

SILVIA FERNANDES ROCHA

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM E
AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA INTERAÇÃO LAGO - AQUÍFERO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R672i
2015

Rocha, Silvia Fernandes, 1974-
Implantação de um sistema de filtração em margem e
avaliação hidrogeológica da interação lago - aquífero / Silvia
Fernandes Rocha. - Viçosa, MG, 2015.
xiii, 115f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador : Eduardo Antônio Gomes Marques.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Hidrogeologia - Modelos Matemáticos. 2. Água
subterrâneas. 3. Água - Filtração. 4. Mecânica do solo.
5. Solos - Absorção. 6. Solos - Permeabilidade.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 551.49

SILVIA FERNANDES ROCHA

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM E
AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA INTERAÇÃO LAGO - AQUÍFERO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 18 de junho de 2015.

Maria da Gloria Alves

Gerson C. da Silva Júnior

Alisson Carraro Borges
(Coorientador)

Enivaldo Minette

Eduardo Antônio Gomes Marques
(Orientador)

DEDICO

Aos meus pais, Joselina e Geraldo (in memoriam).

A eles, o meu eterno agradecimento.

“Até aqui nos ajudou o Senhor.”

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tão grande graça concedida até aqui. Aos meus pais, Joselina e Geraldo (*in memoriam*), meu eterno agradecimento por sonharem esse sonho comigo.

Ao meu querido marido, Ricardo Luiz, pelo amor, companheirismo, incentivo e por ter sido meu grande apoio nessa fase da nossa vida. Essa conquista é nossa!

Às minhas irmãs: Rita, Waldiza e Renata, grandes incentivadoras e amigas que sempre me deram força na vida.

A todos os familiares, cunhados, sobrinhos, tios, primos, sogro, sogra, amigos de perto e de longe, obrigada pelo apoio.

Ao orientador Prof. Eduardo, agradeço por todo incentivo, compreensão nos momentos difíceis e a confiança depositada em mim, no desenvolvimento dessa pesquisa. “Muito obrigada” sempre será pouco.

Ao Prof. Alisson Borges, pelas excelentes contribuições como coorientador e pela compreensão. À Prof.^a Maria da Glória, meu agradecimento pelo carinho e pelo grande incentivo no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos amigos: Shirley, José Marinaldo, Wellington, Tânia, Afonso, Pollyana, Suellem, Weldon, Cátia, Edilson, Marcony, Marília, Alessandra, Francisco, Rejane, Nilcilene, William, Márcia, Vitor, Camila, Maíra, André Lorenzoni, André Teles, Luiza. Ao Vinicius, meu grande agradecimento pela ajuda maravilhosa no desenvolvimento da modelagem.

A todos os colegas do DEC e aos técnicos do LEC, pelo apoio nos trabalhos de campo e laboratório. Ao Departamento de Fitotecnia, por permitir o desenvolvimento da pesquisa no Campo Experimental Diogo Alves de Mello.

Aos professores do curso de Engenharia de Agrimensura, pelo apoio nos trabalhos de campo e pela infraestrutura de estudo.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo, e, em especial, à Coordenadoria de Estradas, por me proporcionar essa capacitação profissional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
1.2 ESTRUTURAÇÃO DA TESE	10
1.3 REFERÊNCIAS.....	11
CAPÍTULO 1 - IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO E CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO AQUIFERO LIVRE.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 MATERIAIS E MÉTODO	16
2.1 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO.....	16
2.2 TESTE DE AQUÍFERO	18
2.3 ANÁLISE POTENCIOMÉTRICA.....	19
2.4 ESTIMATIVA DA RECARGA PELO MÉTODO VNA	20
2.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO MÍNIMO DE PERCURSO DA ÁGUA DO MANANCIAL SUPERFICIAL ATÉ O POÇO	21
2.6 VELOCIDADE DE PASSAGEM DA ÁGUA PELO MEIO POROSO.....	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.2 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE FML	25
3.3 TESTE DE AQUÍFERO	29
3.4 ANÁLISE POTENCIOMÉTRICA.....	31
3.5 ESTIMATIVA DA RECARGA PELO MÉTODO VNA	35
3.6 DETERMINAÇÃO DO TEMPO MÍNIMO DE PERCURSO DA ÁGUA DO MANANCIAL SUPERFICIAL ATÉ O POÇO E VELOCIDADE DE PASSAGEM DA ÁGUA PELO MEIO POROSO.....	36

4	CONCLUSÕES.....	38
5	REFERÊNCIAS.....	40
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE FLUXO ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO.....		
		44
1	INTRODUÇÃO.....	44
2	MATERIAIS E MÉTODO	46
2.1	CONDIÇÃO DE SIMULAÇÃO	47
2.2	DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA	47
2.3	PARÂMETROS DE ENTRADA	48
2.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO	48
2.5	PROCESSAMENTO DO MODELO	49
2.6	CALIBRAÇÃO.....	49
2.7	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CENÁRIOS.....	50
2.8	BALANÇO HÍDRICO.....	51
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
3.1	DESENVOLVIMENTO DO MODELO CONCEITUAL.....	52
3.2	DISCRETIZAÇÃO DA MALHA	53
3.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO	54
3.4	CALIBRAÇÃO.....	55
3.5	CENÁRIOS.....	59
3.6	BALANÇO HÍDRICO.....	61
4	CONCLUSÕES.....	62
5	REFERÊNCIAS.....	63
CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA TURBIDEZ E DETERMINAÇÃO DO IQA EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO.....		
		65
1	INTRODUÇÃO.....	65
2	MATERIAIS E MÉTODOS	67

2.1	ANÁLISES LABORATORIAIS	67
2.2	DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ	67
2.3	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)	67
2.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	68
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
3.1	ANÁLISE DA TURBIDEZ.....	69
3.2	ANÁLISE DO IQA.....	70
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	74
4	CONCLUSÃO.....	78
5	REFERÊNCIAS.....	79
6	CONCLUSÕES GERAIS	81
	APÊNDICE.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da microbacia, em relação ao campus da UFV, ao município de Viçosa, ao Estado de Minas Gerais e ao território Brasileiro.	6
Figura 2 - Mapa de geologia da microbacia.	8
Figura 3 - Mapa de uso da terra da microbacia.	9
Figura 4- Mapa de solos da microbacia.	10
Figura (I) 1 - Registro fotográfico da análise táctil-visual e amostras de solo coletadas no amostrador padrão da sondagem à percussão.	16
Figura (I) 2 - Perfil construtivo dos poços de monitoramento e do “POÇO”.	17
Figura (I) 3 - Mapa de localização das sondagens pré-existentes.	23
Figura (I) 4 - Foto aérea (1963) e Imagem de satélite Ikonos (2007).	24
Figura (I) 5 - – Distribuição espacial dos furos de sondagens na área de estudo.	25
Figura (I) 6 - Perfil geológico - geotécnico AA’, transversal ao “LAGO” da UFV.	27
Figura (I) 7 - Perfil geológico - geotécnico BB’, paralelo ao “LAGO” da UFV.	27
Figura (I) 8 - Registro fotográfico da localização do “POÇO”.	28
Figura (I) 9 - Gráfico rebaixamento x tempo, com indicação do rebaixamento máximo em cada poço analisado.	29
Figura (I) 10 - Mapa potenciométrico representativo do Nível estático e Nível dinâmico para o período observado	32
Figura (I) 11 - Comparação da Pluviometria mensal acumulada para Viçosa (MG), nos anos hidrológicos 2010/2011; 2011/2012; 2012/2013; 2013/2014.	34
Figura (I) 12 - Gráfico de comparação da variação do nível d'água estático nos piezômetros com a precipitação (mm) durante o ano hidrológico 2013/2014.	34
Figura (II) 1 - Mapa de localização da área modelada.	52
Figura (II) 2 - Discretização da área, identificando células inativas e domínio do modelo	53
Figura (II) 3– Seção vertical apresentando as camadas da modelagem matemática	54

Figura (II) 4 - Representação das condições de contorno.....	55
Figura (II) 5 - Representação do modelo estacionário na camada 2.....	57
Figura (II) 6- Registro fotográfico dos baixos níveis de água no “LAGO” da UFRV no período de estiagem.....	58
Figura (II) 7- Registro fotográfico dos experimentos irrigados com água do “POÇO”. ..	58
Figura (II) 8 – Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 1 ano.....	59
Figura (II) 9 - Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 5 anos.....	60
Figura (II) 10 - Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 10 anos.....	60
Figura (III) 1 - Dados de turbidez coletados no “POÇO” e no “LAGO”. Dados de precipitações (mm) ocorridas até 7 dias antes da coleta.	69
Figura (III) 2 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro Condutividade elétrica.	74
Figura (III) 3 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro pH.....	75
Figura (III) 4 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro Eh.	76
Figura (III) 5 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro T.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das classes relevo na microbacia.....	6
Tabela (I) 1 Resultados da análise granulométrica pertencentes às amostras de solos dos furos de sondagens SP1, SP2 e SP3.....	26
Tabela (I) 2 - Dados utilizados na estimativa de recarga e taxa de recarga para cada poço monitorado.	35
Tabela (II) 1 - Valores de condutividade hidráulica utilizadas inicialmente no modelo estacionário	48
Tabela (II) 2 Cargas hidráulicas (m) médias dos pontos utilizados na calibração e validação do modelo, nos períodos PE, PT1 e PT2.	50
Tabela (II) 3 - Condutividades hidráulicas obtidas na calibração do modelo estacionário por meio do módulo Winpest.....	56
Tabela (II) 4 - Cálculo do balanço hídrico por meio do método de Thornthwaite-Mather.	61
Tabela (III) 1 – Dados brutos coletados no “POÇO” e no “LAGO” em cada campanha.	71
Tabela (III) 2 - Valores de q_{ie} do IQA para as águas do “POÇO” e do “LAGO”.....	72

RESUMO

ROCHA, Silvia Fernandes, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Junho, 2015. **Implantação de um sistema de filtração em margem e avaliação hidrogeológica da interação lago-aquífero.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Alisson Carraro Borges.

Filtração em Margem (FM) ou *Riverbank Filtration* (RBF) é uma técnica que vem sendo utilizada, há mais de 100 anos, e que consiste na locação de poços de bombeamento nas margens aluvionares de rios (FMR) ou lagos (FML). A água captada no poço é uma mistura de água subterrânea e água superficial. Segundo a literatura, a eficiência do sistema de FM consiste no conhecimento das características hidrogeológicas do sistema aquífero. Dentre os benefícios identificados nas pesquisas sobre FM no exterior e no Brasil, destacam-se: o conhecimento da interação manancial superficial - subterrâneo e a remoção de turbidez no pré-tratamento alternativo para água de abastecimento. No Brasil, estudos sobre FM ainda são recentes e essencialmente tem foco na qualidade da água, com pouca ou nenhuma abordagem hidrogeológica. Em função disso, verificou-se uma lacuna no conhecimento científico para estudos sobre FML no Brasil, o que motivou o desenvolvimento da presente pesquisa. O estudo realizado procurou verificar a hipótese de que, por meio da implantação de um sistema de FML no campus da UFV, seria possível obter dados hidrogeológicos, avaliar a interação lago - aquífero, elaborar um modelo numérico hidrogeológico de detalhe da área de estudo, simular o comportamento do fluxo subterrâneo nesse local, mensurar as vazões exploráveis em poços de captação, avaliar a redução da turbidez e calcular o Índice de Qualidade da Água bruta do lago e do aquífero freático. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas: implantação de um sistema de FM e caracterização hidrogeológica, modelagem numérica e análise da redução de turbidez. Os resultados geraram diversos dados inéditos sobre o tema, tais como: profundidade do aquífero livre, material constituinte no subsolo e vazões exploráveis. A modelagem hidrogeológica permitiu simular o comportamento do aquífero e as vazões máximas exploráveis nos períodos de um, cinco e dez anos. Por fim, foi possível avaliar a redução da turbidez e determinar o IQA no lago e no aquífero freático. Conclui-se que ocorre interação lago-aquífero e que é possível utilizar essa técnica para a redução de turbidez e obtenção de vazões consideráveis de água para usos

diversos, bem como permite uma melhor gestão dos recursos hídricos, subterrâneos e superficiais, na área de estudo e seu entorno.

ABSTRACT

ROCHA, Silvia Fernandes, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2015. **Implantation of a riverbank filtration and hydrogeological evaluation of bank – lake interaction** **Implantation of a riverbank filtration and hydrogeological evaluation of bank – lake interaction**. Advisor: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coadvisor: Alisson Carraro Borges.

Riverbank filtration (RBF) or lakebank Filtration (LBF) is a technique that has been used for 100 years and consists of location and operation of pumping wells at a bank of a river or a lake margin. The water pumped in the well is supposed to be a mixture of both underground and superficial water. According to the literature, the efficiency of a bank filtration (BF) system depends upon the knowledge of hydrogeological characteristics of the aquifer system. Among the benefits already identified in BF researches developed both overseas and in Brazil, one can point: knowledge of superficial – underground water systems interaction and turbidity removal as a alternative pre-treatment for water supply. In Brazil, BF studies are recent and main focus on water quality with few or no hydrogeological approach. So, a knowledge gap was identified regarding BF studies in Brazil, which has inspired the present research development. The main purpose of the present study is to verify the hypothesis that by installing a BF system in a lake located at UFV campus, it would be possible to obtain hydrological data, evaluate aquifer – lake interaction, built a detailed hydrogeological model for the research area, simulate the behavior of underground flow, measure the exploitation flow in pumping wells, evaluate turbidity reduction and calculate the Water Quality Index (WQI) for raw water from the lake and from the well. Thus, the proposed research was developed in three stages: implantation of a BF system and hydrogeological characterization, numerical modelling and, finally, turbidity removal analysis. Results has generated several unknown data about this theme, such as: water level depth, underground constituent materials and exploitation flows. Numerical modelling allowed simulation of aquifer behavior and to obtain maximum pumping flow for one, five and ten year's horizon. Finally, it was possible to determine turbidity removal and to calculate WQI for both lake and underground water. The results has supported the conclusion that lake – aquifer interaction occurs in the study area and that is possible to remove turbidity and to obtain considerable amount of water for several

uses by using this technique, as long as it allows a better management of underground and superficial water resources within the study area and its vicinity.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Filtração em Margem (FM) ou, como denominada na literatura internacional, Riverbank Filtration (RBF), seja de um rio (FMR) ou de um lago (FML), é uma técnica que vem sendo utilizada por vários países como pré-tratamento da água para abastecimento, diante de uma realidade por demanda crescente de qualidade e quantidade de água.

Essa técnica vem sendo utilizada com sucesso por mais de 100 anos, no pré-tratamento da água de abastecimento em vários países da Europa (JARAMILLO, 2012; RAY *et al.*, 2003), e, mais recentemente, no Brasil (MICHELAN, 2010; MONDARDO, 2009; PAIVA, 2009). Nos Estados Unidos, tem sido utilizada como uma alternativa de baixo custo para sistemas de filtração na remoção de patógenos (JARAMILLO, 2012).

Schmidt *et al.* (2003) descrevem que, no fim do século 19, ocorreram, na Alemanha, diversas doenças bacterianas de veiculação hídrica por águas de abastecimento captadas de rios, como o surto epidêmico de cólera em Hamburgo em 1892 e 1893. A extração direta de corpos hídricos superficiais para o abastecimento público foi então substituída ou suplementada pela FM, pois se verificou que a passagem natural das águas de rios pelo subsolo favorecia a remoção de microorganismos.

A remoção de microorganismos é um dos benefícios identificados na FM, já que a técnica favorece o baixo custo de operação em sistemas de tratamento de água (PAIVA *et al.*, 2013; RAY, 2008; SHARMA & AMY, 2009). Outro benefício da FM é o conhecimento da interação entre as águas superficiais e subterrâneas por meio de caracterização hidrogeológica (BRUNKE & CONSER, 1997; DASH *et al.*, 2008; DEMÉTRIO *et al.*, 2013; HISCOCK & GRISCHEK, 2002).

No Brasil, a FMR foi desenvolvida como projeto piloto, em Pernambuco, por Paiva (2009), e, em Santa Catarina, por Michelan (2010); enquanto a FML foi desenvolvida como projeto piloto em Santa Catarina (ESQUIVEL, 2012; MONDARDO, 2009). Todos esses trabalhos de pesquisa tinham por objetivo a melhoria da qualidade da água e apresentaram bons resultados na aplicação da FM para essa finalidade.

Alguns autores explicam que a eficiência de um sistema de FM está relacionada ao conhecimento das condições hidrogeológicas favoráveis para promover a interação manancial superficial/subterrâneo e avaliar a sua influência na qualidade da água bruta (HUNT *et al.*, 2003; RAY *et al.*, 2003; SHANKAR *et al.*, 2009; SHUBERT, 2003). Embora reconheçam a relevância da hidrogeologia, poucos a enfatizaram em estudos sobre FM (HUNT *et al.*, 2003; PAIVA *et al.*, 2013; RAY *et al.*, 2003; SHANKAR *et al.*, 2009).

Verificou-se uma lacuna no conhecimento científico em estudos sobre FML realizados no Brasil. Esquivel (2012) e Mondardo (2009) desenvolveram pesquisas em um sistema de FML piloto, com objetivo de avaliar a eficiência da FM na qualidade da água para fins de abastecimento. No entanto, a hidrogeologia não foi apresentada como o objeto de estudo nessas pesquisas e os dados gerados não permitiram o conhecimento preciso da interação lago-aquífero. Conseqüentemente, não apresentaram a simulação das condições hidrológicas na área de estudo por meio de modelagem numérica. Além disso, embora o projeto sobre FML, em Santa Catarina, seja pioneiro no Brasil, esses autores avaliaram a redução de turbidez de forma indireta, por meio de colunas filtrantes em laboratório.

Se a hidrogeologia tivesse sido considerada como objeto desses estudos, seria possível, dentre outros, avaliar por meio dos dados hidrogeológicos, a interação manancial superficial/subterrâneo e a influência do meio físico nos resultados de qualidade da água. Essa hipótese foi a motivação para se desenvolver uma pesquisa sobre FM com ênfase em hidrogeologia em Viçosa (MG).

Em Viçosa (MG), até então, não existia um sistema piloto de FM e os dados hidrogeológicos existentes no campus da UFV eram insuficientes para o desenvolvimento de uma pesquisa com essa finalidade. Em estudos sobre qualidade da água, Roque (2010) avaliou a influência do meio físico na turbidez nos cursos d'água, na Bacia do São Bartolomeu, e demonstrou que, até então, não haviam sido aplicadas técnicas de Filtração em Margem para a redução da turbidez, no lago, nessa área de estudo. Além disso, as características físicas da área de estudo – comuns a muitas bacias hidrográficas da Zona da mata de Minas gerais, poderiam permitir que os resultados obtidos no estudo proposto pudessem ser aplicados a outras áreas dessa região.

Portando, uma pesquisa científica sobre FM com ênfase em hidrogeologia em Viçosa (MG), poderia permitir a geração de dados hidrogeológicos até então

desconhecidos e avaliar a influência da interação lago – aquífero na qualidade da água bruta proveniente do sistema de FM. Essa pesquisa, com ênfase em hidrogeologia, poderia contribuir com outros estudos sobre FM no Brasil e no exterior e, especificamente, em Viçosa (MG), poderia ser utilizada como um sistema alternativo na melhoria da qualidade da água utilizada no campus da UFV.

Ao se avaliar as possibilidades dos estudos hidrogeológicos por meio de FML, em Viçosa (MG), inicialmente levantaram-se dados hidrogeológicos provenientes:

- de trabalhos realizados no campus da UFV (DAKER, 1983; DUARTE, 2012; LISBOA, 2006; SOARES & RODRIGUES, 2006);
- do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (Siagas) (CPRM, 2013);
- do Sistema Autônomo de Água e Esgoto (Saae).

Os dados analisados nas pesquisas realizadas previamente (DAKER, 1983; DUARTE, 2012; LISBOA, 2006; SOARES & RODRIGUES, 2006) não apresentavam as características hidrogeológicas básicas do aquífero, tais como: armazenamento, espessura do aquífero, extensão, granulometria etc.

Os poucos poços profundos e freáticos cadastrados no Saae e no Siagas existiam apenas em residências ou condomínios localizados no entorno do campus. Muitos deles encontravam-se sem informações sobre perfil construtivo, profundidade, vazão bombeada e, comumente, sem outorga.

Outro problema identificado foi o desconhecimento da posição do nível d'água (NA) na área de estudo. Essa informação seria necessária para avaliar a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea com a implantação de outros poços neste aquífero, e avaliar o impacto do bombeamento de água no poço.

Diante do exposto, algumas questões foram levantadas:

- Existem áreas apropriadas às margens da barragem da UFV para implantação de um sistema de FML?
- O sistema de FML, no aquífero freático, seria capaz de fornecer dados hidrogeológicos que permitissem o conhecimento da interação lago – aquífero?

- Seria possível simular o fluxo hídrico subterrâneo estacionário e transiente por meio de modelagem numérica? O modelo numérico poderia demonstrar o comportamento do fluxo subterrâneo diante da variação do bombeamento? Como o sistema de FML responderia à implantação de outro poço de bombeamento neste aquífero?
- A FML seria capaz de reduzir a turbidez da água proveniente da mistura da água superficial e subterrânea?

Diante das questões-problema apresentadas, tem-se que os dados gerados nessa pesquisa poderão servir como uma base para a gestão e melhor conhecimento da dinâmica das águas superficiais e subterrâneas e suas interações, tanto em escala local, no campus da UFV, quanto em escala regional e nacional, em condições do meio físico semelhantes às estudadas na presente pesquisa. Além disso, o sistema de FML poderá ser utilizado como fonte suplementar de água, em especial, em períodos de demanda elevada e oferta reduzida (estiagem).

A relevância dessa pesquisa consiste:

- na implantação de um sistema de FML no campus da UFV;
- na avaliação da FML em resposta ao poço de bombeamento e às vazões exploráveis;
- na geração de dados hidrogeológicos em aquíferos freáticos em margens de lagos;
- na elaboração de modelos numéricos hidrogeológicos de sistemas de FML;
- na avaliação da redução da turbidez no sistema de FML.

Por meio da implantação de um sistema de FML no campus da UFV é possível obter dados hidrogeológicos, avaliar a interação lago - aquífero, elaborar um modelo numérico hidrogeológico de detalhe da área de estudo, simular o comportamento do fluxo subterrâneo nesse local e mensurar as vazões exploráveis em poços de captação. Aliado a isso, é possível avaliar a redução da turbidez e o Índice de Qualidade da Água

bruta do lago e do aquífero freático, permitindo avaliar a eficiência do sistema de FML como pré-tratamento específico para esse parâmetro.

