escala: 1:1.000.000. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005 (CD-ROM e mapa).

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). **Notícias**. DAEE prepara recuperação da barragem de Bofete. 2014. Disponível em: http://www.dae.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1224:daee-prepara-recuperacao-da-barragem-de-bofete&catid=48:noticias&Itemid=53. Acesso em: 02 mar. 2018.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). Serviços. Hidrologia. **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: 03 maio 2017.

ESTADO DE SÃO PAULO. Lei Estadual nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 101, n. 247, 31 dez. 1991 Seção 1, p. 2-5.

ESTADO DE SÃO PAULO. Lei N°9.866, de 28 de novembro de 1997. Dispõe sobre as diretrizes e normas para a proteção e recuperação das bacias hidrográficas dos mananciais de interesse regional do Estado de São Paulo e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 107, n. 230, 29 nov. 1997. Seção 1, p.1.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FERDOWSIAN R.; PANNELL, D.J. Explaining long-term trends in groundwater hydrographs. In: WORLD IMACS/MODSIM CONGRESS, 18, 2009, Cairns, Australia. **Proceedings of the [...]** Cairns, 2009. Disponível em: <https://www.mssanz.org.au/modsim09/I1/ferdowsian.pdf>. Acesso em: 02 maio 2017.

FERREIRA, L. G. B. et al. **O fenômeno El Niño de 2015/2016 e seus impactos nas chuvas do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), 2017. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/agrometeorologia/2017-01-09-boletim-enos.pdf. Acesso em: 29 jul. 2018.

FOLEGATTI, M. V. Departamento de Engenharia de Biosistemas. Área de Hidráulica. **Tabelas completas**. 2004. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Folegatti/leb1571/Tabelas%20completas.pdf>. Acesso em: 29 out. 2018.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS (SEADE). **Perfil dos municípios paulistas**. Bofete. Disponível em: <http://www.perfil.seade.gov.br/?>. Acesso em: 27 dez. 2017.

GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities based on Oceanic Niño Index (ONI)**. 2016. Disponível em: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 29 jul. 2018.

GOMES, M. A. F. et al. **Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: base para uma proposta de gestão sustentável**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 20 p. Documentos, 52. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Documentos_52ID-Q2lyhXURgp.pdf. Acesso em: 09 jul. 2018.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1174-1184, 2013.

GONÇALVES, V. F. M.; SANTAROSA, L. V.; MANZIONE, R. L. Mapeamento da recarga de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental durante o ano hidrológico 2014/15. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19, 2016, Campinas. **Anais [...]** Campinas: ABAS, 2016. Disponível em: http://www.abas.org/xixcabas/anais/241374_113_Artigo_VFMG_cabas2.pdf. Acesso em: 19 dez 2017.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 10 set. 2018.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 91-109, 2002. Disponível em: <http://www.azul.bdh.org.ar/bdh3/archivos/publications/986994/Recarga-1.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2018.

HIRATA, R. et al. O Sistema Aquífero Guarani e a crise hídrica nas regiões de Campinas e São Paulo (SP). **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 59-70, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Precipitação total anual**. 2016. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>. Acesso em: 29 jul. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bofete. Panorama**. 2015, 2016 e 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bofete/panorama>. Acesso em: 01 mar. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Aquífero Guarani**: subsídios ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2011. Cadernos do Projeto Ambiental estratégico de Aquíferos,5.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Ordenamento territorial geomineiro do Município de Bofete**. 2009. Relatório Técnico n.º 17501-301. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/06/REGI%C3%83O-DE-BOFETE.pdf>. Acesso em: 26 maio 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Plano de bacia da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Sorocaba e médio Tietê (UGRHI 10) -Revisão para Atendimento da Deliberação CRH 62**. Relatório Técnico n.º 104.269-205. Relatório Final. São Paulo: FEHIDRO, 2008. Disponível em: http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7099/smt_rpb.pdf. Acesso em 03 jan. 2018.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA), 2008. 104 p. Cadernos de Educação Ambiental.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. (Org). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. Cap. 7, p. 113-138.