O objetivo geral dessa pesquisa foi obter, avaliar e modelar as características hidrogeológicas de um aquífero freático em um sistema de Filtração em Margem de lago que influenciam na interação lago – aquífero. Adicionalmente, tem-se, como objetivos específicos:

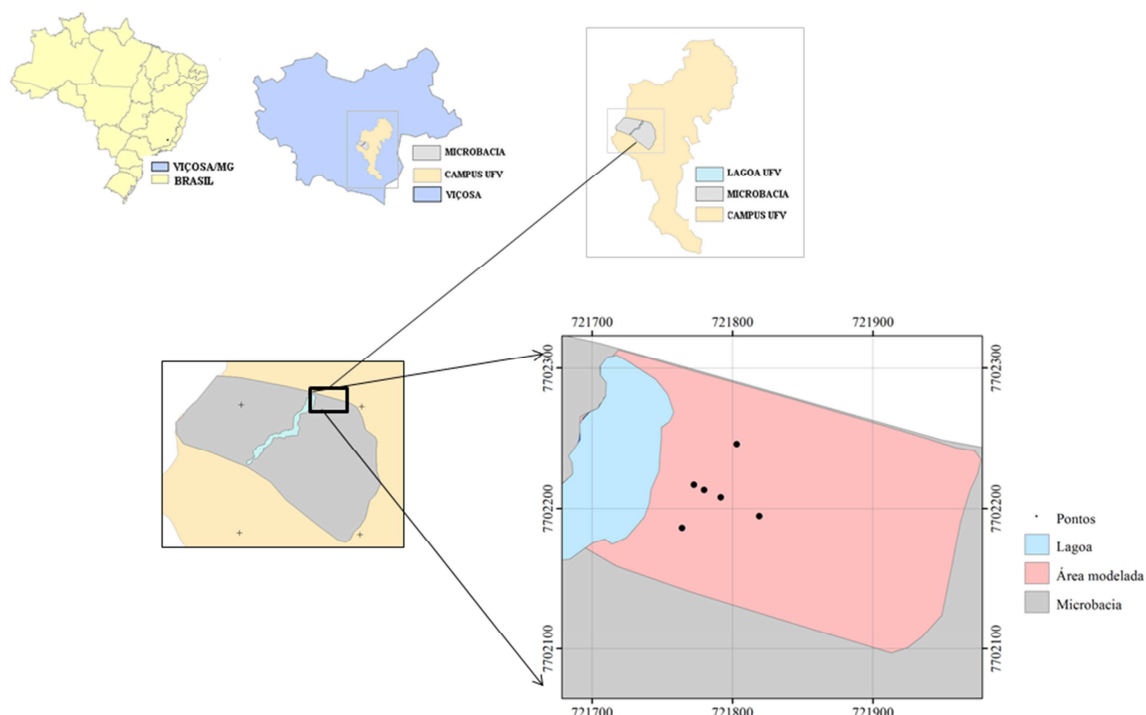
- Implantar um sistema de FML no campus da UFV;
- Realizar a caracterização hidrogeológica local;
- Elaborar o modelo hidrogeológico numérico local e simular o comportamento do fluxo subterrâneo;

Avaliar a redução da turbidez na água proveniente do poço e avaliar o Índice de Qualidade da água superficial e subterrânea.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida em uma microbacia localizada no campus da UFV entre os meridianos 42°51'30" W e 42°53'00" W, e entre os paralelos 20°45'30" S e 20°47'00" S e apresenta área de aproximadamente 0,04 km² e perímetro de 4,165 km (Figura 1).

Figura 1- Localização da microbacia, em relação ao campus da UFV, ao município de Viçosa, ao Estado de Minas Gerais e ao território Brasileiro.



Fonte: Dados da pesquisa

O município de Viçosa (MG) tem por característica um relevo predominantemente forte ondulado e montanhoso com encostas de perfil convexo-côncavo embutidos em vales de fundo chato, formados por terraços e leitos maiores, onde meandram pequenos córregos (CORRÊA, 1984).

As altitudes na microbacia variam entre 660 m e 780 m e, de acordo com a classificação do relevo adotada pela EMBRAPA (2006), têm-se declividades mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição das classes relevo na microbacia.

Relevo	Declividade (%)	Área (km ²)
Plano	0 - 3	0,1658
Suave ondulado	3 - 6	0,2148
Ondulado	6 - 20	0,4918
Forte ondulado	20 - 45	0,1262
Montanhoso	45 - 75	0,0014
Escarpado	> 75	0
Total		1

Fonte: (EMBRAPA, 2006)

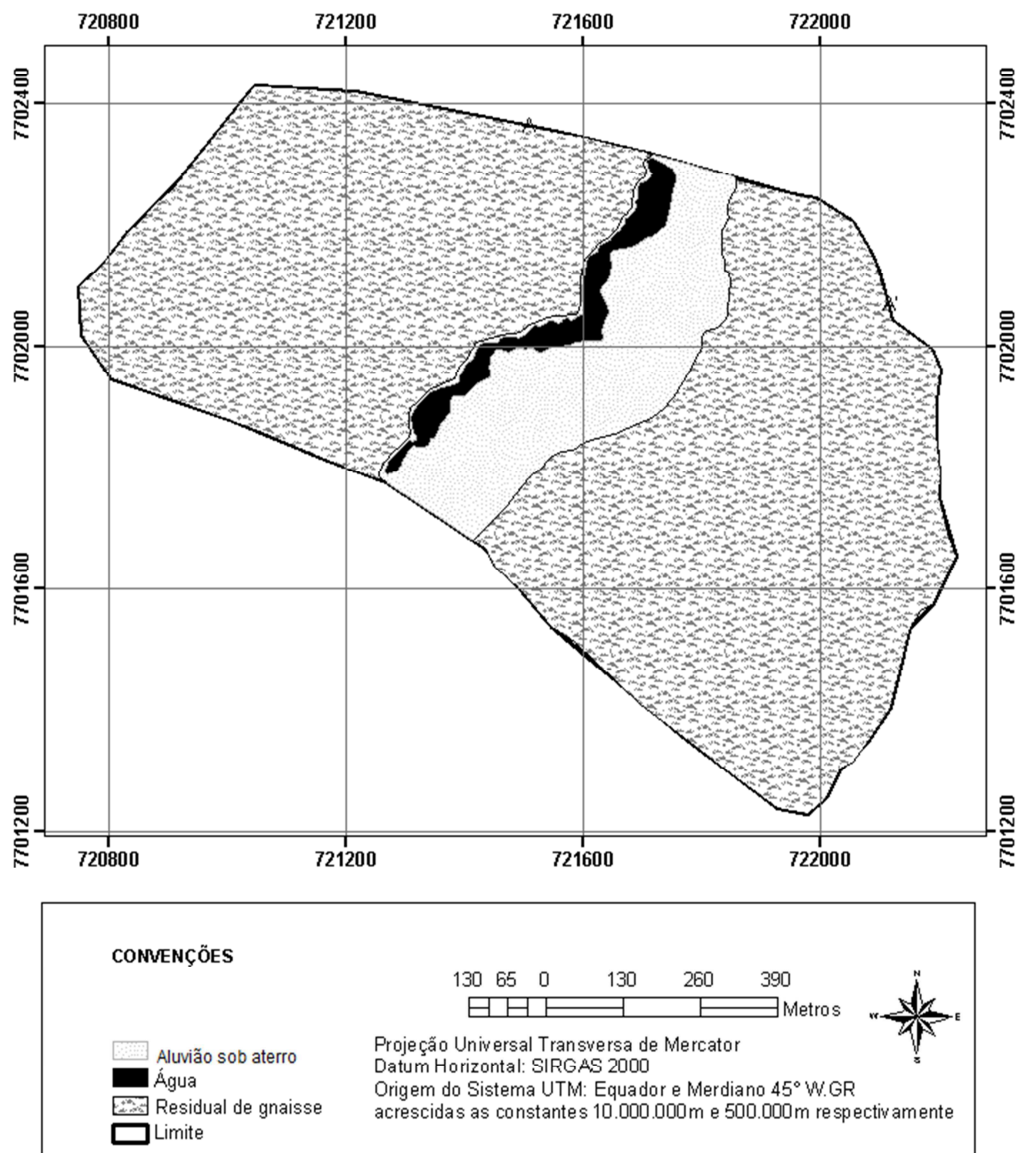
O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cwa, caracterizado por verões chuvosos, com precipitação média anual de 1200 mm. Julho e agosto são considerados os meses mais secos e frios do ano. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C e do mês mais quente superior a 22 °C (FERNANDES *et al.*, 2007).

Para a hidrogeologia local, tem-se que por meio do Mapa de Províncias Hidrogeológicas do Brasil, o município de Viçosa (MG) está inserido na sub-província Escudo Oriental 6-b – Sudeste, na qual predominam rochas cristalinas, principalmente gnaisse, migmatitos, xistos, quartzitos e granitos (BRASIL, 1984).

A hidrogeologia da área é representada por um aquífero freático poroso formado por depósitos aluvionares do Quaternário e solos residuais de gnaisse. A superfície potenciométrica desse aquífero está sob pressão atmosférica, portanto o aquífero é caracterizado como não confinado (livre ou freático).

A geologia da região tem o gnaisse como rocha predominante, com textura variada, que é encontrado em diversos níveis de alteração intempérica (ANDRADE, 2010; DAKER, 1983). Outras rochas metamórficas de alto grau, tais como anfíbolitos e migmatitos podem também ocorrer. Ao longo dos vales, ocorrem sedimentos Quaternários que se caracterizam pela elevada variedade textural (MARQUES, 2008), informação confirmada por meio da coleta e análise de amostras nos furos de sondagem realizados na área de estudo. Na área de estudo predominam o aluvião e o solo residual de gnaisse (Figura 2).

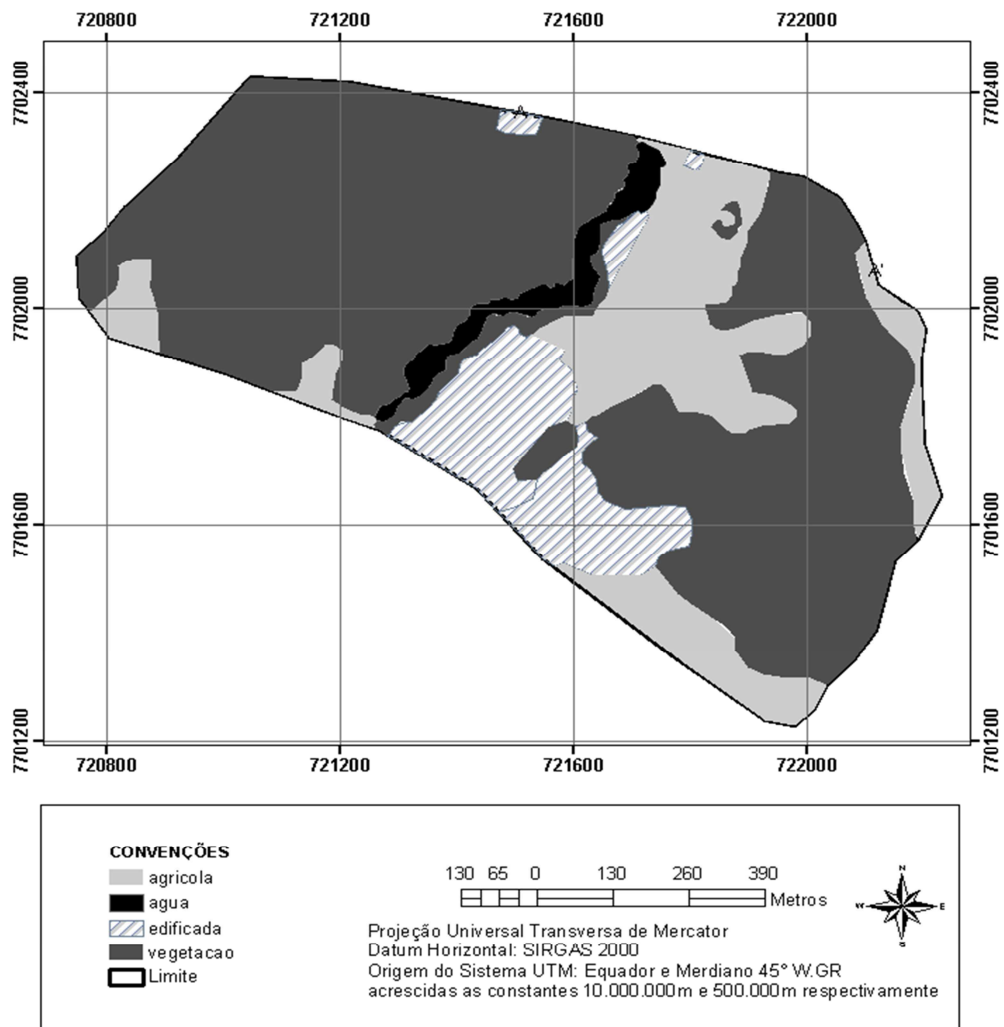
Figura 2 - Mapa de geologia da microbacia.



Fonte: Dados da pesquisa

O uso da terra é caracterizado por apresentar vegetação natural tipo Floresta Atlântica nos topos de morros, e nos locais onde o relevo é menos acentuado há predominância de lavouras e áreas de ocupação e de expansão urbana (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de uso da terra da microbacia.



Fonte: Dados da pesquisa

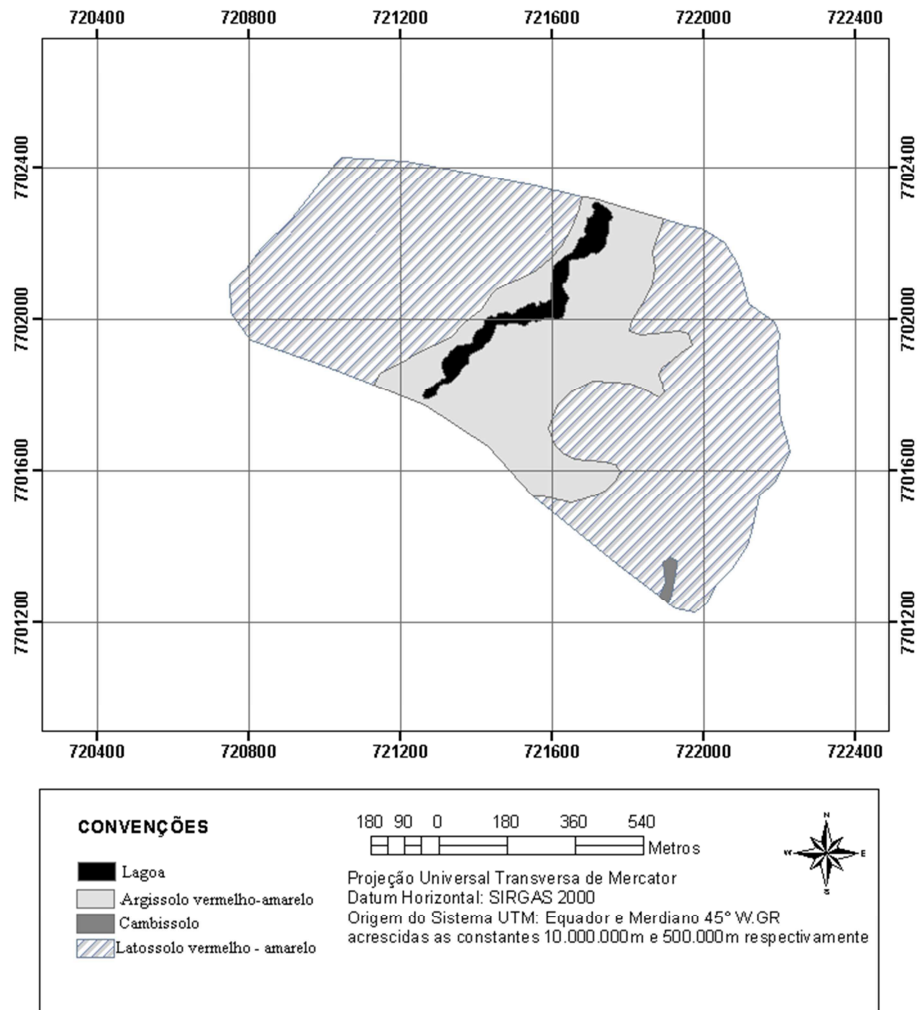
Em relação aos solos da microbacia, a classe dos Latossolos é predominante, seguida por Argissolos e Cambissolos (Figura 4).

As classes de solos identificadas na microbacia foram definidas pela Embrapa (2006) como:

Os latossolos compreendem solos com textura média a muito argilosa. São solos ácidos, poucos férteis, com fraca distinção entre os horizontes. Sua elevada permeabilidade está associada à alta porosidade e à uma maior resistência aos processos erosivos. Apesar de sua baixa fertilidade, são muito utilizados na agricultura em razão de relevo pouco movimentado no qual normalmente ocorrem e de suas boas propriedades físicas (EMBRAPA, 2006, p. 82). Os argissolos têm a textura variando de arenosa a argilosa no

horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B, sempre havendo aumento de argila daquele para este. O contraste dos teores de argila entre os horizontes A e B pode conferir uma baixa permeabilidade (EMBRAPA, 2006, p. 76). Os cambissolos apresentam drenagem variando de acentuada a bem drenado. Muitas vezes são solos pedregosos, cascalhentos e moderadamente rochosos, que apresentam grande variabilidade no que tange a profundidade, desde rasos a profundos (EMBRAPA, 2006, p. 77).

Figura 4- Mapa de solos da microbacia.



Fonte: Andrade (2010).

1.2 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

O trabalho está organizado em quatro capítulos. O primeiro capítulo aborda os trabalhos realizados em campo e laboratório para a implantação do Sistema de FML no campus da UFV; o segundo relaciona-se à coleta e tratamento de dados

hidrogeológicos. O terceiro apresenta o modelo numérico hidrogeológico e as simulações das condições hidrológicas na área de estudo, assim como a simulação do efeito da implantação de mais um poço de bombeamento na área de estudo. Por fim, o quarto capítulo apresenta uma avaliação da redução da turbidez no sistema de FML e do Índice de Qualidade da Água bruta do lago e do aquífero.

1.3 REFERÊNCIAS

ANDRADE, L.C.R. **Estudo da influência do meio físico e das atividades antrópicas na qualidade da água na sub-bacia do Córrego Palmital – Viçosa (MG)**. 2010. 154p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. **Geologia do Brasil: Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais**. Brasília, DF, 1984. 501p.

BRUNKE, M.; CONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. **Blackwell Science Ltd**, v. 37, p.1-33, 1997.

CPRM, Sistema de Informações de Águas Subterrâneas Web (SIAGAS). 2013.

CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila dos solos do Planalto de Viçosa, MG**. 1984. 86p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1984.

DAKER, A. **Captação, Elevação e Melhoramento da Água; A água na agricultura**. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983, 408p.

DASH, R. R., MEHROTRA, I., KUMAR, P., GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. **Hydrogeology Journal**, v. 16, p.1089–1099, 2008.

DEMÉTRIO, J. G. A., PAIVA, A. L. R., FREITAS, D. A., BATISTA, A. G. S., CABRAL, J. J. S. P. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de Caixa d`água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**, v. 27, p.111-126, 2013.

DUARTE, L. N. **Avaliação do comportamento solo-estrutura de elementos de fundação tipo sapata estacada**. 2012. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

ESQUIVEL, L. G. R. **Remoção de matéria orgânica natural e precursores de trihalometanos por filtração em margem na lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil.** 2012. 246p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

FERNANDES, M. M., KER, J. C., REZENDE, S. B. Delineamento semi-detalhado de solos empregando aerofotos não-convencionais na sub-bacia Palmital - rio Turvo Sujo, MG. **Geonomos**, v. 15, p.1-7, 2007.

HUNT, H.; SCHUBERT, J.; RAY, C. Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.19–28, 2003.

JARAMILLO, M. Riverbank filtration: an efficient and economical drinking-water treatment technology. **Dyna**, v. 171, p. 148-157, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n171/a19v79n171.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2013.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro guelph e ensaios de laboratório.** 2006. 89p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006.

MARQUES, E. A. G. Relatório técnico de Mapeamento Geológico da Sub-Bacia do Ribeirão São Bartolomeu (MG). 2008.

MICHELAN, D. C. G. S. **Filtração em margem de rio precedendo a filtração lenta, para remoção de carbofurano, em tratamento de água para consumo humano.** 2010. 342p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas.** 2009. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

PAIVA, A. L. R. **O Processo Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe, Tese de doutorado.** 2009. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. **Revista Brasileira de Recurso Hídricos**, São Paulo; v. 18, n.1, p. 235-247, jan. 2013.

RAY, C. Worldwide potential of riverbank filtration. **Clean Technology Environmental Policy**, v.10, p. 223–225, 2008.

RAY, C.; SCHUBERT, J.; LINSKY, R. B.; MELIN, G. Introduction. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.1–15, 2003.

ROQUE, L. A. **Avaliação da Influência do Uso do Solo Sobre a Turbidez na Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu no Trecho a Montante do Campus da UFV**, 2010, 60p. Monografia (Geografia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

SCHMIDT C. K.; LANGE F. T.; BRAUCH H.; KÜHN W. Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. **DVGW-Water Technology Center (TZW), Germany**, p. 1-17, 2003.

SHANKAR V.; ECKERT, P.; OJHA, C.; KÖNIG, C. M. Transient three-dimensional modeling of riverbank filtration at Grind well field, Germany. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 321–326, 2009.

SHARMA, S.K.; AMY, G. Bank filtration: A sustainable water treatment technology for developing countries. In: 34th WEDC International Conference, Addis Ababa, Ethiopia, 2009. Anais. Addis Ababa, 2009.

SHUBERT, J. German Experience with Riverbank Filtration Systems . In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-water quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.35–48, 2003.

SOARES, J. F.; RODRIGUES, V. A. J. **Filtração em Margem - Estudos Preliminares para o Sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Viçosa**, 2006, 46p. Monografia (Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – MG).

CAPÍTULO 1 - IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO E CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO AQUIFERO LIVRE

1 INTRODUÇÃO

A Filtração em Margem (FM) é uma técnica que consiste na locação e bombeamento de poços nas margens sedimentares de rios (FMR) ou lagos (FML), na qual a água induzida pelo bombeamento permite a mistura das águas superficiais e subterrâneas (RAY *et al.*, 2003). Na passagem através do meio poroso, ocorrem processos químicos, físicos e biológicos que podem contribuir com a remoção da turbidez, matéria orgânica e microorganismos, dentre outros (SENS *et al.*, 2006; SOPHOCLEUS, 2002).

Devido à complexidade do assunto, alguns critérios hidrogeológicos devem ser avaliados quando se pretende implantar eficientemente esse sistema (HUNT *et al.*, 2003; RAY *et al.*, 2011). Ray *et al.* (2003) descrevem alguns critérios que devem ser considerados na sua implantação, para o funcionamento eficaz do sistema de FM. Segundo eles, a geologia deve ser identificada prioritariamente, pois o poço de bombeamento necessita ser implantado em uma área constituída de material *aluvionar*. Os poços de monitoramento devem ser implantados nas proximidades desse poço para avaliação potenciométrica e conhecimento da interação manancial superficial/subterrâneo. Além disso, devem-se conhecer outras características do meio físico, como: a topografia, uso da terra, solos (RAY *et al.*, 2003).

A hidrogeologia é uma prioridade em pesquisas envolvendo Filtração em Margem (DEMÉTRIO *et al.*, 2013; HUNT *et al.*, 2003; RAY *et al.*, 2003; RAY, 2008; SHANKAR *et al.*, 2009); entretanto, poucas pesquisas priorizaram esses estudos para esse tema (RAY, 2008; SHANKAR *et al.*, 2009). As características hidrogeológicas podem permitir a compreensão dos fluxos subterrâneos, a disponibilidade de água (GEBERT *et al.*, 2011), a estimativa da recarga e a influência de fatores, tais como: clima, solo, vegetação, e interações planta/solo (BAKER *et al.*, 2013; NIENDE *et al.*, 2013).

Em Viçosa (MG), a geologia local, até então, era desconhecida para implantação do sistema de FML. Além disso, os poucos poços existentes eram localizados em residências ou condomínios localizados no entorno do campus, dos quais, muitos encontravam-se sem informações sobre perfil construtivo, profundidade, vazão bombeada e, comumente, sem outorga. Diante desse problema, algumas questões foram levantadas: *Existem áreas apropriadas às margens do lago da UFV para implantação de um sistema de FML? Seria possível a caracterização hidrogeológica do sistema aquífero na área de estudo?*

Para essa questão problema tem-se a premissa que *A partir de uma investigação criteriosa do meio físico é possível implantar um sistema de FM e compreender a interação lago - aquífero e os parâmetros hidrogeológicos das unidades aquíferas.*

Portanto, iniciou-se essa pesquisa, com uma investigação do meio físico no campus da UFV considerando-se as informações dos materiais de sub-superfície identificados em boletins de sondagens pré-existentes e uma avaliação temporal do uso da terra por meio de fotointerpretação. Esse critério adotado sugeriu como área de estudo uma microbacia localizada no campus como a área mais apropriada para a implantação do sistema de FML. A partir daí, realizou-se, no campo experimental Diogo Alves de Mello, a distribuição espacial dos furos de sondagem SPT de forma semelhante a Paiva (2009).

Posteriormente, nesses furos de sondagens, foram construídos o poço de bombeamento (“POÇO”) e os poços de monitoramento (SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5). Durante um ano hidrológico (setembro/2013 a agosto/2014) realizou-se o monitoramento potenciométrico nesses poços, permitindo, com isso, uma avaliação da interação lago-aquífero no sistema de FML implantado. Outros trabalhos de campo foram realizados nessa área de estudo tendo em vista a geração de dados hidrogeológicos que permitissem o conhecimento da interação da água superficial e subterrânea.

Esse capítulo apresenta a implantação do sistema de FML e a caracterização hidrogeológica do aquífero freático.

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

A pesquisa iniciou-se com uma investigação do meio físico por meio de análise das sondagens pré-existentes (BOLETIM DE SONDAÇÃO, 2006) e avaliação temporal, por meio de fotointerpretação. A fotointerpretação foi realizada para a Imagem da satélite Ikonos 2007, resolução espacial 1m com apoio de campo e Fotografias aéreas do ano 1963, na Escala 1:25000.

A partir dessa informação, procedeu-se com a realização de cinco furos à percussão (SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5) com diâmetro igual a 4” e um furo denominado “POÇO”, com diâmetro igual a 8”. As sondagens à percussão SPT (*Standard Penetration Test*) foram realizadas conforme NBR 6484/2001 (ABNT, 2001) e os procedimentos estabelecidos no Manual de Sondagem (ABGE, 1999). Os boletins e sondagem estão apresentados no APÊNDICE A.

As amostras foram descritas por meio da análise tátil-visual, na qual se verificou a mudança da ocorrência do material em diferentes profundidades. Assim, para realização do ensaio de granulometria, organizaram-se as amostras de solo por profundidades nos furos de sondagem SP1, SP2 e SP3; e, nos furos SP4 e SP5, realizou-se apenas a análise tátil-visual (Figura (I) 1).

Figura (I) 1 - Registro fotográfico da análise tátil-visual e amostras de solo coletadas no amostrador padrão da sondagem à percussão.



Fonte: Dados da pesquisa

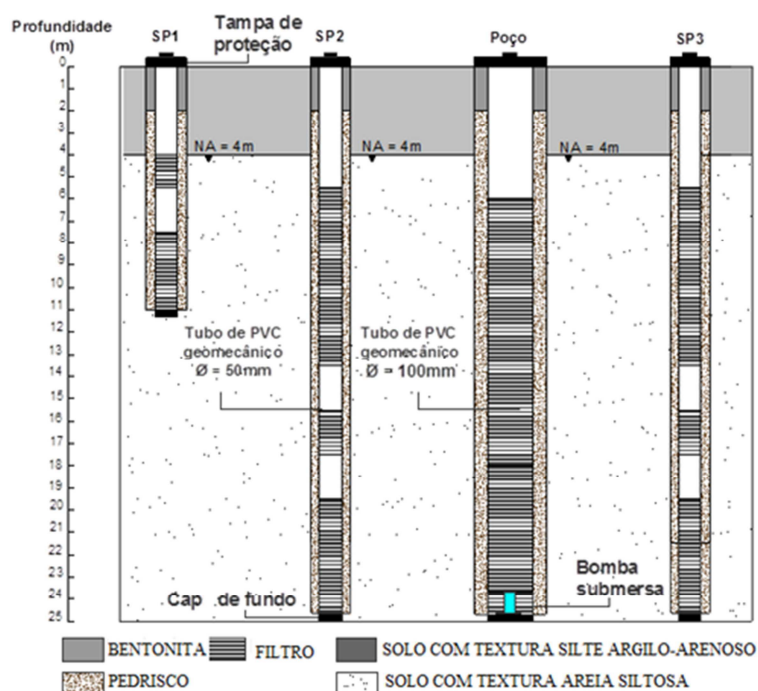
A caracterização física dos solos analisados consistiu em três ensaios: teor de umidade, NBR 6457/86, ABNT (1986); massa específica dos sólidos, NBR 6508/84

ABNT (1984a); e a análise granulométrica NBR 7181/84 ABNT (1984b) (APÊNDICE B).

Os poços de monitoramento foram construídos nos furos (SP1, SP2, SP3, SP4, SP5 e POÇO), conforme orientações de Caputti *et al.* (2001).

Os poços de monitoramento receberam tubo de PVC geomecânico com diâmetro igual a 2”, e o “POÇO” recebeu tubo de PVC geomecânico com diâmetro igual a 4”. Os tubos com ranhuras (filtro) foram intercalados e preenchidos com pedrisco (Figura (I) 2). A proteção da parte superficial foi realizada com bentonita, enquanto que na parte inferior dos tubos colocou-se um tampão (cap de fundo). A bomba submersa utilizada no poço é da marca EBARA, modelo do motor M4P2, Modelo Bomba 4BPS8-5, monofásica, potência 372 W à 2237 W, 220V, com capacidade de vazão variando de 5 m³.h⁻¹ a 9 m³.h⁻¹ (EBARA, 2013).

Figura (I) 2 - Perfil construtivo dos poços de monitoramento e do “POÇO”.



Fonte: Dados da pesquisa

O projeto piloto foi implantado no campo experimental Prof. Diogo Alves de Mello, no período entre maio/2013 e outubro/2013.

2.2 TESTE DE AQUÍFERO

O teste de aquífero consiste em realizar-se o bombeamento de um poço, com vazão constante e conhecida, observando-se a evolução dos rebaixamentos, com o tempo, nos poços de observação localizados próximos a esse poço. Dentre os parâmetros hidrodinâmicos obtidos nesse teste tem-se: transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e o armazenamento (S).

Os métodos de interpretação de testes de aquíferos são definidos em função das condições hidrodinâmicas do aquífero confinado (não drenante ou drenante) e freático; regime de bombeamento (permanente ou transiente) e condições de bombeamento (descarga constante ou variável) (DEMÉTRIO *et al.*, 2013).

O bombeamento produz o rebaixamento do nível d'água do aquífero, constituindo o chamado “cone de depressão”. O raio desse cone é denominado raio de influência (R_i), que é a distância horizontal do centro do poço de bombeamento até o limite do cone de rebaixamento. Segundo Richard *et al.* (2014) em poços em bombeamento à vazão constante, o raio de influência pode ser estimado por meio da (Equação 1):

$$R_i = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

R = raio de influência, limite do cone de rebaixamento [L];

T= transmissividade [$L^2.T^{-1}$];

t= tempo de bombeamento [T];

S = coeficiente de armazenamento.

Essa equação é aplicada para as condições de aquífero homogêneo e isotrópico. Alguns fatores podem interferir no rebaixamento dos poços e conseqüentemente na qualidade de resultados dos testes de aquíferos, como: o nível de penetração do poço no aquífero e a existência de pré-filtro no poço, dentro da zona de captação (MALAMA *et al.*, 2011).

Nessa pesquisa, o teste de aquífero foi realizado conforme CPRM (1998) e envolveu três poços: dois poços de monitoramento (SP2 e SP3) e o “POÇO”. Os poços SP2 e SP3 estão distantes do poço bombeado em, respectivamente, 12,93 m e 8,08 m.

Esse teste foi realizado nos dias 09/12/2013 e 10/12/2013, em duas etapas. A primeira etapa (rebaixamento) ocorreu no período de 24 h, e a segunda etapa (recuperação), no período de 12 h.

O teste foi realizado:

- no poço: por meio de bombeamento e medição da vazão (por meio de hidrômetro);
- por meio do monitoramento dos níveis dinâmicos nos três poços.

Os poços utilizados no teste de bombeamento penetram totalmente o aquífero freático e possuem filtros com ranhuras e pré-filtro na zona de captação. Na área de estudo, não existiam outros poços que pudessem interferir no regime de fluxo para o poço em análise.

Adotou-se como método de interpretação o Método de Theis, com correção de Jacob (DEMÉTRIO *et al.*, 2013). Considerou-se, para fins de teste de bombeamento, a espessura saturada do aquífero freático igual a 20 m, à vazão constante de $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Para a medição dos níveis piezométricos, utilizaram-se medidores de nível elétrico da marca Solinst. Os resultados foram interpretados com o auxílio do software Aquifer Test Pro 4.0, da empresa Waterloo Hydrogeologyc Inc. (RÖHRICH, 2005), por meio do Método de Theis, com correção de Jacob, para aquífero freático em regime transiente.

2.3 ANÁLISE POTENCIOMÉTRICA

Na elaboração dos mapas potenciométricos, consideraram-se os seguintes dados:

- Monitoramento potenciométrico: O poço operava conforme o horário de utilização de água no campo experimental Diogo Alves de Mello, de 7h30min. às 16h30min. As campanhas de medição dos níveis potenciométricos nos cinco poços e no “POÇO” foram realizadas duas vezes ao dia: pela manhã, antes do início da operação do poço, permitindo uma análise do fluxo subterrâneo sem interferências na área; e à tarde,

após o sistema entrar em operação, permitindo uma análise da influência do poço sobre esse fluxo (APÊNDICE B).

- Levantamento topográfico: As coordenadas planas UTM referentes a cada poço foram obtidas por Tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*) com utilização de receptores GNSS L1/L2 da marca TechGeo, modelo GTR – G2. O levantamento topográfico foi realizado por alunos do curso de Engenharia de Agrimensura, sob orientação do Prof. Dr. Joel Gripp Junior. As curvas de nível foram obtidas com equidistância vertical igual a 0,20 m, Escala 1:500. Os dados referentes à batimetria do lago foram obtidos no trabalho realizado por Ferreira *et al.* (2012), Escala 1:500. Todos os planos foram referenciados ao Datum SIRGAS 2000, com sistema de projeção adotado UTM, Fuso 23 S. A elaboração dos mapas foi realizada por meio do software de SIG ArcGIS Desktop, versão ArcInfo 10, ESRI (2010) e AutoCAD versão 2009 (AUDODESK, 2009). Para a medição dos níveis piezométricos, utilizaram-se medidores de nível elétrico da marca Solinst.

Consideraram-se, também, nas análises, os dados referentes à batimetria, obtidos por Ferreira *et al.* (2012), além de dados de precipitação provenientes de uma Estação Meteorológica existente no Campus da UFV.

2.4 ESTIMATIVA DA RECARGA PELO MÉTODO VNA

Nessa pesquisa obteve-se a estimativa da recarga por meio do método da Variação do Nível d'água (VNA) ou, em inglês, “*Water Table Flutuation*” (WTF) conforme (HEALY & COOK, 2002) (Equação 2).

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

R = recarga [L.T⁻¹];

S_y = rendimento específico;

Δh = variação da altura da superfície freática devido a um evento de recarga [L];

Δt = tempo de duração do evento de recarga [T].

O rendimento específico (S_y) foi calculado conforme a equação de Biecinski (CARVALHO *et al.*, 2014; MAZIERO & WENDLAND, 2008; POEHLS & SMITH, 2009 (Equação 3). O valor da condutividade hidráulica (K) foi proveniente do teste de aquífero.

$$S_y = 0,117\sqrt[3]{K} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

S_y = rendimento específico;

K = condutividade hidráulica [L.T⁻¹].

A taxa de recarga (r) foi calculada considerando-se a precipitação durante o ano hidrológico.

2.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO MÍNIMO DE PERCURSO DA ÁGUA DO MANANCIAL SUPERFICIAL ATÉ O POÇO

Para a determinação do tempo mínimo de percurso da água do manancial superficial até o poço, considerou-se a equação proposta por Dillon *et al.* (2002). Dash *et al.* (2008) realizaram experimentos utilizando traçadores em sistema de FML, na Índia, e recomendam que o tempo mínimo de remoção de turbidez em sistema de FM deveria corresponder a 60 dias.

Dillon *et al.* (2002) propuseram a Equação 4 para determinação de t_{\min} em sistemas de Filtração em Margem, considerando as seguintes condições: o sistema está em equilíbrio; o aquífero é homogêneo e não confinado; não existe uma camada semipermeável no fundo e nas paredes do leito do rio; a espessura da camada saturada é uniforme; a velocidade de escoamento da água subterrânea é pequena e pode ser ignorada.

$$t_{\min} = \frac{2\pi D n_e L^2}{3Q} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

t_{\min} = tempo mínimo de percurso da água até o poço [T];

D = altura média do aquífero saturado [L];

n_e = porosidade efetiva do aquífero;

L = distância do poço até a margem [L];

Q = vazão do poço [$L^3.T^{-1}$].

2.6 VELOCIDADE DE PASSAGEM DA ÁGUA PELO MEIO POROSO

A velocidade de passagem da água pelo meio poroso pode ser relacionada à t_{\min} (Equação 5) e pode ser determinada por meio da Ley de Darcy (MONDARDO, 2009).

$$v = \frac{L}{t_{\min}} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

v = velocidade de passagem da água pelo meio poroso [$L.T^{-1}$];

L = distância do poço até a margem [L];

t_{\min} = tempo mínimo de percurso da água até o poço [T].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

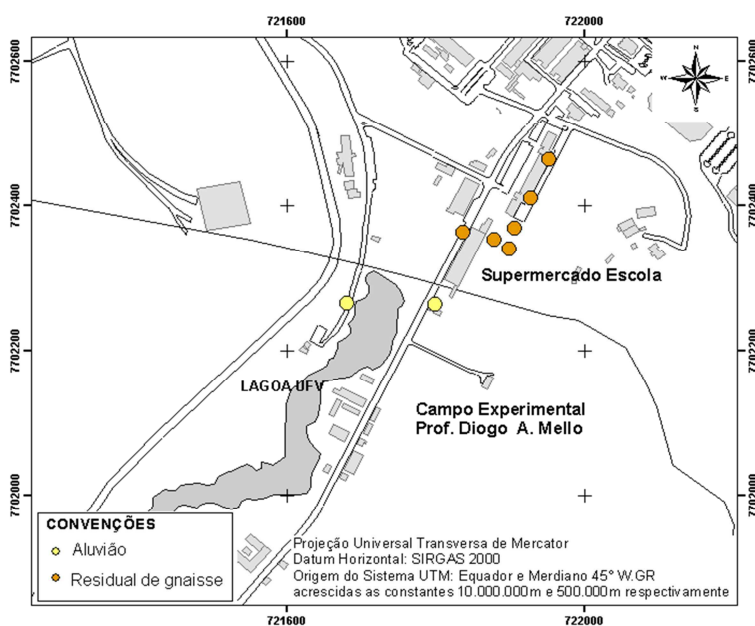
3.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Identificaram-se nos boletins de sondagens pré-existent, oito furos localizados nas proximidades do lago. O objetivo foi identificar, no campus da UFV, os locais com ocorrência de aluvião em aquífero freático, pois esse material sedimentar, localizado às margens de rio ou lago, favorece a implantação de sistemas de FM (HUNT *et al.*, 2003; RAY *et al.*, 2003).

Por meio da análise dos boletins de sondagens pré-existent, identificaram-se a predominância do solo residual de gnaise (seis furos) e aluvião (dois furos) nas proximidades do campo experimental Prof. Diogo Alves de Mello. Em paralelo, verificou-se, por meio de fotointerpretação que, na década de 1960, uma vertente do rio São Bartolomeu existia no local onde atualmente encontra-se a barragem da UFV.

Essas informações sugeriram que a área mais apropriada para implantação do sistema de FML seria dentro do campo experimental Prof. Diogo Alves de Mello. (Figura (I) 3).

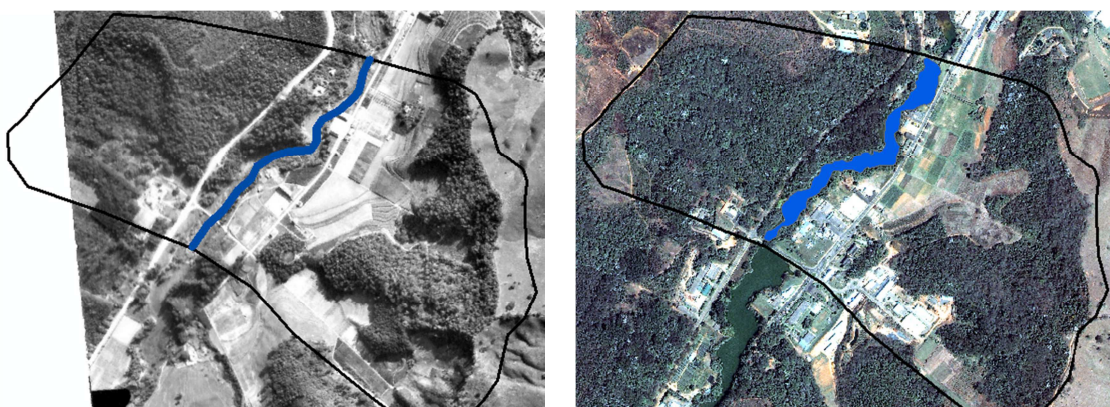
Figura (I) 3 - Mapa de localização das sondagens pré-existent.



Fonte: Boletins de sondagens.

Na imagem da direita, na Figura (I) 4, é possível observar a vertente do São Bartolomeu, que existia na área de estudo antes da construção da barragem de Sedimentação, mostrada na imagem da direita. Posteriormente à data da foto, esse curso do rio foi substituído pelos lagos construídos para função paisagística e como barragem da UFV, incluindo a referida barragem de Sedimentação (SABIONI & ALVARENGA, 2006). As suas margens receberam, aproximadamente, 5 m de aterro, ocasionando o modificação do uso da terra original.

Figura (I) 4 - Foto aérea (1963) e Imagem de satélite Ikonos (2007).



Fonte - Dados da pesquisa.

A investigação do meio físico por meio de análise de ocorrência de aluvião nos boletins de sondagens permitiu definir os locais de presença dessa camada às margens da barragem da UFV. A fotointerpretação foi um instrumento complementar que permitiu comparar as modificações no uso da terra, na área de estudo, no ano de 1963 e no ano 2007. Aliada a essas informações, outras bibliografias (DAKER, 1983; SABIONI & ALVARENGA, 2006) confirmaram as modificações do uso da terra e os efeitos da construção da barragem da UFV sobre o rio São Bartolomeu na década de 1960. Tendo em vista que o aluvião é um material sedimentar característico de margem de rio, o conhecimento da existência da vertente do rio São Bartolomeu, naquele local, corroborou os dados coletados nas sondagens.

As duas análises permitiram definir uma microbacia, localizada dentro do campus da UFV, e inserida na bacia do São Bartolomeu, como a área mais apropriada para implantação do sistema de FML. O sistema de FML foi planejado para ser implantado às margens da barragem da Dendrologia, devido à predominância do aluvião e por estar

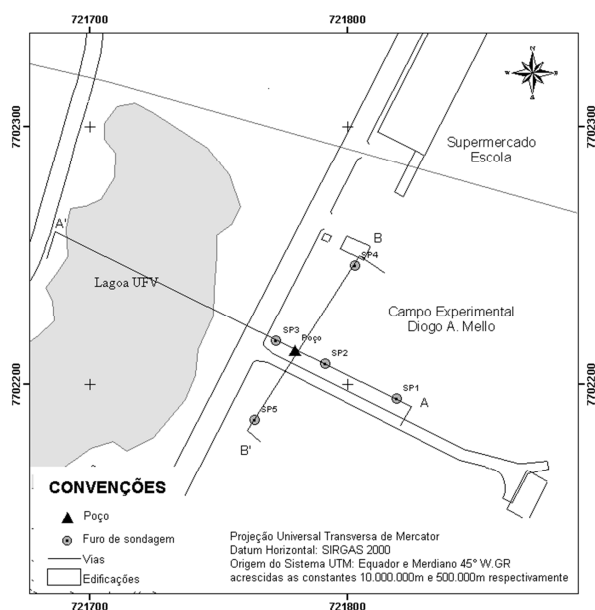
às margens do lago de captação da Estação de Tratamento de Água (ETA/UFV) e do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (Saae).

Nessa pesquisa, adotou-se um critério técnico para a seleção da área de implantação do projeto piloto de FML, de forma diferente à utilizada nas pesquisas anteriormente realizadas no Brasil. Em Pernambuco, Paiva (2009) definiu junto aos técnicos da equipe da Gerência de Águas Subterrâneas da COMPESA, a área da Estação Elevatória de Caixa d'Água, situado no bairro de Caixa d'Água, Olinda (PE) como a área piloto para implantação do sistema de FMR. Michelin (2010) considerou a proximidade do plantio às margens do rio Itajaí do Sul, a área drenante no município de Ituporanga (SC) e as condições geológicas do local para a definição da área de implantação. Ou seja, na presente pesquisa, a seleção da área de implantação da FM se deu por critérios técnicos e não logísticos.

3.2 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE FML

A distribuição espacial dos furos de sondagem em forma de cruz foi de forma realizada semelhante ao trabalho realizado por Paiva (2009) (Figura (I) 5).

Figura (I) 5 -- Distribuição espacial dos furos de sondagens na área de estudo.



Fonte - Dados da pesquisa

Estabeleceu-se como ponto inicial (SP1) o ponto mais distante da barragem, próximo ao relevo mais elevado. Esse critério permitiu verificar a ocorrência de aluvião a mais de 40 m de distância do “LAGO”, e inferir que o aluvião poderia ocorrer nas proximidades dele.

Os furos de sondagens chegaram à profundidade de até 25 m e foram encerrados quando alcançado o limite do impenetrável, interpretado como sendo o topo rochoso. Considerou-se a espessura máxima do aquífero aluvionar como sendo igual a 25 m. Todos os poços foram implantados no aluvião.