LOBO, G. A. et al. Implantação da rede piezométrica de águas subterrâneas no Estado de São Paulo – primeiros resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 19, 2011, Maceió. **Anais [...]** Maceió: ABRH, 2011.

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do sistema Aquífero Guarani**. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-31102012-092335/pt-br.php>. Acesso em: 14 jan. 2019.

LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**, Madrid, v. 123, n. 3, p. 311-323, 2012.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco editorial, 2015. 388 p.

MANZIONE, R. L. Incorporação de incertezas associadas à predições de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em recursos hídricos. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 36, p. 215-227, 2014. Disponível em: <http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/2647>. Acesso em: 05 jan. 2018.

MANZIONE, R. L. Mapeamento das características dinâmicas do nível freático do sistema Aquífero Bauru como instrumento de gestão de recursos hídricos. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 227-240, 2018. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/147298>. Acesso em: 04 ago. 2018.

MARENGO, J. A. et. al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 31-44, 2015. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110101/108684>. Acesso em: 27 jul. 2018.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION(NASA). **GIOVANNI**. 2018. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Acesso em: 29 out. 2018.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). **Aquífero Guarani: programa estratégico de ação**. Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai. Montevideo: OEA, 2009. Relatório do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Edição bilíngue

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOFETE. **Institucional**. 2016. Disponível em: <http://www.bofete.sp.gov.br/index.php/institucional>. Acesso em: 01 mar. 2018.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1994. 94 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mario_Quadro/publication/250986842_Estudo_d_e_episodios_de_zonas_de_convergencia_do_Atlantico_Sul_ZCAS_sobre_a_America_do_Sul/links/582a014908aef19cb80513cd/Estudo-de-episodios-de-zonas-de-convergencia-do-Atlantico-Sul-ZCAS-sobre-a-America-do-Sul.pdf. Acesso em: 28 jul. 2018.

RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. **Panorama geral das condições meteorológicas e os principais eventos extremos significativos ocorridos no Brasil em 2016**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Coordenação-Geral de Meteorologia Aplicada, Desenvolvimento e Pesquisa (CGMADP), 2016. Nota Técnica Climatológica. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/notas_tecnicas/Panorama-Geral-2016-Brasil.pdf. Acesso em: 30 jul. 2018.

ROCHA, G. A. O grande Manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 11, n. 30, p. 191-212, 1997. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9003/10555>. Acesso em: 28 dez. 2017.

SANTOS, A. R. Mundo geomática. **Balanco Hídrico Segundo Thornthwaite e Mather, 1955**. 2013. Apostila Climatologia. Capítulo 10. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/CL/ApostilaTeoricaCL/Capitulo10-BalancoHidrico.pdf>. Acesso em: 29 out. 2018.

SANTOS, M. M.; CELLIGOI, A. Utilização da metodologia de análise da curva de recessão para o cálculo das reservas reguladoras do aquífero Caiuá na sub-bacia do Rio dos Índios-PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, 2002, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: ABAS, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22692/14893>. Acesso em: 19 dez. 2017.

SATER, A.; TEIXEIRA, R. **Tocando em frente** [Gravada por Maria Bethânia]. Em *25 anos* [CD]. Rio de Janeiro, RJ: Polygram/Philips, 1990.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, Heidelberg, v. 10, n. 1, p. 18-39, 2002.

STATISTICAL SOFTWARE FOR MICROSOFT EXCEL(XLSTAT). Disponível em: <https://www.xlstat.com/en/>. Acesso em: 11 dez. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE (USGS). **O ciclo da água**. 2014. Disponível em: <http://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>. Acesso em: 19 out. 2018.

VILLAR, P. C. Gestão das águas subterrâneas e o Aquífero Guarani: desafios e avanços. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, ANPPAS, 5, 2010, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: ANPPAS, 2010.

WIKIPÉDIA. **Bofete**. 2006. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Bofete#/media/File:SaoPaulo_Municip_Bofete.svg. Acesso em: 01 fev. 2018.