Os resultados das análises granulométricas são apresentados na Tabela (I) 1 e ilustrados por meio das curvas granulométricas.

Tabela (I) 1 Resultados da análise granulométrica pertencentes às amostras de solos dos furos de sondagens SP1, SP2 e SP3.

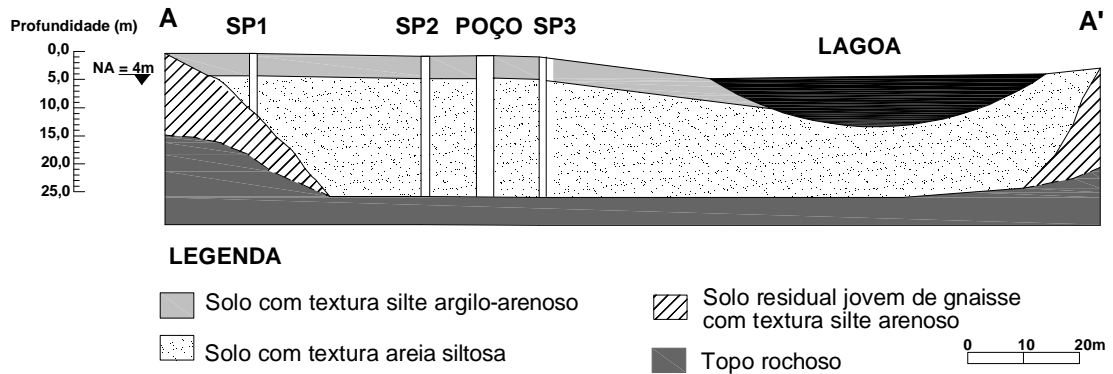
Furo/Amostra/ Profundidade(m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	Classificação do solo
SP1/A1/(1 a 4)	30	41	28	1	Silte argilo - arenoso
SP1/A2/(4 a 8)	20	28	48	4	Areia siltosa com mica e matéria orgânica
SP1/A3/(8 a 9)	31	33	31	5	Silte - arenoso
SP1/A4/(9 a 11)	5	15	72	8	Areia –siltosa com mica e matéria orgânica
SP2/A5/(1 a 5)	45	42	12	1	Argila siltosa
SP2/A6/(5 a 6)	9	18	66	7	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP2/A7/(6 a 8)	24	39	36	1	Silte arenoso
SP2/A8/(8 a 12)	8	17	69	6	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP2/A9/(12 a 18)	23	41	30	6	Silte arenoso
SP2/A10/(18 a 20)	28	35	36	1	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP3/A11/(1 a 4)	52	37	10	1	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP3/A12/(4 a 11)	10	10	72	8	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP3/A13/(11 a 14)	21	37	39	3	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica
SP3/A14/(14 a 19)	19	29	50	2	Areia – siltosa com mica e matéria orgânica

Fonte: Dados da pesquisa

Com base na descrição detalhada das amostras que foram coletadas nos seis furos de sondagem, elaboraram-se dois perfis geológicos - geotécnicos: um transversal ao

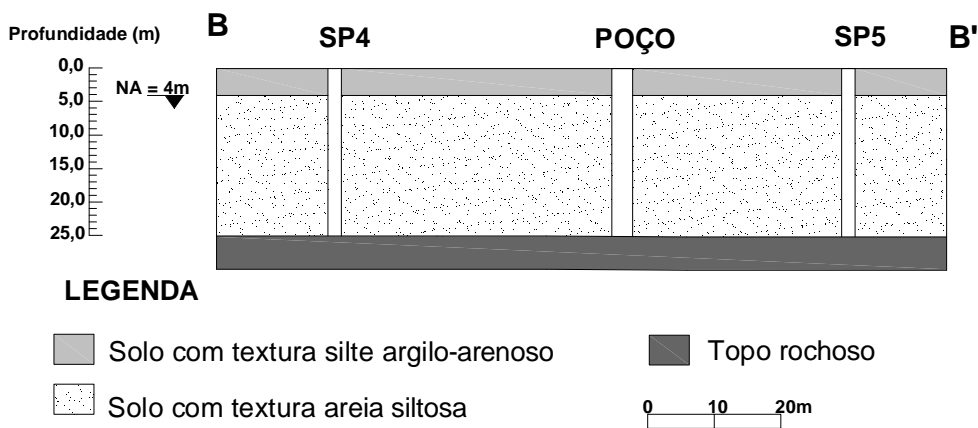
lago, denominado AA' (Figura (I) 6); e outro, paralelo ao lago, denominado BB' (Figura (I) 7).

Figura (I) 6 - Perfil geológico - geotécnico AA', transversal ao "LAGO" da UFV.



Fonte - Dados da pesquisa

Figura (I) 7 - Perfil geológico - geotécnico BB', paralelo ao "LAGO" da UFV.



Fonte - Dados da pesquisa

Nas duas seções, foi possível verificar a ocorrência de duas camadas predominantes. A primeira camada encontra-se limitada pela superfície do terreno até a profundidade de 4 m e é constituída de solo silte argilo – arenoso, proveniente de um aterro realizado na UFV na década de 1960 (SABIONI & ALVARENGA, 2006). A segunda camada ocorre no intervalo de 4 m a 25 m de profundidade e é caracterizada pela ocorrência de amostras de solo com textura areia siltosa. A areia siltosa identificada

em outros trabalhos (DAKER, 1983; DUARTE, 2012; SOARES & RODRIGUES, 2006) se estende até a outra margem do “LAGO” (Figura (I) 6). Nessa camada, encontram-se as zonas de captação dos poços. O solo residual jovem de gnaiss com textura silte arenoso foi identificado apenas na amostra SP1/A3 (Figura (I) 6).

Na área de estudo, não existiam outros poços, além dos construídos para essa pesquisa. Assim, diferentemente de Paiva (2009), não há a interferência de outros poços no bombeamento do sistema de FML na presente pesquisa. Esse fato é relevante para a melhor precisão da caracterização hidrogeológica local, cujos resultados serão mostrados posteriormente. Recomenda-se que outros poços sejam locados nos pontos mais elevados da área de estudo, para aprimorar o conhecimento das características hidrogeológicas locais.

Por meio dos perfis geológicos - geotécnicos, verificou-se a homogeneidade dessas duas camadas, cada uma com condutividades hidráulicas (K) distintas.

Os poços que penetram totalmente o aquífero não ficaram secos em nenhuma época do ano, mesmo com a estiagem, e os níveis d’água responderam rapidamente às variações sazonais. Com base nessas informações, o poço foi implantado, no Campo Experimental da UFV Prof. Diogo Alves de Mello. Na imagem da Figura (I) 8, mostra-se o mesmo após finalizada sua implantação.

Figura (I) 8 - Registro fotográfico da localização do “POÇO”.



Fonte - Dados da pesquisa

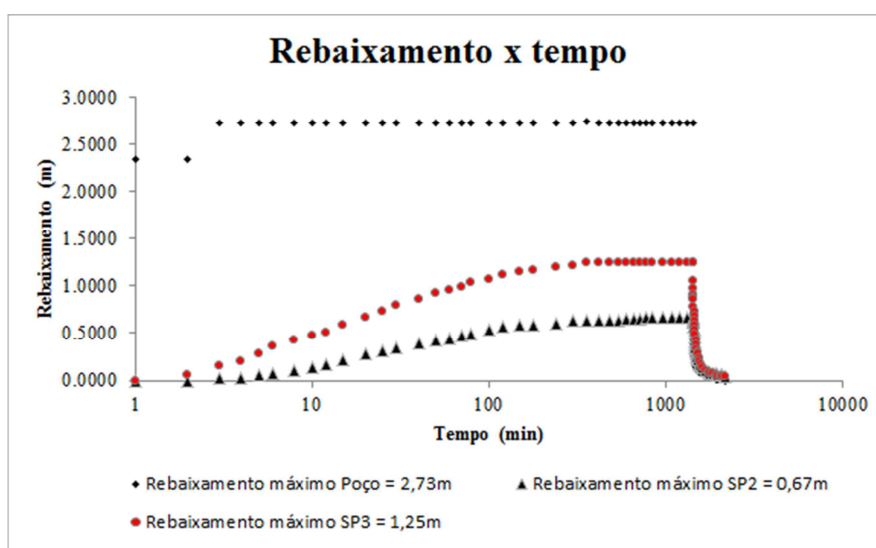
A vazão bombeada no POÇO variou, durante o ano hidrológico, entre $5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ a $6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Nessa pesquisa, o poço operava conforme o horário de utilização de água no campo experimental Diogo Alves de Mello, de 7h30min. às 16h30min.

3.3 TESTE DE AQUÍFERO

As análises obtidas por meio do teste de bombeamento permitiram a obtenção dos seguintes dados para o aquífero freático: regime de bombeamento; parâmetros hidrodinâmicos do aquífero (T, S e K) e o raio de influência durante o bombeamento (R_i).

Os dados monitorados indicaram que, nos poços de observação (SP2 e SP3), houve uma evolução progressiva dos rebaixamentos do nível d'água em resposta ao bombeamento até, aproximadamente, o tempo de 300 min. (Figura (I) 9). Após esse tempo, os níveis dinâmicos se estabilizaram até o tempo de 1440 min., quando então foi finalizada a primeira etapa do teste de bombeamento. Na segunda etapa (recuperação), os níveis d'água em cada poço aumentaram até atingir valores próximos aos níveis d'água medidos no início do teste de bombeamento.

Figura (I) 9 - Gráfico rebaixamento x tempo, com indicação do rebaixamento máximo em cada poço analisado.



Fonte: Dados da pesquisa.

A evolução dos níveis dinâmicos foi observada sistematicamente nos poços SP2 e SP3. Os resultados obtidos (Figura (I) 9) mostram comportamentos semelhantes nos dois poços. O poço SP2, por estar mais distante do poço bombeado, apresentou rebaixamento máximo menor do que o poço SP3.

No período de recuperação, a variação dos níveis estáticos dos três poços foi influenciada pela recarga do próprio aquífero e da água proveniente do lago e pela época de realização do teste, durante o período chuvoso.

Richard *et al.* (2014) explicam que esse comportamento identificado durante o teste de aquífero é característico de *regime transitório*. Inicialmente, a água bombeada é proveniente do armazenamento do aquífero. Isso pode ser verificado, na (Figura (I) 8), por meio da evolução do rebaixamento da superfície freática. Após 300 min. do início do bombeamento, os rebaixamentos praticamente estabilizaram, demonstrando, com isso, que a partir deste ponto houve um aporte de recarga do aquífero para suprir a vazão bombeada.

Por meio de análise no *Aquifer Test* foram obtidos, para os três poços, os seguintes valores referentes aos parâmetros hidrodinâmicos desse aquífero:

- $T = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- $K = 5,0 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;

Os resultados dos parâmetros hidrodinâmicos foram semelhantes, em ordem de grandeza, aos encontrados por Carvalho (2013) e Paiva (2009). Esse resultado já era esperado, considerando as características do aquífero, que é freático, poroso, de alta permeabilidade. A condutividade hidráulica refere-se apenas à camada saturada do aquífero, no qual se encontram o solo com textura areia - siltosa. Para a camada não saturada nessa área de estudo, considerou-se $K = 1,77 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (LISBOA, 2006).

Para o cálculo da estimativa do Raio de influência (R_i), considerou-se $T = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $t = 86400 \text{ s}$ e $S = 10^{-1}$ (RICHARD *et al.* (2014). O valor de R_i foi igual a 44,09 m, porém esse valor pode ser alterado, variando-se a vazão e o tempo de bombeamento.

Em relação aos cinco poços de monitoramento, apenas dois poços (SP2 e SP3) encontram-se dentro do raio de influência do “POÇO”. Como há apenas um poço de

bombeamento atualmente, o sistema em estudo não sofre influência de outros poços de captação pré-existentes. Esse fato permitiu uma confiabilidade maior nos resultados hidrogeológicos obtidos na presente pesquisa.

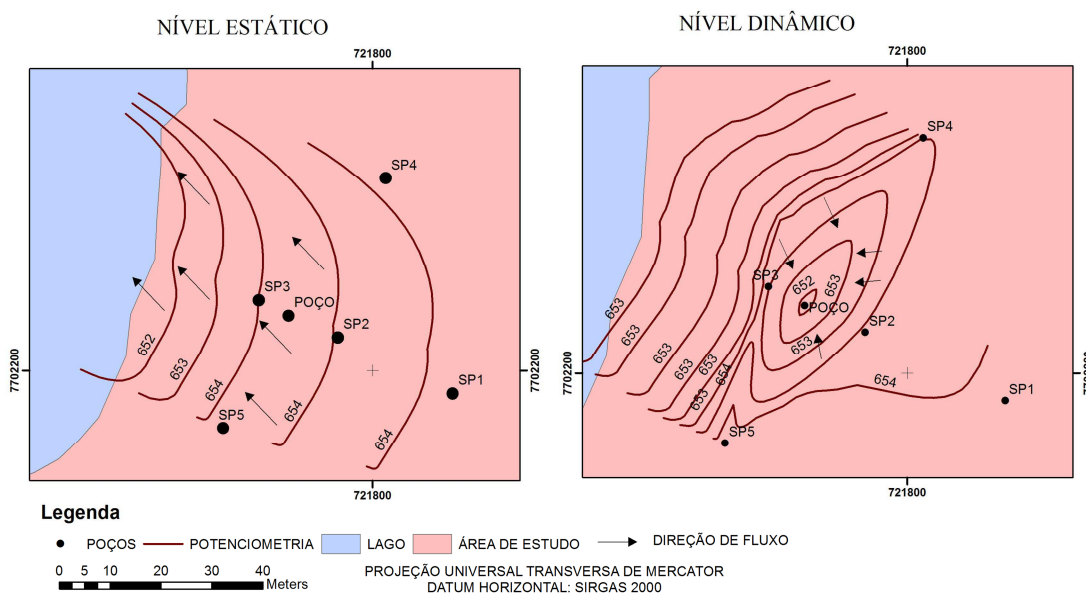
O conhecimento do raio de influência do “POÇO” de bombeamento, para um tempo de 24 h, permitiu verificar o limite do cone de rebaixamento e avaliar a interferência de outros poços dentro desse limite e no seu entorno. Com essa informação, poderá ser estabelecido um melhor gerenciamento do uso da água subterrânea na área do estudo. Por exemplo, em Minas Gerais, é obrigatório realizar-se teste de interferência para poços situados em até 200 m de poços pré-existentes. Sabendo-se o raio de influência do “POÇO”, é possível calcular, previamente, possíveis efeitos de bombeamento em novos poços sobre o nível d’água local, inclusive avaliando o efeito de soma dos rebaixamentos.

A instalação de outros poços de monitoramento traria ganhos de informação se eles fossem instalados fora do raio de influência do “POÇO”, e na porção mais elevada do terreno, permitindo uma melhor definição da recarga nesses pontos. Na presente pesquisa, não foram locados poços nas áreas com relevo elevado, o que influenciou parcialmente nos resultados do gradiente hidráulico e na precisão da recarga.

3.4 ANÁLISE POTENCIOMÉTRICA

A análise potenciométrica demonstrou a relação entre a lagoa e o aquífero. Os resultados apresentados por meio dos mapas potenciométricos referem-se à variação do nível estático (NE) e do nível dinâmico (ND) durante o ano hidrológico. Como ambos demonstram características semelhantes para todos os meses monitorados, serão apresentados apenas dois mapas (Figura (I) 10).

Figura (I) 10 - Mapa potenciométrico representativo do Nível estático e Nível dinâmico para o período observado



Fonte - Dados da pesquisa

O espaçamento entre as curvas potenciométricas indica que a influência do “POÇO” é maior para os piezômetros SP2 e SP3, como seria de se esperar, pelo fato dos dois estarem localizados mais próximos ao “POÇO”.

Verificou-se que o fluxo natural da água subterrânea se dá em direção ao lago, apresentando pequenas inflexões das linhas de mesma carga hidráulica. Eles indicam, com isso, que, antes do bombeamento, o “LAGO” recebe água do aquífero (comportamento efluente).

Nos mapas potenciométricos do nível dinâmico, as direções de fluxo indicam que a água subterrânea flui em direção ao “POÇO”. Esse resultado era esperado em função do cone de rebaixamento no momento do bombeamento, indicando a menor carga hidráulica no “POÇO” e a sua influência nos poços SP2 e SP3.

Na área de descarga do aquífero, existem valores de gradiente hidráulico, na ordem de 10^{-3} m.m^{-1} , favorecendo o armazenamento do aquífero. Esse resultado é semelhante em ordem de grandeza ao encontrado por Barbosa & Silva Jr. (2005) para o aquífero aluvionar, do município de Macaé (RJ). Nas proximidades do relevo mais elevado, onde se encontram as zonas de recarga do aquífero, não existem poços,

portanto não foi possível estimar o gradiente hidráulico nesses lugares. Logo, não foi possível obter a contribuição da recarga à montante da área.

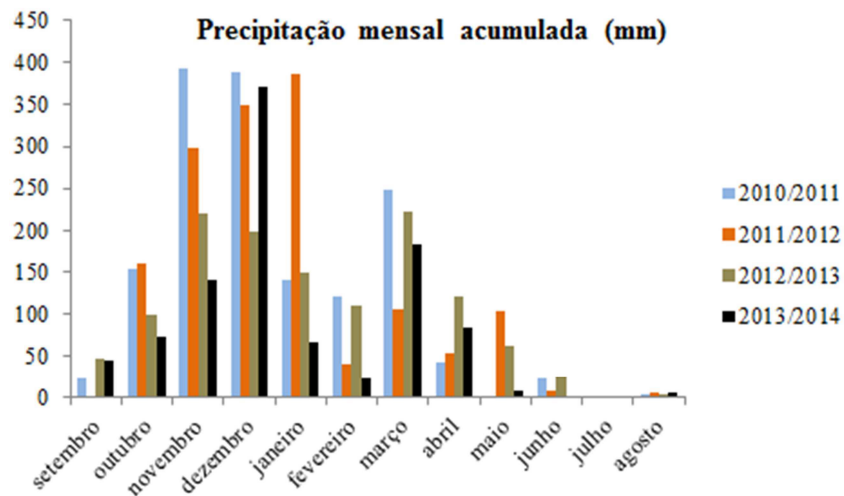
A precipitação total no ano hidrológico monitorado foi de 1006 mm (BOLETIM METEOROLÓGICO, 2013; 2014), nível inferior ao mesmo período nas séries históricas de 2010 a 2011 (1541,2 mm), 2011 a 2012 (1513,2 mm) e 2012 a 2013 (1259,3 mm) (BOLETIM METEOROLÓGICO, 2010; 2011; 2012; 2013).

As chuvas concentraram-se com mais intensidade no período de setembro de 2013 a janeiro de 2014, de forma semelhante aos anos anteriores. Houve, porém, um longo período seco de fevereiro a agosto de 2014, situação atípica e com precipitações mensais acumuladas inferiores às séries históricas de 2010 a 2013 (Figura (I) 11).

Os resultados potenciométricos demonstraram que, mesmo com a estiagem prolongada no período observado, as precipitações não comprometeram o funcionamento do “POÇO”, e os poços de monitoramento não secaram. Acredita-se que esse comportamento seja causado pela proximidade do “POÇO” ao “LAGO” que é de 35 m, que representa uma fonte de água para recarga com vazão maior do que a bombeada no poço.

Adicionalmente, o monitoramento potenciométrico permitiu uma análise do fluxo horizontal na área de estudo, podendo-se afirmar que o “LAGO” apresenta comportamento efluente sem bombeamento.

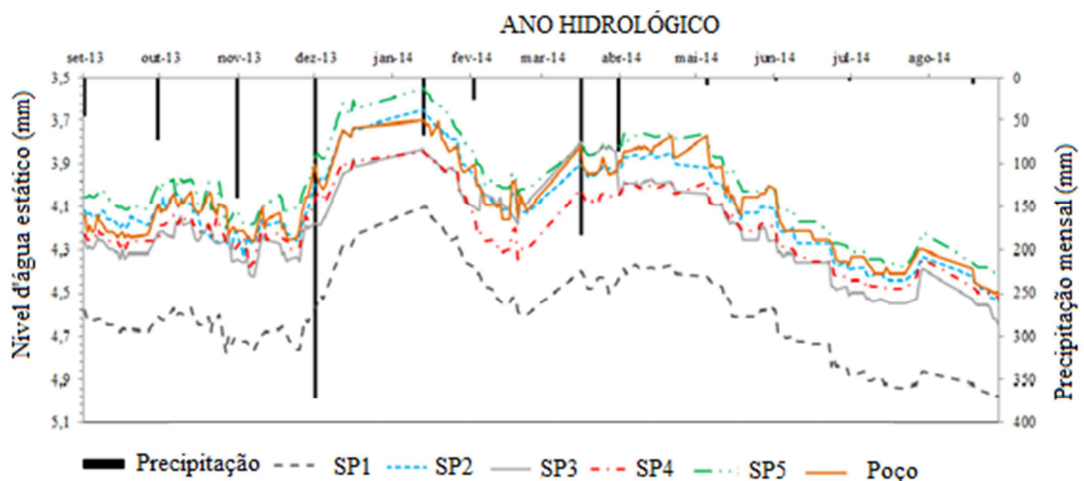
Figura (I) 11 - Comparação da Pluviometria mensal acumulada para Viçosa (MG), nos anos hidrológicos 2010/2011; 2011/2012; 2012/2013; 2013/2014.



Fonte - Dados da pesquisa

Os piezômetros analisados apresentaram uma mesma tendência de comportamento em relação ao nível da água durante o ano hidrológico, indicando, com isso, uma conexão hidráulica entre eles. O nível estático decresce ou aumenta em comparação com a variação da precipitação (Figura (I) 12).

Figura (I) 12 - Gráfico de comparação da variação do nível d'água estático nos piezômetros com a precipitação (mm) durante o ano hidrológico 2013/2014.



Fonte - Dados da pesquisa

Outro fator importante em relação à confiabilidade e à qualidade dos dados hidrogeológicos gerados nessa pesquisa foi o período de monitoramento dos poços, que contemplou tanto o período seco quanto o chuvoso. O monitoramento foi realizado

diariamente, pelo fato de que as variações do nível d'água podem influenciar nos valores dos parâmetros hidrodinâmicos. Os dados gerados indicaram que o aquífero estudado respondia rapidamente às variações sazonais.

Esse procedimento não foi identificado em outros trabalhos realizados no Brasil. Paiva (2009), por exemplo, explicou que, devido à dificuldades operacionais, o monitoramento potenciométrico, em Olinda (PE), ocorreu durante apenas 12 semanas (março, abril e maio de 2009). Em Florianópolis (SC), as pesquisas realizadas por Michelin (2010) e Mondardo (2009) não contemplaram o monitoramento potenciométrico.

Na Alemanha (SHUBERT, 2003), e, nos EUA, (Hubbs *et al.*, 2003), o monitoramento potenciométrico é realizado há anos, tanto no período seco quanto no período chuvoso. Esses autores explicam que a compreensão da interação manancial superficial/subterrâneo requer uma análise da influência da precipitação, bem como do entendimento da hidrogeologia local, por meio de um monitoramento contínuo.

3.5 ESTIMATIVA DA RECARGA PELO MÉTODO VNA

Para cada poço monitorado, considerou-se $K = 4,32 \text{ m.d}^{-1}$ e $S_y = 0,144$ (Tabela (I) 2). Com esses dados, determinou-se um valor médio para a recarga de $192,48 \text{ mm.ano}^{-1}$. Este valor representa 19,13% do total de chuvas registrado (1006 mm) para o ano hidrológico correspondente ao período de setembro de 2013 a agosto de 2014.

Tabela (I) 2 - Dados utilizados na estimativa de recarga e taxa de recarga para cada poço monitorado.

Poço	$\Sigma\Delta h$ (m)	R (mm).ano ⁻¹	r (%)
SP1	1,530	220,32	21,90
SP2	1,280	184,32	18,32
SP3	1,230	177,12	17,60
SP4	1,350	194,40	19,32
SP5	1,390	200,16	19,89
POÇO	1,240	178,56	17,75

Os maiores valores de R foram identificados nos poços SP1, SP4 e SP5. Esses pontos encontram-se distribuídos nas extremidades do sistema de FM, distantes a mais de 44,09 m (R_i) do poço e apresentaram pouca variação do nível de água durante o bombeamento. Além disso, a diferença entre o pico do hidrograma e o ponto mais baixo da curva de recessão, ou seja, os valores de Δh , ocorreram com mais frequência em resposta à precipitação e nos primeiros 5 meses de monitoramento. Nos meses seguintes, devido à estiagem, os eventos de recarga foram menores e menos frequentes. Os pontos SP2, SP3 e Poço apresentaram variações semelhantes de Δh .

Os valores estimados para a recarga pelo método VNA são específicos para o ano hidrológico em estudo e são representativos apenas para a área onde se encontra o sistema de FM (à margem da barragem da UFV). Em outros pontos da área de estudo, como nas proximidades dos divisores de água, a recarga não pôde ser analisada devido à ausência de poços.

Os valores encontrados para a recarga nessa pesquisa (entre 177,12 mm e 220,32 mm) foram próximos aos encontrados por Carvalho *et al.* (2014) (entre 218,8 mm e 254,6 mm), em poços locados às margens da hidrografia principal nessa mesma bacia. Se se considerar que no período monitorado por esses autores não houve uma estiagem tão intensa quanto no período monitorado durante a presente pesquisa, os dados obtidos estão coerentes e, portanto, para o presente estudo, o método VNA adotado mostrou-se adequado. Entretanto, para que seja melhor compreendida a representatividade espacial da recarga na área de estudo, seria necessária a locação de outros poços de monitoramento, distribuídos uniformemente em toda a microbacia. Por exemplo, a locação de poços próximos ao divisor de águas poderia aprimorar o conhecimento da carga hidráulica e da estimativa da recarga.

3.6 DETERMINAÇÃO DO TEMPO MÍNIMO DE PERCURSO DA ÁGUA DO MANANCIAL SUPERFICIAL ATÉ O POÇO E VELOCIDADE DE PASSAGEM DA ÁGUA PELO MEIO POROSO

Considerou-se os seguintes dados para utilização da equação proposta por Dillon *et al.* (2002): $D = 20$ m; $n_e = 0,20$ (MONDARDO, 2009); $L = 35$ m; $Q = 120$ m³.d⁻¹.

O tempo de percurso mínimo da água do manancial superficial até o poço é de 85,52 dias. A velocidade de passagem da água pelo meio poroso, de acordo com a equação de Darcy é de $0,41 \text{ m.d}^{-1}$. Embora a equação de Dillon *et al.* (2002) seja pouco utilizada, verificou-se que ela pode fornecer um resultado preliminar, relevante em estudos de contaminação, por exemplo. Nessa pesquisa, o tempo mínimo de percurso da água do manancial superficial até o poço foi superior a 60 dias, conforme recomendado por Dash *et al.* (2008). Esse resultado pode favorecer a redução de turbidez e a remoção de patógenos por meio do sistema de FML na área estudada.

O uso de traçadores vem sendo utilizado, dentre outros meios, como uma alternativa para determinação do tempo de percurso da água na interação da água superficial e da água subterrânea (SILVA *et al.*, 2009). Esses autores descrevem os tipos de traçadores e apresentam discussões em que o uso de traçadores forneceu resultados favoráveis em pesquisas realizadas no Brasil e no exterior. No presente estudo, não foi possível aplicar essa técnica, que fica como sugestão para estudos futuros.

4 CONCLUSÕES

Os critérios adotados na implantação desse sistema de FML permitiram definir com precisão o local mais apropriado para implantação do sistema de FML e localizar os poços. Além disso, os dados obtidos permitiram definir algumas características que, até então, eram desconhecidas para o aquífero aluvionar em estudo, tais como: profundidade do aquífero livre, material constituinte no subsolo, posição do nível d'água e vazões exploráveis.

A caracterização hidrogeológica demonstrou a viabilidade de se utilizar esse sistema de FM no conhecimento da interação lago-aquífero, pois permitiu caracterizar os principais parâmetros hidrogeológicos, tais como: transmissividade, condutividade hidráulica e armazenamento.

Além disso, o procedimento adotado permitiu avaliar a potenciométrica da área de estudo, sua variação sazonal, sua influência sobre a posição do nível de água, a recarga e a interação lago-aquífero. A potenciométrica permitiu avaliar a influência do "POÇO" de bombeamento nas curvas potenciométricas adjacentes. Em função disso, verificou-se que o cone de rebaixamento atingiu o "LAGO" no período de 24 h de bombeamento. No entanto, atualmente, o bombeamento no poço ocorre em dias alternados e num período de 3 h, não atingindo o "LAGO". Assim, o "POÇO" pode ser uma alternativa de baixo custo para suprir as necessidades de água para abastecimento, principalmente em situações emergenciais de baixa estiagem, como ocorreu nesse ano hidrológico.

O fato de ter apenas os poços do sistema de FML localizados nessa área permitiu maior confiabilidade nos dados gerados, já que se evitaram influências externas. Especificamente no estudo de recarga, haveria maior ganho de informações se outros poços existissem em pontos mais altos do relevo, o que fica como sugestão para trabalhos futuros.

O tempo de percurso é uma informação relevante no gerenciamento das águas provenientes do sistema de FML. Nessa pesquisa, optou-se pelo uso da equação de Dillon, porém essa equação vem sendo utilizada em estudos de FM para obtenção de resultados preliminares ou quando não há possibilidade de emprego de outros métodos mais precisos. Haveria uma maior confiabilidade nesse resultado se esse dado pudesse ser obtido também por outros métodos. Por exemplo, alguns autores vem utilizando os

traçadores em situações semelhantes. Provavelmente, se esse método fosse utilizado no sistema de FML, os gestores poderiam estimar melhor o tempo de percurso da água superficial até o poço. Dessa forma, também seria possível estimar melhor a velocidade de passagem da água pelo meio poroso.

Conclui-se, portanto, que esses dados podem servir como suporte no planejamento e gestão das águas subterrâneas na área estudada e de outras, com características semelhantes.

5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. Manual de Sondagens, Boletim n° 3, 4ª edição. São Paulo, 1999. 73 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6457. Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6484. Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 17p.

AUDODESK. Introdução ao AutoCAD Civil 3D Versão 2009, São Paulo, 342p, 2009.

BAKKER, M.; BARTHOLOMEUS, R. P.; FERRE, T. P. A. Groundwater recharge: processes and quantification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 17, p. 2653–2655, 2013.

BARBOSA, G. R.; SILVA JR; G. C. Potenciometria e Fluxo Subterrâneo no Aquífero Aluvionar do Baixo Curso do Rio Macaé, Município de Macaé - RJ. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 28, p. 102-105, fev, 2005.

BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2010. Mensal.

BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2011. Mensal.

BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2012. Mensal.

BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2013. Mensal.

BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2014. Mensal.

BOLETIM DE SONDAGEM. Viçosa: GEOPONTUAL, 2006.

CAPUTTI, E.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K. L., MONSORES, A. L. M. **Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas**. SEMADS, SEINPE, DRM, Rio de Janeiro, RJ, 70 p. 2001.

CARVALHO, V. E. C. **Modelagem hidrogeológica de uma sub-bacia hidrográfica da Zona da Mata de Minas Gerais**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

CARVALHO, V. E. C.; REZENDE, K. S.; PAES, B. S. T.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G. Estimativa da Recarga em uma Sub-bacia Hidrográfica Rural através do

Método da Variação do Nível D'Água (VNA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n.1, p. 271-280, jan/mar. 2014.

CPRM. **Programa Ações Emergenciais de Combate aos efeitos da seca. Execução de testes de bombeamento em poços tubulares, Manual Prático de Orientação**. Recife, PE, 1998, 24p.

DAKER, A. **Captação, Elevação e Melhoramento da Água; A água na agricultura**. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983, 408p.

DASH, R. R.; MEHROTRA, I.; KUMAR, P.; GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. **Hydrogeology Journal**, v. 16, p.1089–1099, 2008.

DEMÉTRIO, J. G. A.; PAIVA, A. L. R.; FREITAS, D. A.; BATISTA, A. G. S.; CABRAL, J. J. S. P. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de Caixa d'água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**, v. 27, p.111-126, 2013.

DILLON, P. J.; MILLER, M.; FALLOWFIELD, H.; HUTSON, J. The potential of riverbank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers. *Journal of Hydrology*, v.266, n.3-4, p.209-221, 2002.

DUARTE, L. N. **Avaliação do comportamento solo-estrutura de elementos de fundação tipo sapata estacada**. 2012. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

EBARA, Manual de Instalação e Termo de garantia. Bauru, SP, 2013. 16p.

ESRI. ArcGIS Desktop: Versão 10. Redlands, CA - USA: Environmental Systems Research Institute. 545p, 2010.

FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, A. P. Levantamento batimétrico automatizado aplicado à Gestão de Recursos Hídricos. Estudo de caso: represamento do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 1- 8, 2012.

GEBERT, W. A.; WALKER, J. F.; HUNT, R. J. Groundwater recharge in Wisconsin—Annual estimates for 1970–99 using streamflow data: **U.S. Geological Survey Fact Sheet** 2009–3092, 4 p., 2011.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, p. 91 – 109, 2002.

HUBBS, S.; BALL, K.; HASS, D. L.; ROBISON, M. J. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-water quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.49–60, 2003.

HUNT, H.; SCHUBERT, J.; RAY, C. Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-water quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, 2003, p.19–28.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro guelph e ensaios de laboratório.** 2006. 89p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

MALAMA, B.; KUHLMAN, K. L.; BARRASH, W.; CARDIFF, M.; THOMA, M. Modeling slug tests in unconfined aquifer taking into account water table kinematics, wellbore skin and inertial effects. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 408, p. 113-126, 2011.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade Espacial da Recarga em Área Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n.3, p. 35-46, jul/set. 2008.

MICHELAN, D. C. G. S. **Filtração em margem de rio precedendo a filtração lenta, para remoção de carbofurano, em tratamento de água para consumo humano.** 2010. 342p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas.** 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

NIENDE, J.; G, V.T.; VERMEULEN, D. Application of Isotopes and Recharge Analysis in Investigating Surface Water and Groundwater in Fractured Aquifer under Influence of Climate Variability. **Earth Science & Climate Change**, v. 4. n. 4, p.1-14, 2013.

PAIVA, A. L. R. **O Processo Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe, Tese de doutorado.** 2009. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

POEHLS D. J.; SMITH, G. J. *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology.* Editora Academic Press. 527 p. 2009.

RAY, C. Worldwide potential of riverbank filtration. **Clean Technology Environmental Policy**, v.10, p. 223–225, 2008.

RAY, C.; SCHUBERT, J.; LINSKY, R. B.; MELIN, G. Introduction. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-water quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.1–15, 2003.

RAY, C.; JASPERSE, J.; GRISCHEK, T. Bank Filtration as Natural Filtration. In: RAY, C. JAIN, R. (Org.) **Drinking Water Treatment**, New York: Springer, p. 93 – 158, 2011.

RICHARD, S.K.; CHESNAUX, R.; ROULEAU, A.; COUPE, R. H. Estimating the reliability of aquifer transmissivity values obtained from specific capacity tests: examples from the Saguenay-Lac-Saint-Jean aquifers, Canada. **Hydrological Sciences Journal**, London, v. 1, p. 1-77, set/2014.

RÖHRICH, T. AquiferTest. Demo tutorial, Advanced Pumping Test & Slug Test Analysis Software. Versão 4.0. Ontário – Canadá. Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2005.44p.

SABIONI, G. S.; ALVARENGA, S. C. **UFV: oito décadas em fotos**. Viçosa: Ed. UFV, 84p, 2006.

SENS, M.L.; DALSSASSO, R.L.; MONDARDO, R.I.; MELO FILHO, L.C. (2006). Filtração em margem. In: Pádua, V.L. (coord). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES- PROSAB 4, 173-236p.

SHUBERT, J. German Experience with Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-water quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.35–48, 2003.

SHANKAR V.; ECKERT, P.; OJHA, C.; KÖNIG, C. M. Transient three-dimensional modeling of riverbank filtration at Grind well field, Germany. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 321–326, 2009.

SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. **Revista Química Nova**, v. 32, n. 6, p.1576-1585, 2009.

SOARES, J. F.; RODRIGUES, V. A. J. **Filtração em Margem - Estudos Preliminares para o Sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Viçosa**. 2006. 46p. Monografia (Departamento de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p.52-67, 2002.

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE FLUXO ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO

1 INTRODUÇÃO

A modelagem hidrogeológica em estudos sobre Filtração em Margem (FM) é um instrumento de apoio no planejamento dos recursos hídricos subterrâneos, pois permite as simulações do comportamento dos aquíferos diante da dinâmica da área de estudo. A modelagem apresentou resultados favoráveis em pesquisas sobre FM realizadas no Brasil (DEMÉTRIO *et al.*, 2013; PAIVA *et al.*, 2013) e no exterior (RAY *et al.*, 2003; SHUBERT, 2003).

A modelagem hidrogeológica pode ser realizada por meio de modelos computacionais numéricos, que exigem um conhecimento preciso dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero, tais como condutividade hidráulica, armazenamento e recarga (BRUNNER *et al.*, 2010); e um bom modelo conceitual, que permita saber quais as camadas e suas características geológicas e geométricas (textura, espessura, profundidade, tipo de aquífero etc.), que ocorrem na área em estudo. Os modelos matemáticos usam equações para simular o fluxo e o transporte de solutos nas águas subterrâneas (BONGANHA *et al.*, 2007).

Diversos autores (CARVALHO, 2013; DEMÉTRIO *et al.*, 2013; FERRARI, 2006) realizaram modelagens hidrogeológicas por meio do software Visual MODFLOW®. Esse software utiliza o método das diferenças finitas e possibilita o estudo de fluxos subterrâneos (hídricos e/ou de contaminantes) através de modelos de duas ou três dimensões, representando as condições reais do sistema.

A modelagem pode ser realizada para prever as respostas do aquífero a determinadas ações, ou para interpretar o funcionamento do aquífero (YANG *et al.*, 2011). Ela é uma simplificação do sistema real existente (BATU, 2006) e considera o *fluxo estacionário* no qual o nível d'água é constante no tempo ou o *fluxo transiente* no qual o nível d'água muda com o tempo (SHANKAR *et al.*, 2009).

Vários países vêm utilizando os sistemas de Filtração em Margem, dos quais destaca-se a Alemanha como um dos países pioneiros na utilização desses sistemas há mais de 100 anos (RAY *et al.*, 2003). Entretanto, estudos que envolvem modelagem hidrogeológicas para sistemas de Filtração em Margem são recentes tanto no Brasil (PAIVA *et al.*, 2013), quanto no exterior (SHANKAR, 2009). Especificamente, a modelagem numérica em sistema de Filtração em Margem de Lago (FML) no Brasil, até então não havia sido realizada. Em Viçosa (MG), Carvalho *et al.* (2014) desenvolveram um estudo de modelagem hidrogeológica em uma microbacia localizada no entorno do campus da UFV. No ano de 2013, foi implantado um sistema de FML no campus da UFV, porém estudos de modelagem hidrogeológica, até então, eram inexistentes para a região de estudo dessa pesquisa.

Para Viçosa (MG), tem-se a premissa de que por meio do estudo de modelagem tridimensional de fluxo estacionário e transiente é possível conhecer o comportamento do aquífero e simular o fluxo subterrâneo no sistema de FML diante da variação do bombeamento, em períodos diferenciados.

Essa pesquisa foi realizada com o objetivo de elaborar o modelo numérico tridimensional de fluxo estacionário e transiente com finalidades:

- ***interpretativa***, para compreender o comportamento do fluxo de água subterrânea na área de estudo e;
- ***preditiva***, para avaliar, por meio da simulação de cenários nos períodos de: 1, 5 e 10 anos, as variações do fluxo de água subterrânea diante das variações de bombeamento no estado transiente. Considerou-se os cenários para 1 e 2 poços de bombeamento.

Os resultados demonstraram o potencial do sistema de FML e como esse pode ser utilizado como uma alternativa para o campus da UFV. Os cenários apresentados podem auxiliar a gestão das águas subterrâneas nessa área de estudo

2 MATERIAIS E MÉTODO

No desenvolvimento do modelo conceitual, considerou-se para o aquífero freático as informações apresentadas no Quadro (II) 1.

Quadro (II) 1 - Dados utilizados na caracterização do sistema natural.

Dado	Fonte
Boletim de sondagem	Pontos: SPA (DUARTE, 2012); SPB (SOARES & RODRIGUES, 2006); SPC (BOLETIM DE SONDAGEM, 2006)
Topografia	Levantamento topográfico, realizado pelos alunos do curso de Engenharia de Agrimensura sob orientação do Prof. Dr. Joel Gripp Junior. Curvas de nível com equidistância vertical igual a 0,20 m, Escala: 1:500
Batimetria	Ferreira <i>et al.</i> , (2012), Escala 1:500
Precipitação	(BOLETIM METEOROLÓGICO, 2013; 2014)
Evapotranspiração	Balanço Hídrico.
Solos	Classificação granulométrica, capítulo 1,
Potenciometria	Dados provenientes do monitoramento potenciométrico, capítulo 2
Recarga	Estimativa da recarga pelo método VNA, capítulo 2.
Parâmetros hidrodinâmicos	Condutividade hidráulica, capítulo 2; porosidade total e efetiva (MONDARDO, 2009), armazenamento (CARVALHO, 2013)

O modelo numérico foi elaborado por meio do Visual MODFLOW® versão Pro 2009.1 (VISUAL MODFLOW, 2009).

Para a construção do modelo numérico que representasse o sistema real, de fluxo de água subterrânea, adotaram-se os seguintes procedimentos:

- Definição do objetivo da modelagem computacional;
- Elaboração do modelo conceitual, envolvendo o levantamento e interpretação de dados referentes ao sistema real;
- Seleção do código computacional;
- Tradução do modelo conceitual para a linguagem matemática;
- Calibração e validação do modelo numérico;
- Realização da análise de sensibilidade e simulação de cenários variando as condições de bombeamento para o período estacionário e transiente.

2.1 CONDIÇÃO DE SIMULAÇÃO

Consideraram-se os mesmos dados de entrada do modelo conceitual tanto para o modelo tridimensional de fluxo estacionário quanto para o modelo tridimensional transiente, bem como a discretização espacial e as condições de contorno. Na definição dos períodos de simulação consideraram-se os dados do monitoramento potenciométrico.

No modelo estacionário, considerou-se um período de 01 de julho de 2014 a 29 de agosto de 2014 (PE). Durante ele, as cargas hidráulicas medidas na área apresentaram poucas variações e o desvio padrão em cada poço foi de aproximadamente igual a 3 cm.

No modelo transiente, caracterizado pelas variações bruscas de nível d'água, considerou-se o período de simulação de 06 a 16 de dezembro de 2013. Batu (2006) e Ferrari (2006) explicam que, no modelo transiente, deve ser inserida a Carga Inicial (HI) no tempo t_0 (primeiro dia de simulação) como condição inicial de simulação. Considerou-se, portanto no período PT, $HI = 654,270$ m.

2.2 DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo modelada foi discretizada por uma grade formada por linhas, colunas e camadas, definindo o domínio do modelo. No Visual MODFLOW® a área discretizada foi representada por meio das *células ativas*.

Após a discretização da área, realizou-se a importação dos dados topográficos e a sua interpolação por meio do método do inverso da distância. O domínio modelado foi separado em duas camadas (layers), com 4 m e 20 m de profundidade, respectivamente. Outras tentativas foram testadas, tais como a consideração de três camadas, porém os melhores resultados para a modelagem apontaram o domínio do modelo separado em duas camadas. O que está em concordância com os dados coletados nas sondagens e com o modelo hidrogeológico conceitual elaborado e mostrado anteriormente.

2.3 PARÂMETROS DE ENTRADA

Considerou-se cada camada como homogênea e, inicialmente, isotrópica nos eixos X e Y. No eixo Z, a condutividade foi considerada como sendo 10 vezes menor do que a condutividade dos outros eixos, conforme Harbaugh *et al.* (2000). No modelo, foram definidas 2 zonas de condutividade hidráulica distintas (Tabela (II) 1).

Tabela (II) 1 - Valores de condutividade hidráulica utilizadas inicialmente no modelo estacionário

Camada matemática	Descrição	Zona	Kx (m.s ⁻¹)	Ky (m.s ⁻¹)	Kz (m.s ⁻¹)
Camada 1	Solo com textura silte argilo-arenoso	Zona 1	1,77 x10 ⁻⁶	1,77 x10 ⁻⁶	1,77 x10 ⁻⁷
Camada 2	Solo com textura areia-siltosa	Zona 2	5,0 x10 ⁻⁵	5,0 x10 ⁻⁵	5,0 x10 ⁻⁶

Fonte – Dados da pesquisa

As vazões explotáveis variaram no período simulado, entre 5 m³.h⁻¹ a 6 m³.h⁻¹. Considerou-se a evapotranspiração igual a 874,5 mm. A recarga variou de 177,120 mm.ano⁻¹ a 220,320 mm.ano⁻¹, tendo sido considerada uma recarga média de 192,49 mm.ano⁻¹.

2.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Consideraram-se duas condições do contorno: a condição de Neumann (Tipo II) para o divisor topográfico e a condição mista (Tipo III) para o “LAGO” (CARVALHO FILHO & COTA, 2002).

No primeiro caso, considerou-se o divisor topográfico coincidente com os divisores de água subterrâneo, portanto, definiu-se um fluxo subterrâneo nulo nas células em que o limite foi traçado. Esta condição foi inserida no Visual MODFLOW® por meio das *células inativas* que circundam o domínio modelado.

No segundo caso, considerou-se que o fluxo é dependente da carga. Testaram-se os módulos: GHB, RIVER e DREN. Porém para essa condição de fluxo dependente da carga, a mesma foi desenvolvida por meio do módulo **RIVER** no Visual MODFLOW®. O módulo *RIVER* simula o fluxo de água entre águas superficiais e o aquífero, nas

células do domínio em que esta condição de contorno foi atribuída (CARVALHO FILHO & COTA, 2002).

Para a utilização do módulo *River* foi necessário informar para cada célula a cota da superfície e do leito do “LAGO” e a condutância ($cond_{lago}$). A condutância descreve o grau de conectividade entre o contorno e a célula do domínio em que esta condição de contorno foi atribuída (Equação 1) (HARBAUGH *et al.*, 2000).

$$Cond_{Lago} = \frac{KWL}{E} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

K = condutividade hidráulica do material que compõe o leito do rio/lago [$L.T^{-1}$];

L = comprimento do rio/lago na célula no qual a condutância está sendo calculada [L];

W = largura do rio/lago [L];

E = espessura do leito do rio/lago [L].

2.5 PROCESSAMENTO DO MODELO

O método numérico para resolver o sistema de equações lineares gerado pela discretização espacial da equação de água subterrânea na área foi o WHS (*Waterloo Hydrogeologic Solver*), um dos quatro métodos existentes no programa Visual MODFLOW®. Os parâmetros empregados foram os adotados pelo fabricante com 200 iterações e critério residual de 0,01.

2.6 CALIBRAÇÃO

Na calibração, considerou-se a avaliação do desvio padrão normalizado (*Normalized RMS*). Alguns autores recomendam que para se obter um modelo bem calibrado é necessário que este parâmetro seja inferior a 10 % (CARVALHO, 2013; FERRARI, 2006, PAIVA *et al.*, 2013) (Equação 2).

$$\text{Normalized RMS} = \frac{\text{RMS}}{(h_{\text{obs}})_{\text{máx}} - (h_{\text{obs}})_{\text{mín}}} \cdot 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

RMS = desvio padrão [L];

$h_{\text{obsmáx}}$ = carga hidráulica observada máxima [L];

h_{obsmin} = Carga hidráulica observada mínima [L].

A calibração foi realizada com base no valor médio das medidas do nível d'água para os 6 poços implantados (SP1, SP2, SP3, SP4, SP5 e POÇO) e 3 pontos de sondagens (SPA, SPB e SPC) (Tabela (II) 2).

Tabela (II) 2 Cargas hidráulicas (m) médias dos pontos utilizados na calibração e validação do modelo, nos períodos PE, PT1 e PT2.

Ponto	N(m)	E(m)	PE	PT
SP1	7702194,523	721819,224	654,32	654,680
SP2	7702207,993	721791,685	654,262	654,712
SP3	7702216,933	721772,670	654,260	654,446
SP4	7702246,221	721803,116	653,803	654,163
SP5	7702186,195	721764,174	654,456	654,936
POÇO	7702213,199	721779,842	654,034	654,594
SPA	7702268,053	721692,212	655	656,300
SPB	7702254,493	721758,689	650	653,300
SPC	7702262,431	721786,139	653,5	653,300

PE = Período estacionário; PT = Período Transiente.

Fonte – Dados da pesquisa

Utilizou-se o módulo WinPest, o qual está acoplado ao Visual MODFLOW® e o método de tentativa e erro, alterando as variáveis condutividade hidráulica e recarga.

2.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CENÁRIOS

Na análise de sensibilidade do modelo, consideraram-se os valores calibrados e alteraram-se os parâmetros condutividade hidráulica e recarga, verificando-se a influência desses parâmetros no mesmo. Na simulação de cenários, foram utilizados dados de profundidades, filtros, níveis estáticos e vazões bombeadas diariamente durante os períodos transientes de 1, 5 e 10 anos.

2.8 BALANÇO HÍDRICO

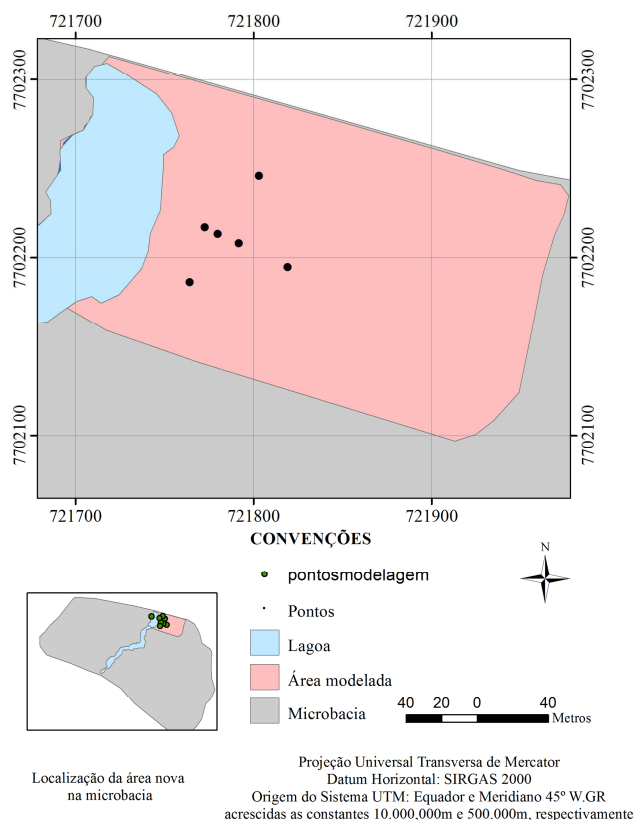
O balanço hídrico foi realizado por meio do método de Thornthwaite & Mather (MYRONIDIS & EMMANOULOUUDIS, 2008), no qual se consideraram os dados de precipitação (BOLETIM, 2013; 2014)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO CONCEITUAL

A modelagem foi realizada para uma área de 0,04 km², no qual se concentram os 6 poços implantados no sistema de FML e 3 pontos de sondagens (Figura (II) 1).

Figura (II) 1 - Mapa de localização da área modelada.



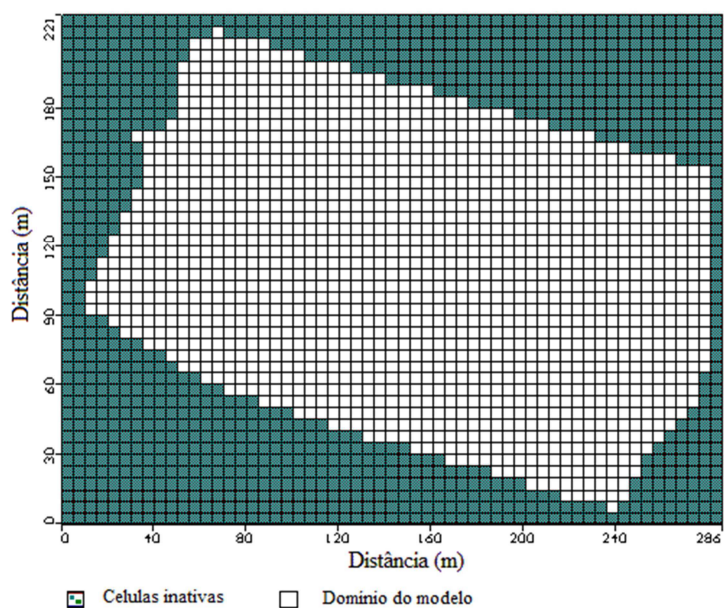
Fonte – Dados da pesquisa.

O modelo hidrogeológico conceitual, contendo a geologia, as camadas consideradas, suas espessuras e condutividades hidráulicas foram apresentados no Capítulo 1. Considerou-se os parâmetros hidrodinâmicos $S_s = 1,0 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$, $S_y = 0,144$, porosidade efetiva = 0,20 (MONDARDO, 2009), e porosidade total = 0,52 (BETIM, 2013).

3.2 DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

A área (0,37 km²) foi discretizada de modo uniforme em células de 5 m de largura por 5 m de comprimento, definindo uma área de 25 m² para cada bloco. A malha (grid) para o cenário do modelo matemático da área de estudo foi constituída por 44 linhas e 57 colunas (Figura (II) 2).

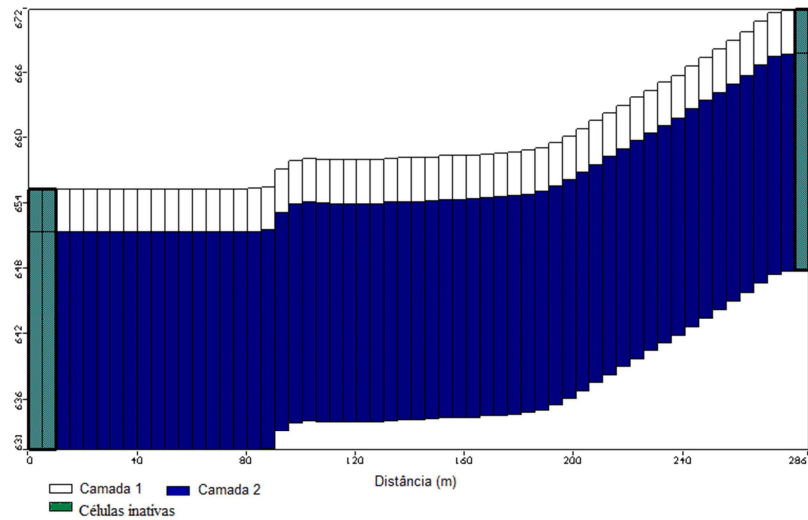
Figura (II) 2 - Discretização da área, identificando células inativas e domínio do modelo



Fonte – Dados da pesquisa

O domínio modelado foi separado em duas camadas (layers), com 4 m e 20 m de profundidade respectivamente, representando as duas zonas com diferentes valores de condutividade hidráulica, recarga e armazenamento (Figura (II) 3).

Figura (II) 3– Seção vertical apresentando as camadas da modelagem matemática

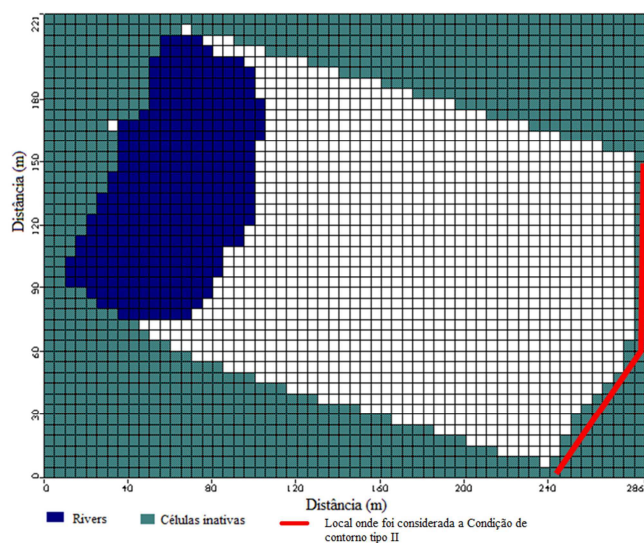


Fonte - Dados da pesquisa

3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A condição de Neumann (Tipo II) para o divisor topográfico é representada no modelo por meio das *células inativas* que circundam o domínio modelado e a condição mista (Tipo III) para o “LAGO” é representada por meio do módulo *RIVER*, no qual se considerou para o desenvolvimento da Equação 2, ($cond_{lago}$), $K= 1,77 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$; $W = 45 \text{ m}$; $L = 5 \text{ m}$; $E= 4 \text{ m}$. Assim, $cond_{lago} = 8,60 \text{ m}^2.\text{d}^{-1}$ (Figura (II) 4).

Figura (II) 4 - Representação das condições de contorno.



Fonte - Dados da pesquisa

3.4 CALIBRAÇÃO

Compararam-se as cargas hidráulicas nos poços de observações com as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo estacionário criado. Inicialmente, obteve-se um *Normalized RMS* = 30%.

Diante desse resultado, buscou-se: modificar os valores das cargas hidráulicas de acordo com a variação do tempo de simulação, alterar o valor da recarga e inserir outros poços (poços testes) na área de estudo. Os poços testes foram inseridos nos pontos mais altos da área de estudo. Consideraram-se para esses poços as cargas hidráulicas obtidas no trabalho de Carvalho *et al.* (2014). Essas cargas hidráulicas são maiores do que as cargas hidráulicas dos poços existentes no sistema de FM. Adotou-se esse procedimento porque o trabalho de Carvalho *et al.* (2014) foi desenvolvido em uma microbacia no entorno dessa área de estudo e que apresenta características hidrogeológicas semelhantes. Esse procedimento permitiu verificar que o aumento do valor da diferença entre as cargas hidráulicas observadas máximas e mínimas provocou a diminuição do *Normalized RMS* para 20%. À medida que outros poços foram inseridos, percebeu-se que o *Normalized RMS* diminuía. Esse procedimento foi adotado como uma tentativa de melhorar a calibração e diminuir o valor do *Normalized RMS*. Entretanto, essa não é

a situação identificada no modelo conceitual. Logo, os poços testes não foram considerados na modelagem final.

Após o processamento do modelo, procedeu-se com a calibração, por meio de tentativa e erro, alternando os parâmetros: armazenamento, recarga e condutividade hidráulica. Na iteração consideraram-se as variações da condutividade hidráulica nas direções X, Y e Z, nas duas camadas. O processo de calibração foi desenvolvido até que os valores de Normalized RMS não mais se alterassem expressivamente. Em todos os ensaios processados, o modelo convergiu com menos de 25 iterações, demonstrando com isso a estabilidade do modelo e a confiabilidade nos resultados. Após o processamento do modelo estacionário, obteve-se um *Normalized RMS* = 28,108%. Os resultados obtidos na calibração, para a condutividade hidráulica, encontram-se na (Tabela (II) 3).

Tabela (II) 3 - Condutividades hidráulicas obtidas na calibração do modelo estacionário por meio do módulo Winpest.

Camada	Kx (m.s⁻¹)	Ky (m.s⁻¹)	Kz (m.s⁻¹)
Camada 1	1,17 x10 ⁻⁶	1,77 x10 ⁻⁶	1,83 x10 ⁻⁷
Camada 2	5,0 x10 ⁻⁶	5,0 x10 ⁻⁵	5,0 x10 ⁻⁶

Fonte - Dados da pesquisa

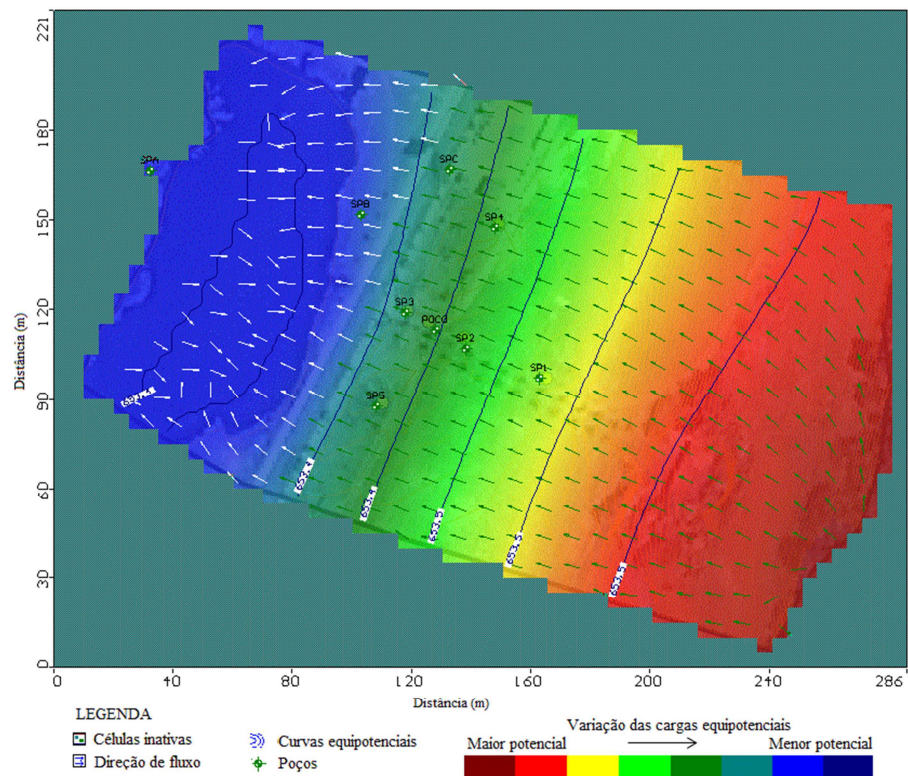
Os valores gerados pelo modelo estacionário demonstraram um material transversalmente isotrópico em cada camada. O modelo mostrou maior sensibilidade na condutividade horizontal (Kx) nas duas camadas, demonstrando, com isso, que as cargas observadas no interior do volume modelado são controladas predominantemente pelo fluxo horizontal entre o contorno e o volume modelado. Carvalho (2013) e Ferrari (2006) também encontraram, por meio de modelagem de fluxo estacionário, valores de condutividade hidráulica nessa mesma ordem de grandeza para aquíferos porosos.

Não houve variação no valor da recarga após a calibração para o período simulado. Isso se deu porque a recarga depende das variações de precipitação. Nesse período simulado, a precipitação foi considerada baixa para Viçosa (MG), com valor

igual a 2,2 mm, portanto, o modelo não apresentou variações para a recarga e o armazenamento (Figura (II) 5).

O modelo estacionário foi criado com base nos dados do período de baixa estiagem na área de estudo. Verificou-se que, mesmo com essa situação, o aquífero freático apresentou água na camada 2 (zona de captação dos poços). Em campo, verificou-se que os poços implantados não secaram nesse período. Esse resultado corrobora as informações mostradas no capítulo 1, validando com isso a calibração desse modelo.

Figura (II) 5 - Representação do modelo estacionário na camada 2.



Fonte - Dados da pesquisa

No período estacionário (correspondente ao período de estiagem), os poços não secaram, situação comprovada em campo (Figura (II) 6). O lago apresentou níveis de água muito baixos para a estação seca, comprometendo o fornecimento de água para o campo experimental Diogo Alves de Mello. Durante esse período, a água bombeada no sistema de FML foi utilizada como uma alternativa para suprir a falta de água nos experimentos localizados no campo experimental (Figura (II) 7).

Figura (II) 6- Registro fotográfico dos baixos níveis de água no “LAGO” da UFV no período de estiagem.



Fonte - Dados da pesquisa

Figura (II) 7- Registro fotográfico dos experimentos irrigados com água do “POÇO”.



Fonte - Dados da pesquisa

No modelo transiente, obteve-se, inicialmente, $Normalized\ RMS = 26,84\%$. Como no modelo estacionário, o $Normalized\ RMS$ também não foi inferior a 10% . Apesar de não terem sido obtidos os índices ideais, o resultado foi considerado admissível devido à semelhança ao sistema aquífero modelado.

Após o processamento do modelo transiente, procedeu-se com a calibração, por meio de tentativa e erro, alternando os parâmetros: armazenamento, recarga e condutividade hidráulica. O armazenamento não se alterou após a calibração.

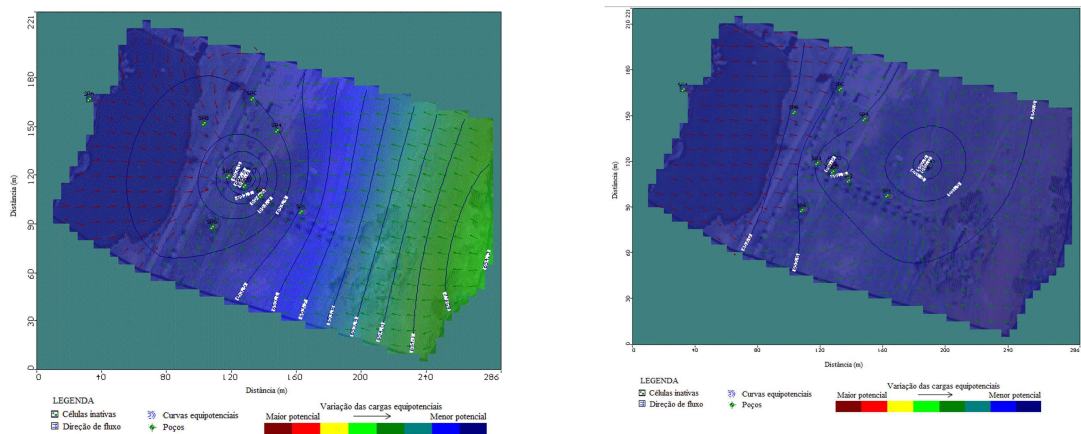
Entretanto, a recarga influenciou diretamente nos resultados apresentados. Isso já era esperado, pois o aquífero freático responde rapidamente às variações sazonais e o fluxo transiente varia com o tempo, portando houve uma variação de recarga considerável na área de estudo.

Os dois modelos gerados demonstraram, por meio dos padrões potenciométricos, que o fluxo horizontal natural se dá em direção ao “LAGO”, em ambas as situações. Portanto, os padrões potenciométrico são controlados, antes do bombeamento, pelas condições de contorno do modelo e pela condutividade hidráulica horizontal.

3.5 CENÁRIOS

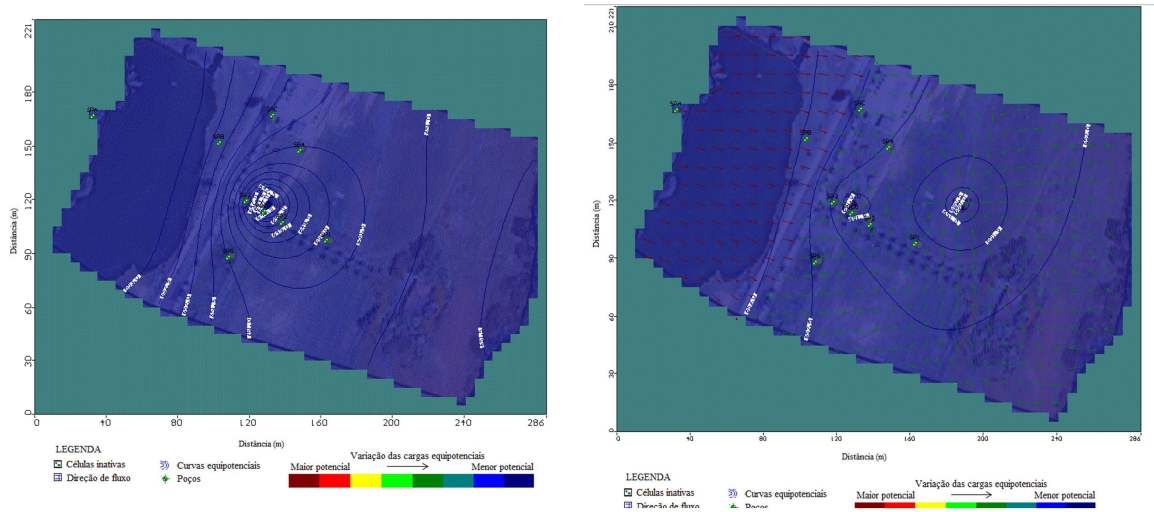
As Figuras (II) 8, Figura (II) 9 e Figura (II) 10 demonstram, respectivamente, as simulações apresentadas para 1 e 2 poços de bombeamento para os períodos de 1, 5 e 10 anos.

Figura (II) 8 – Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 1 ano.



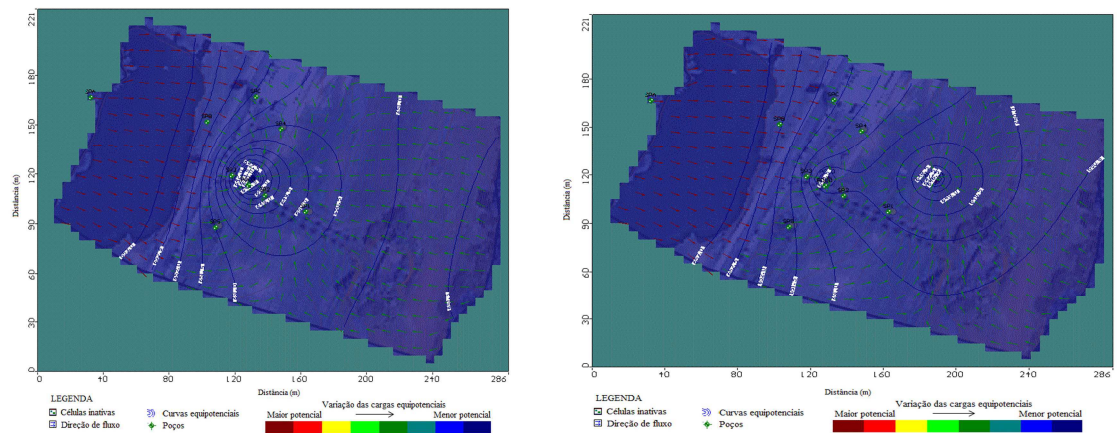
Fonte - Dados da pesquisa

Figura (II) 9 - Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 5 anos.



Fonte - Dados da pesquisa

Figura (II) 10 - Representação da simulação do modelo transiente para o bombeamento de um poço e dois poços, simultaneamente, para o período de 10 anos.



Fonte - Dados da pesquisa

Ao realizar a análise dos cenários gerados em regime transiente, observou-se a influência do “POÇO” nas curvas equipotenciais adjacentes, comprometendo localmente o fluxo de água que fluiria para o “LAGO”. O Poço 2 encontra-se na área de recarga do aquífero freático e exerce maior influência no fluxo subterrâneo do que o Poço 1.

O modelo indicou que, no período de 1 e 10 anos, as vazões explotáveis podem variar até $38 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Esse dado demonstra, portanto, uma variação bastante expressiva. No período de simulação de 5 anos, as vazões explotáveis podem variar até $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Entretanto, na situação atual, a bomba existente tem capacidade para vazões variando de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. O resultado gerado pelo modelo transiente mostra que, para as condições hidrogeológicas apresentadas na simulação, foi possível explorar vazões maiores do que a capacidade da bomba utilizada atualmente. Acima desses valores explotáveis, o modelo apresentou Normalized RMS maior do que 48% e os poços secaram.

3.6 BALANÇO HÍDRICO

Os resultados referentes ao cálculo do balanço hídrico da microbacia pelo método de Thornthwaite & Mather, para o ano hidrológico, são apresentados na Tabela (II) 4:

Tabela (II) 4 - Cálculo do balanço hídrico por meio do método de Thornthwaite-Mather.

Mês/Ano	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF mm	EXC mm
Set/13	44,90	65,54	65,50	0,04	0,00
Out/13	72,80	69,77	69,77	0,00	0,00
Nov/13	140,50	80,93	80,93	0,00	42,00
Dez/13	371,10	98,71	98,71	0,00	272,39
Jan/14	67,20	108,70	101,17	7,53	0,00
Fev/14	23,80	96,68	57,98	38,70	0,00
Mar/14	182,80	86,74	86,74	0,00	9,32
Abr/14	84,40	75,79	75,79	0,00	8,61
Mai/14	8,40	52,65	44,19	8,46	0,00
Jun/14	2,20	47,76	25,72	22,04	0,00
Jul/14	1,00	44,06	15,22	28,84	0,00
Ago/14	6,90	47,20	12,67	34,53	0,00
Total	1006,00	874,5	734,40	140,15	332,31

P = Precipitação mensal; ETP = Evapotranspiração Potencial; ETR= Evapotranspiração Real; DEF= Déficit hídrico; EXC = Excedente hídrico.

Verificou-se que o excedente hídrico total e o déficit hídrico total corresponderam a, respectivamente, 33,03% e 13,93% da precipitação total (1006 mm) do ano monitorado. Os maiores valores para o excedente hídrico foram obtidos nos primeiros 4 meses, período em que se concentraram as maiores precipitações. Após esse período, com o início da estiagem, os excedentes hídricos foram verificados apenas nos meses de março e abril de 2014. Nos outros meses, ocorreram pequenos valores de déficit hídrico.

4 CONCLUSÕES

Tanto o modelo estacionário quanto o modelo transiente mostraram boa adesão ao modelo conceitual, embora o *Normalized RMS* não tenha se aproximado do valor ideal de 10%. De forma qualitativa, os modelos simulados mostraram excelente convergência com os dados coletados em campo, em especial, o comportamento do aquífero e a coerência do fluxo na direção do “LAGO”. Na forma preditiva, os modelos permitiram avaliar a utilização do sistema de FML nesses períodos e verificar as possíveis vazões explotáveis na área de estudo.

Os resultados mostraram que a recarga teve maior influência no modelo transiente. Esse fato já era esperado, tendo em vista as variações bruscas de nível d'água, características desse modelo.

Os padrões potenciométricos são controlados pelas condições de contorno. Nesse caso, outros módulos foram testados no Visual MODFLOW®, porém o módulo *RIVER* se mostrou mais adequado para o sistema de FML, favorecendo o processamento do modelo.

Em todos os cenários, os modelos demonstraram que a água do “LAGO” é induzida para o “POÇO”. Não foi possível, entretanto, determinar em que proporções isso ocorre. Portanto, o fluxo subterrâneo também é controlado pela vazão especificada. Os poços de bombeamento mostraram influência nas cargas potenciométricas e no fluxo horizontal do lago. Isso demonstra que os dados obtidos por meio da implantação e caracterização hidrogeológica do sistema de FML favoreceram a construção de um modelo que representasse a situação real da área de estudo.

Por meio desse estudo, verificou-se que a modelagem pode ser um instrumento de apoio aos gestores de recursos hídricos na utilização do sistema de FML, em bacias hidrográficas com características físicas semelhantes. Recomenda-se a continuidade desse estudo com a implantação de outros poços nos pontos mais altos do relevo com o objetivo de aprimorar os dados que mais influenciaram na calibração dos modelos.

5 REFERÊNCIAS

- BATU, V. Applied flow and solute transport modeling in aquifers: Fundamental Principles and Analytical and Numerical Methods. New York: Taylor & Francis Group, p.1–698, 2006.
- BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital — Viçosa (MG)**. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- BOLETIM DE SONDAGEM. Viçosa: GEOPONTUAL, 2006.
- BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2013. Mensal.
- BOLETIM METEOROLÓGICO. Viçosa: UFV, 2014. Mensal.
- BONGANHA, C. A.; GUIGUER JR.; N., PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. C., RIBEIRO. M. L. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. **Revista Analytica**, n. 3, p.116-120, 2007.
- BRUNNER, P.; SIMMONS, C. T.; COOK, P. G.; THERRIEN, R. Modeling Surface Water-Groundwater Interaction with MODFLOW: Some Considerations. **Groundwater**, v. 48, n. 2, p.174-180, 2010.
- CARVALHO, V. E. C. **Modelagem hidrogeológica de uma sub-bacia hidrográfica da Zona da Mata de Minas Gerais**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- CARVALHO FILHO, C. A.; COTA, S. D. S. Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do modelo MODFLOW . In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p. 1-14, 2014.
- DEMÉTRIO, J. G. A.; PAIVA, A. L. R.; FREITAS, D. A.; BATISTA, A. G. S.; CABRAL, J. J. S. P. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de Caixa d'água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**, v. 27, p.111-126, 2013.
- DUARTE, L. N. **Avaliação do comportamento solo-estrutura de elementos de fundação tipo sapata estaqueada**. 2012. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- FERRARI, L. C. K. M. **Modelagem Tridimensional de fluxo de águas subterrâneas em um aquífero livre e raso: aplicação no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo**. 2006. 175 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.
- FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, A. P. Levantamento batimétrico automatizado aplicado à Gestão de Recursos Hídricos. Estudo de caso: represamento do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 1- 8, 2012.

HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M.C.; MCDONALD, M.G. MODFLOW-2000, Modular Ground-Water Model–User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Reston, Virginia, USA: The U.S. Geological Survey, 2000. 121 p.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas.** 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

MYRONIDIS, D.; EMMANOULOU, D. A water balance model of the Natura 2000 protected area “Nestos delta”. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, v. 1, p. 45 – 48, 2008.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. **Revista Brasileira de Recurso Hídricos**, São Paulo; v. 18, n.1, p. 235-247, jan. 2013.

RAY, C.; SCHUBERT, J.; LINSKY, R. B.; MELIN, G. Introduction. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.1–15, 2003.

SHANKAR V.; ECKERT, P.; OJHA, C.; KÖNIG, C. M. Transient three-dimensional modeling of riverbank filtration at Grind well field, Germany. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 321–326, 2009.

SHUBERT, J. German Experience with Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.35–48, 2003.

SOARES, J. F.; RODRIGUES, V. A. J. **Filtração em Margem - Estudos Preliminares para o Sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Viçosa**, 2006. 46p. Monografia (Departamento de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

VISUAL MODFLOW: Versão 2009.1. Ontário, CANADÁ: Schlumberger Water Services. 688 p, 2009.

YANG, Q.; LU, W.; FANG, Y. Numerical Modeling of Three Dimension Groundwater Flow in Tongliao (China). **Procedia Engineering**, v. 24, p. 638 - 642, 2011.

CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA TURBIDEZ E DETERMINAÇÃO DO IQA EM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE LAGO

1 INTRODUÇÃO

A técnica da Filtração em Margem foi adotada em vários países devido aos benefícios obtidos relacionados à qualidade da água (PAIVA, 2009; SHUBERT, 2003). Um dos benefícios da Filtração em Margem é a comprovada eficiência na remoção de turbidez no pré-tratamento no abastecimento de água. A turbidez é a propriedade física da água que se traduz na redução da sua transparência devido à presença de partículas sólidas em suspensão, que podem carrear micro-organismos e provocar a dispersão e absorção da luz, dentre outros (CETESB, 2013). Portanto, a remoção da turbidez no pré-tratamento da água de abastecimento permite a diminuição nos custos operacionais em Estações de Tratamento de Água (RAY & JAIN, 2011).

A qualidade da água pode, ainda, ser analisada por meio de Índices de Qualidade da Água (IQA) (IGAM, 2005). Os índices de qualidade da água têm diversas finalidades, como: a comparação de condições ambientais em diferentes áreas geográficas (FRANCO *et al.*, 2012), a avaliação da qualidade ambiental dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (ALMEIDA & OLIVEIRA, 2010; BERTOSSI *et al.*, 2013) e a identificação de problemas na qualidade da água em trechos de rios (NUNES *et al.*, 2011).

Ray & Jain (2011) explicam que é necessário determinar em sistemas de FM outras variáveis físicas, químicas e biológicas que interferem na qualidade da água, tanto superficial quanto subterrânea. Von Sperling (2006) descreve que a análise da qualidade da água pode ser realizada por meio de estatística, permitindo a caracterização da amostra de dados disponíveis e a descrição numérica das variáveis quantitativas.

A FML ainda é uma atividade ainda pouco estudada no Brasil. Alguns trabalhos em nível de doutorado (ESQUIVEL, 2012; MONDARDO, 2009) contemplaram os estudos sobre a redução de turbidez em sistemas experimentais de FML, por meio de colunas filtrantes instaladas em laboratório. No entanto, são desconhecidas pesquisas

que avaliem em sistemas piloto de FML a redução de turbidez, e a classificação da qualidade água por meio de Índice de Qualidade da Água (IQA).

Em Viçosa (MG), algumas pesquisas foram realizadas à montante do lago na qual se situa o ponto de captação de água para abastecimento da cidade e da universidade. Roque (2010) avaliou a influência do uso do solo sobre a turbidez na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu; enquanto Andrade (2010) avaliou a turbidez nas águas superficiais e águas subterrâneas no córrego Palmital.

Na presente pesquisa, especial atenção foi dada ao parâmetro turbidez, já que esse é um aspecto de especial importância em relação à qualidade da água na FML. Na análise deste e dos outros parâmetros de qualidade, consideraram-se os valores referenciais estabelecidos na legislação pertinente (potabilidade, enquadramento, balneabilidade e irrigação).

Nesse contexto, o presente capítulo apresenta:

- uma análise comparativa da turbidez das águas no sistema FML;
- uma avaliação do IQA tanto para a água superficial quanto subterrânea no sistema FML;
- uma análise de alguns parâmetros de qualidade da água, com uso de estatística descritiva e inferencial.

Por meio dessa pesquisa foi possível, portanto, apresentar uma análise da eficiência do sistema de FML na melhoria da qualidade da água, como resultado da interação lago - aquífero.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises físicas, químicas e biológicas para obtenção dos dados de potencial hidrogeniônico (pH), temperatura (T), turbidez (Tu), oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5^{20}), *Escherichia coli*, fósforo total (P_T) e nitrato (NO_3^-), foram realizadas conforme métodos preconizados pelo *Standard Methods for Examination Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2012). Para tanto, utilizou-se uma sonda multiparâmetros HI9828 e equipamentos de bancada alocados no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

Os pontos nos quais as coletas foram realizadas foram codificados como “LAGO” (amostras coletadas na Barragem da UFV próximo ao ponto de captação da Estação de Tratamento de Água da UFV (ETA/UFV). As amostras de água subterrânea, codificadas como “POÇO”, foram coletadas em uma torneira especificamente instalada para esse fim. Para evitar interferências nos resultados, a água do poço foi bombeada no momento da coleta, deixando-a escorrer por 30 min. antes de acondicioná-la no frasco de amostragem.

2.2 DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ

As amostras de água para análise da turbidez foram coletadas 1 vez por semana tanto no “LAGO” quanto no “POÇO”, no período de dezembro/2013 a agosto/2014. Utilizou-se um Turbidímetro HACH 2100 Q para a realização das análises.

As análises descritivas de turbidez consideraram todos os dados coletados que foram comparados às precipitações mensais do período observado (BOLETIM METEOROLÓGICO, 2013; 2014).

2.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)

Realizaram-se 4 campanhas de coleta de dados, todas em 2014 (19/02; 04/06; 27/08 e 22/10), com coleta de água tanto no “LAGO” quanto no “POÇO”.

Para a determinação do IQA e classificação da qualidade da água considerou-se a equação desenvolvida por Srivastava & Kumar (2013), que pode ser utilizada quando alguma variável não é medida para o cálculo do IQA. Os pesos (w) são considerados apenas para as variáveis disponíveis (Equação 1).

$$WQI = \frac{\sum W_x Q_x}{\sum W_x} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

WQI = Índice de qualidade da água

W_x = pesos das variáveis avaliadas;

Q_x = valores das variáveis avaliadas;

X = variáveis avaliadas.

2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas para os parâmetros CE, pH, Eh e T, por meio do software SPSS versão 16 (*Statistical Package for Social Science*). Consideraram-se os dados coletados durante um ano hidrológico (APÊNDICE D) e os métodos estatísticos descritos em Devore (2006).

O teste de normalidade foi realizado para o conjunto de dados do “POÇO” e “LAGO”, desconsiderando-se os dados dispersos (*outliers*), pelo fato de que esses poderiam gerar resultados pouco confiáveis. No tratamento dos dados estatísticos, considerou-se que quando os dados não seguiam uma distribuição normal realizou-se o teste de Mann-Whitney. Para o conjunto de dados que apresentava distribuição normal realizou-se o teste “T” (DEVORE, 2006).

As análises estatísticas foram realizadas para três situações:

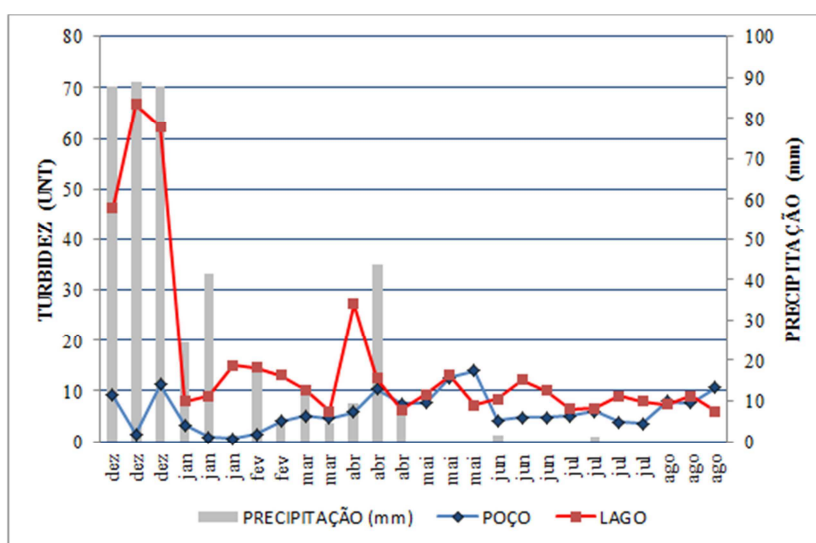
- comparação das amostras coletadas no “POÇO” com as amostras coletadas no “LAGO”;
- comparação de todas as amostras do “POÇO” nos semestres analisados;
- comparação de todas as amostras do “LAGO” nos semestres analisados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DA TURBIDEZ

Os dados brutos de turbidez coletados no “POÇO” e no “LAGO” são mostrados na Figura (III) 1. Considerou-se também as precipitações (mm) ocorridas até 7 dias antes da coleta.

Figura (III) 1 - Dados de turbidez coletados no “POÇO” e no “LAGO”. Dados de precipitações (mm) ocorridas até 7 dias antes da coleta.



Fonte: Dados da pesquisa.

No período de dezembro/2013 a abril/2014, ocorreram as maiores precipitações mensais. Em geral, a turbidez da água do “POÇO” apresentou-se inferior à turbidez do “LAGO”.

Nos períodos de grandes precipitações, a água do “LAGO” apresentou turbidez mais elevada, o que já era esperado devido à movimentação de partículas sólidas em suspensão nas águas superficiais.

A água coletada no “POÇO” é resultado de uma mistura da água superficial e subterrânea. Portanto, o sistema de FML pode ter contribuído com a redução do valor da turbidez na água coletada no “POÇO”, demonstrando com isso a eficiência da redução da turbidez no sistema piloto implantado. É possível que, com o bombeamento

contínuo por longos períodos nesse sistema de FML, os valores de turbidez possam diminuir ainda mais, tendo em vista que o aquífero no qual se encontra o “POÇO” monitorado é caracterizado como arenoso e com alta permeabilidade, e responde rapidamente às variações sazonais e de recarga.

Em Florianópolis (SC), Mondardo (2009) também apresentou resultados satisfatórios na redução da turbidez por meio da simulação do sistema de FML em colunas filtrantes. Paiva (2009) obteve bons resultados na redução da turbidez em sistema de FMR a partir de dados coletados em campo. No exterior, Dash *et al.*, 2008, Shubert, 2003 e Wang, 2003 também comprovaram a redução da turbidez em sistemas de FM por meio de dados coletados em campo. Ao se compararem os resultados dessas pesquisas com os resultados da pesquisa realizada na UFV, tem-se que a utilização do sistema de FML como pré-tratamento da água de abastecimento do campus da UFV apresentou eficiência semelhante, fato que poderia reduzir a necessidade do uso de produtos químicos nas estações de tratamento, tendo em vista que valores altos de turbidez podem afetar a eficiência da desinfecção em Estações de Tratamento de Água (ETA).

Os resultados obtidos foram próximos ao limite de 5 UNT estabelecidos em Brasil (2011), mostrando assim que a FML implantada poderia ser utilizada como uma fonte alternativa e complementar de abastecimento, principalmente em períodos de longas estiagens, atuando como reserva estratégica.

3.2 ANÁLISE DO IQA

Em cada campanha, coletaram-se dados para cada parâmetro que compõe o IQA (Tabela (III) 1).

Tabela (III) 1 – Dados brutos coletados no “POÇO” e no “LAGO” em cada campanha.

Parâmetros	Campanha 1 19/02/2014		Campanha 2 04/06/2014		Campanha 3 27/08/2014		Campanha 4 22/10/2014	
	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO
OD (mg/L)	-	-	-	-	5,6	6,3	4,8	5,9
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	-	1020	-	2880	-	630	-	10800
pH (adimensional)	4,05	6,72	5,53	6,05	5,27	6,06	5,68	5,93
DBO ₅ ²⁰ (mg/L)	1,39	3,94	0,8	5,0	2,6	4,0	2,7	5,0
Nitrato (mg/L)	-	6,95	-	-	-	4,43	-	4,43
Fosfatos (mg/L)	0,05	0,07	-	0,01	-	0,10	0,01	0,10
Temperatura (°C)	23,59	25,63	23,18	21,28	23,06	21,8	23,07	21,79
Turbidez (UNT)	4,05	13,3	4,10	8,4	10,6	5,92	3,90	9,34

Observação: o símbolo “-” denota valores abaixo do limite de detecção do método ou nulos.

Fonte: Dados da pesquisa

Nas duas primeiras campanhas, os dados de oxigênio dissolvido apresentaram valores nulos. Esses dados foram obtidos com o uso da sonda multiparâmetros. Constatou-se um problema nessa sonda, impossibilitando o seu uso nas demais campanhas. Assim, para que o parâmetro oxigênio dissolvido pudesse ser considerado no cálculo do IQA, obtiveram-se esses resultados em laboratório para as duas últimas campanhas. Em função disso, e visando uma melhor estimativa, optou-se por desconsiderar os resultados nulos no cômputo do IQA, de acordo com Srivastava & Kumar (2013).

Em relação a *E. coli*, verificou-se ausência desses indicadores na água subterrânea. Em contrapartida, a média geométrica dos valores na água do “LAGO” foi de 2114 NMP/100mL, valor superior ao permitido para irrigação irrestrita, igual a 1000 NMP/100mL (BRASIL, 2005) e para balneabilidade (BRASIL, 2000).

O parâmetro pH das águas coletadas no “POÇO” apresentou menor valor do que no “LAGO” em todas as campanhas, abaixo do limite de 6,0 (BRASIL, 2011). Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Andrade (2010) em águas subterrâneas, em localidades no entorno do campus da UFV. O aquífero livre é mais superficial e está

mais susceptível aos processos de decomposição da matéria orgânica, que dão origem a ácidos orgânicos, responsáveis pela diminuição do pH, o que explica os valores obtidos.

Apesar das pequenas contribuições de lançamentos clandestinos de dejetos a montante do “LAGO”, os valores de DBO_5^{20} , geralmente relacionados à contaminação com esgotos, ficaram abaixo do limite para a Classe II (BRASIL, 2005). Outro ponto a ser levantado é que os valores de nitrato se situaram abaixo do VMP para potabilidade (10 mg/L) (BRASIL, 2011) tanto para o “LAGO” quanto para o “POÇO”.

A partir desses dados, calcularam-se os valores de q_i de cada parâmetro obtido para as águas do “LAGO” e do “POÇO”. Os valores de q_i , variando de 0 a 100, bem como o IQA, e suas respectivas classificações em cada campanha, estão apresentados na Tabela (III) 2.

Tabela (III) 2 - Valores de q_i e do IQA para as águas do “POÇO” e do “LAGO”.

Parâmetros	Campanha 1 19/02/2014		Campanha 2 04/06/2014		Campanha 3 27/08/2014		Campanha 4 22/10/2014	
	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO	POÇO	LAGO
OD (% de saturação)	-	-	-	-	75,8	82,9	60,4	77,2
<i>E.coli</i> (NMP/100 mL)	100,0	20,7	100,0	14,5	100,0	24,1	100,0	8,6
pH (adimensional)	10,3	85,9	41,1	62,6	32,4	63,0	46,7	57,1
$DBO_{5,20}$ (mg/L)	84,2	61,5	99,0	54,0	72,5	61,0	71,7	54,0
Nitratos (mg/L)	100,0	58,7	100,0	100,0	100,0	69,8	100,0	69,8
Fosfatos (mg/L)	86,0	81,3	99,0	96,3	99,0	74,8	96,3	74,8
Temperatura (°C)	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0
Turbidez (UNT)	90,0	71,3	89,9	80,4	76,1	85,7	90,3	78,5
IQA	79,8	64,9	88,4	67,4	88,9	67,5	80,7	61,7
Classificação	BOM	MÉDIO	BOM	MÉDIO	BOM	MÉDIO	BOM	MÉDIO

Fonte: Dados da pesquisa

Os parâmetros analisados nas amostras do “POÇO” apresentaram melhores resultados do que os apresentados pelas amostras “LAGO”. De maneira geral, a variável “afastamento da temperatura” contribui para a superestimativa do IQA, uma vez que esse quesito não apresenta a mesma importância nos trópicos, em comparação com as localidades para as quais o índice foi proposto originalmente. De maneira geral, a presença de concentrações de *E. coli* superiores a 10^3 prejudicaram a avaliação da água

do “LAGO”, indicando possível necessidade de intervenção quanto a esse quesito. Já em relação às águas subterrâneas, realizou-se uma simulação com a exclusão do parâmetro pH e a nova classificação passou a ser “EXCELENTE” para todas as campanhas nesse cenário. O parâmetro pH teve papel importante na classificação da água de poço, contudo esse não é uma problema expressivo, uma vez que: a classificação do IQA foi “BOA” mesmo considerando-se os valores de pH obtidos, e trata-se de um comportamento natural, esperado para mananciais desse tipo (ANDRADE, 2010; BERTOSSI *et al.*, 2013).

Bertossi *et al.* (2013) também avaliaram o IQA para águas superficiais e subterrâneas em uma microbacia, e verificaram separadamente as variáveis que influenciaram na determinação do IQA, e, em geral, a água subterrânea se mostrou com qualidade melhor do que a água superficial. Na presente pesquisa, considerou-se o IQA para um sistema de FML, e tem-se que, para uma análise mais precisa da qualidade da água nesse sistema, é necessário o conhecimento de outros parâmetros especificados na legislação (BRASIL, 2005; 2008; 2011).

Em Minas Gerais, o IQA proposto pelo Igam (IGAM, 2005), tem um grau de importância no gerenciamento das águas superficiais, tendo em vista ser um instrumento que permite informar à comunidade um panorama geral da qualidade da água. No entanto, ele não é passível de alterações devido à ausência de algum dos nove parâmetros. Assim, embora nessa pesquisa tanto o IQA do “LAGO” quanto do “POÇO” tenham sido classificados como BOM ou MÉDIO, esse resultado é considerado preliminar para estudos sobre a qualidade de água em sistemas de FML.

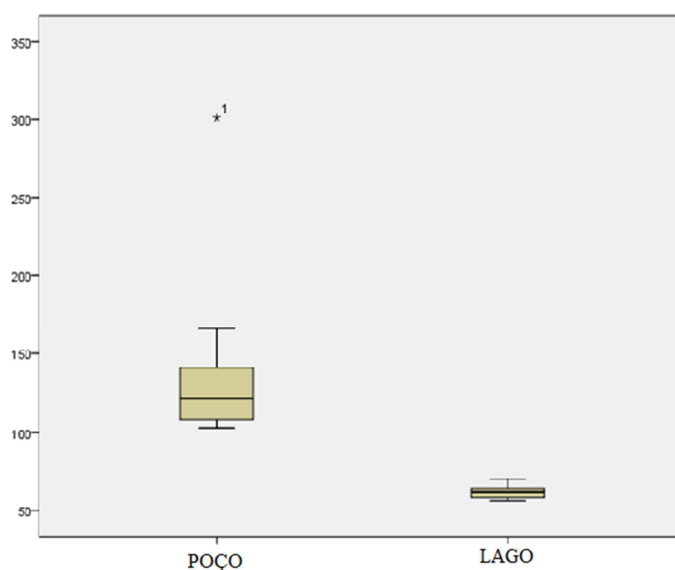
Devido à importância do IQA como um instrumento informativo da qualidade de água, alguns autores no Brasil têm desenvolvido o IQA com base em indicadores de qualidade de água subterrânea (ALMEIDA & OLIVEIRA, 2010; BERTOSSI *et al.*, 2013; FRANCO *et al.*, 2012). Contudo, especificamente para as águas subterrâneas o IQA é instrumento que ainda precisa ser analisado com algumas restrições já que a legislação vigente no Brasil (BRASIL, 2005; 2008; 2011) não especifica valores restritivos para a maioria dos parâmetros considerados no IQA proposto pelo Igam (IGAM, 2005),

No caso específico de Viçosa (MG), o estudo de IQA em sistema de FML é inédito. Ainda assim, por meio desse estudo, verificou-se que seriam necessárias outras campanhas avaliativas em um período maior de observação, com análises individuais de outros parâmetros especificados na legislação vigente para obtenção de um IQA mais preciso.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na Figura (III) 2, apresentam-se os dados obtidos para o parâmetro Condutividade elétrica no “POÇO” e no “LAGO” .

Figura (III) 2 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro Condutividade elétrica.



Fonte: Dados da pesquisa.

A distribuição dos dados do “POÇO” e do “LAGO” analisadas por meio dos testes estatísticos demonstraram que, ao nível de confiança de 95%, os dados de condutividade elétrica do “POÇO” não seguem uma distribuição NORMAL, e o conjunto de dados do “LAGO” apresentou distribuição normal.

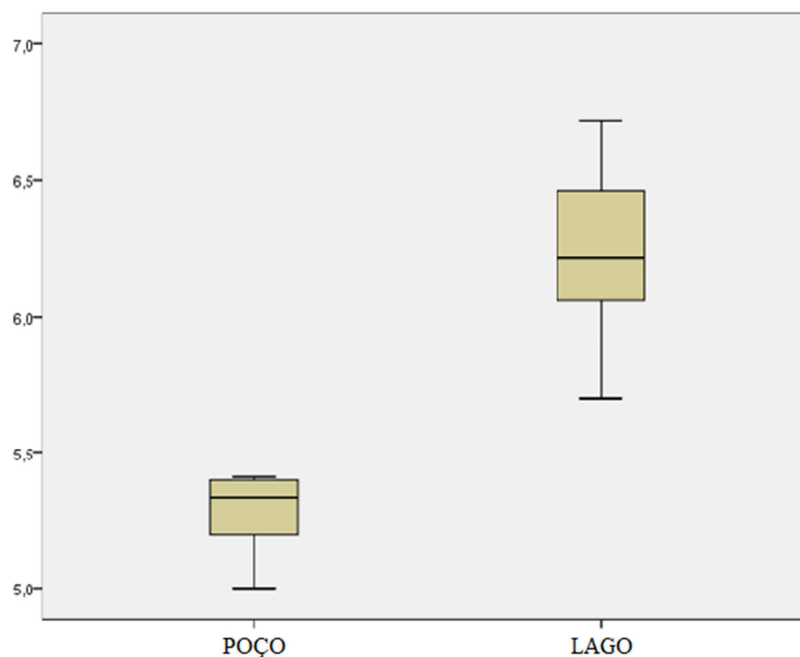
Os testes estatísticos demonstraram que ao nível de 5% de confiança para o parâmetro condutividade elétrica tem-se que:

- há diferença entre todas as amostras do “LAGO” e do “POÇO”;
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “LAGO”.
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “POÇO”.

A variação nos resultados para condutividade elétrica está possivelmente relacionada à baixa velocidade de circulação das águas no subsolo e às reduzidas precipitações observadas no período monitorado.

Na Figura (III) 3, apresentam-se os dados obtidos para o parâmetro pH no “POÇO” e no “LAGO”.

Figura (III) 3 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro pH.



Fonte: Dados da pesquisa.

Verificou-se, por meio do teste estatístico “T que, ao nível de 5% de confiança para o parâmetro pH, observa-se o seguinte:

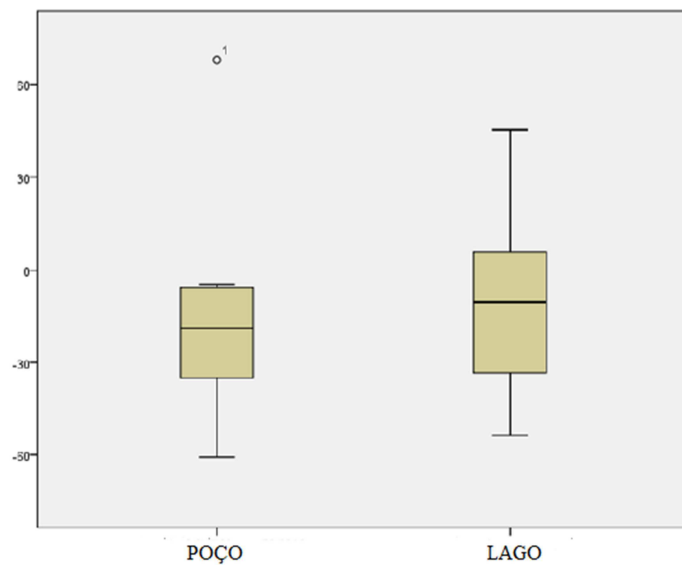
- há diferença entre todas as amostras do “LAGO” e do “POÇO”;

- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “LAGO”.
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “POÇO”.

As águas superficiais estão mais susceptíveis às variações do meio, principalmente a precipitação, influenciando diretamente no valor do pH.

Na Figura (III) 4, apresentam-se os dados obtidos para o parâmetro Eh no “POÇO” e no “LAGO”..

Figura (III) 4 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro Eh.



Fonte: Dados da pesquisa.

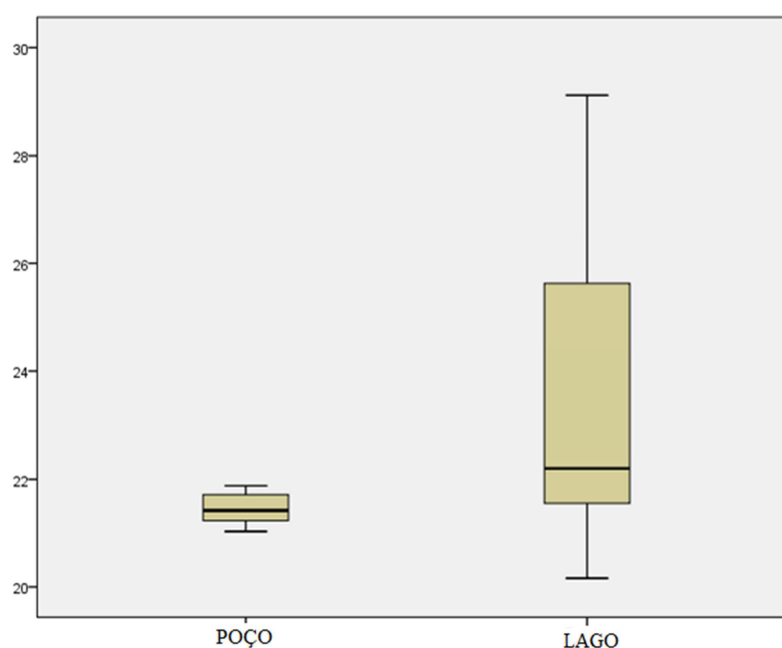
Verificou-se, por meio do teste estatístico “T”, que ao nível de 5% de confiança:

- há diferença entre todas as amostras do “LAGO” e do “POÇO”;
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “LAGO”.
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “POÇO”.

Em geral, os valores de pH diminuíram à medida que o Eh aumentou, indicando com isso que, provavelmente, houve uma disponibilidade maior de oxigênio dissolvido no meio. Acredita-se que possa ter sido gerada em função do bombeamento de água.

Na Figura (III) 5, apresentam-se os resultados obtido para o parâmetro T no “POÇO” e no “LAGO”.

Figura (III) 5 - Dados coletados no “POÇO” e no “LAGO” e apresentados em Box-plot para o parâmetro T.



Fonte: Dados da pesquisa.

Verificou-se, por meio do teste estatístico “T”, que ao nível de 5% de confiança:

- há diferença entre todas as amostras do “LAGO” e do “POÇO”;
- há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “LAGO”.
- não há diferença entre as amostras coletadas semestre 1 e 2 no “POÇO”.

4 CONCLUSÃO

Os resultados do IQA variaram entre MÉDIO (“LAGO”) e BOM (“POÇO”) para o período monitorado. Além disso, as análises estatísticas demonstraram que os parâmetros: CE, pH, Eh e T apresentaram diferenças significativas entre os períodos analisados (chuvoso e seco). Esse é um resultado preliminar para estudos sobre qualidade da água em FML, porém mostra que essa pode ser uma ferramenta importante na gestão das águas superficiais e subterrâneas.

A água extraída do “POÇO” do sistema de FML, de maneira geral, apresentou-se com qualidade melhor do que a água superficial no “LAGO” adjacente. Isso se deve às características hidrogeológicas e físicas do sistema aquífero livre no qual se encontra o “POÇO”, que é poroso, de alta permeabilidade e responde rapidamente às variações de precipitação.

No que diz respeito à redução da turbidez, esse estudo demonstrou que o sistema de FML pode ser uma alternativa viável do ponto de vista técnico, para o pré-tratamento de águas para abastecimento do campus da UFV, já que a redução observada para a turbidez poderia contribuir com a redução de custos de tratamento e a geração de resíduos (lama).

Em geral, o sistema de FML, além de ter baixo custo de operação, pode suprir as demandas, fornecendo água em quantidade e com qualidade para atendimento de demandas específicas, principalmente em períodos de estiagem. A consideração dessa alternativa de fornecimento deve, portanto, ser considerada no gerenciamento das águas superficiais e subterrâneas da área de estudo e seu entorno, assim como em áreas com características físicas (especialmente, hidrogeológicas) semelhantes, incluindo a definição de potenciais usos.

As análises da qualidade da água por meio da determinação do IQA, nessa pesquisa, podem ser consideradas preliminares. Especificamente para o estudo de águas subterrâneas, o IQA proposto não contemplou parâmetros relevantes considerados por meio da legislação vigente (BRASIL, 2008). Seria importante a continuidade desse estudo por meio da inclusão de outros parâmetros no monitoramento das águas e que permitissem a obtenção de um IQA mais preciso.

5 REFERÊNCIAS

APHA. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19a. Washington: Ed. Byrd. Reppress Spring- field, 2012. 1.134 p .

ALMEIDA, R. A. S.; OLIVEIRA, I. B. Índice de qualidade da água subterrânea bruta (IQASB) utilizada na produção de água potável. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo; v. 24, n. 1, p. 31-45, 2010.

ANDRADE, L. C. R. **Estudo da influência do meio físico e das atividades antrópicas na qualidade da água na sub-bacia do córrego Palmital – Viçosa (MG)**. 2010. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BERTOSSI A. P. A.; CECÍLIO, R. A.; NEVES, M. A.; GARCIA, G. O. Qualidade da água em microbacias hidrográficas com diferentes coberturas do solo no sul do Espírito Santo. **Revista Árvore**, Viçosa; v. 37, n. 1, p. 107-117, jan. 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 274 de 29 nov. 2000. **Diário Oficial da União**, n. 018, seção 1. p. 70-71, 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 357 de 17 mar. 2005. **Diário Oficial da União**, n. 053, seção 1. p. 58-63, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 396 de 03 abr. 2008. **Diário Oficial da União**, n. 066, seção 1. p.64-68, 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria N° 2.914, de 12 de dez. 2011. **Diário Oficial da União**, 2011.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - **Qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo**, São Paulo, 2013.

DASH, R.R.; MEHROTRA, I.; GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. **Hydrogeology Journal**. Berlim, v. 16, p. 1089- 1099, may/2008.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências** (Tradução: Joaquim Pinheiro Nunes Silva) - 2006.

ESQUIVEL, L. G. R. **Remoção de matéria orgânica natural e precursores de trihalometanos por filtração em margem na lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. 2012. 246p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

FRANCO, G. B., BETIM, L. S., MARQUES, E. A. G., GOMES, R. L., CHAGAS, C. S. Relação qualidade da água e fragilidade ambiental da Bacia do Rio Almada, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo; v. 42, n.1, p. 114 -127. Dez. 2012.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Sistema de cálculo da qualidade da água: SCQA**. Belo Horizonte: IGAM, 2005. 16p.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas.** 2009, 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

NUNES, D. G.; SILVA, D. D.; MATOS, A. T. Índice de qualidade da água em trecho do rio Turvo Sujo, Viçosa-MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa; v. 19, n. 5, p. 459-468, out. 2011.

PAIVA, A. L. R. **O Processo Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe, Tese de doutorado. 2009. 150p.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

RAY, C.; JAIN, R. Drinking Water Treatment Technology Comparative Analysis. In: RAY, C. JAIN, R. (Org.) **Drinking Water Treatment**, New York: Springer, p. 9 – 36, 2011.

ROQUE, L. A. **Avaliação da Influência do Uso do Solo Sobre a Turbidez na Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu no Trecho a Montante do Campus da UFV**, 2010, 60p. Monografia (Geografia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

SHUBERT, J. German Experience with Riverbank Filtration Systems. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.35–48, 2003.

SRIVASTAVA, G., KUMAR, P. Water quality index with missing parameters. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, Bangalore; v. 2, n.4, p. 609-614, abr. 2013.

VON SPERLING, M. **Princípio do Tratamento Biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: UFMG,2005. 452p.

WANG, J. Riverbank Filtration Case Study at Louisville, Kentucky. In: RAY, C.; LINSKY, R. B.; MELIN, G.(Org.) **Riverbank Filtration – improving source-walter quality**, New York: Kluwer Academic Publishers, p.117–146, 2003.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A ênfase na hidrogeologia no estudo de FML desta pesquisa permitiu o conhecimento da interação lago – aquífero. Essa era uma situação desconhecida tanto em escala local (Viçosa, MG) quanto para os estudos sobre FML realizados no Brasil.

A investigação criteriosa do meio físico no início da pesquisa permitiu a identificação da área mais apropriada para a implantação do sistema de FML. Certamente esse critério inicial favoreceu a precisão dos dados gerados na caracterização hidrogeológica.

A caracterização hidrogeológica do aquífero forneceu diversos dados inéditos sobre a área de estudo, que podem ser aproveitadas para outros estudos sobre áreas com características semelhantes. Como exemplos desses dados, podemos citar a profundidade do aquífero freático, o material constituinte do subsolo, a posição do nível d'água, a condutividade hidráulica da camada saturada, a transmissividade e o armazenamento do aquífero.


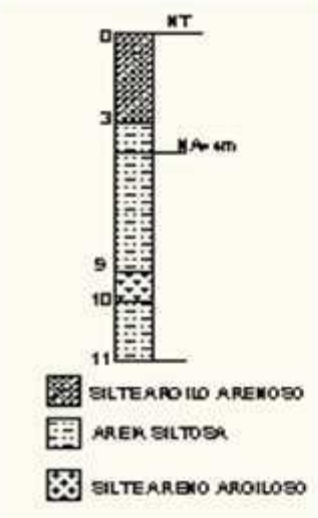
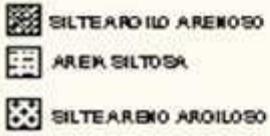
Esses dados permitiram a elaboração de um modelo conceitual e de modelos matemáticos representativos da situação real observada em campo, tanto no estado estacionário quanto no transiente.


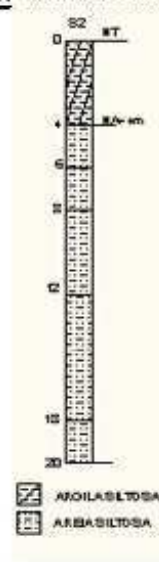
Outro ponto relevante dessa pesquisa consiste na utilização do “POÇO” como uma alternativa para suprimento de água no campo experimental Diogo Alves de Mello. Inicialmente, o sistema de FML foi implantado como projeto piloto para se testar a viabilidade da técnica em margens de lago, porém no desenvolvimento dessa pesquisa, devido à estiagem prolongada e diante dos baixos níveis d'água do “LAGO”, o “POÇO” passou a ser a única alternativa para suprir as demandas referentes à falta de água na irrigação dos experimentos do campo experimental. Esse fato demonstrou a potencialidade do sistema de FML no abastecimento de água e apontou para a possibilidade de utilizá-lo como um sistema alternativo de baixo custo operacional para suprimento de demandas de água para usos menos restritivos. Os valores referentes à qualidade da água no sistema aquífero contribuíram para a utilização do “POÇO” nessa situação específica.


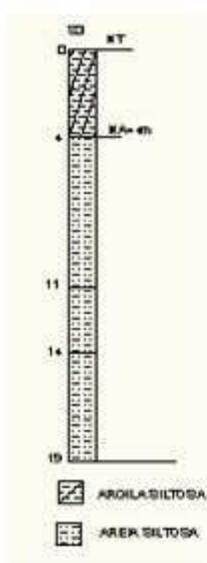
Os dados gerados servirão como base para o planejamento da utilização das águas superficiais e subterrâneas na área de estudo e em pequenas bacias hidrográficas com características físicas semelhantes.

APÊNDICE

Apêndice A – BOLETINS DE SONDAGENS

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL		PERFIL GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO
Projeto: Filtração em Margem - Tese doutorado Local: Vale da Aeronomia - UFV - Viçosa MG		POÇO DE OBSERVAÇÃO 1
Características do Aquífero		Data: 22/08/2013
Tipo: aquífero livre		PROFUNDIDADE DO NÍVEL DE ÁGUA (m) = 4,00
Coordenada UTM	N 7702194,523	PROFUNDIDADE DO REVESTIMENTO (m) = 11,00 ϕ = 2pol.
DATUM SIRGAS	E 721819,224	PROFUNDIDADE DO FURO (m) = 11,00 ϕ = 4pol.
Método: Sondagem à percussão ABGE (1999)		ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMETRICA (NBR 7181 - ABNT)
Profundidade (m)	Descrição	PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
1 a 3	Silte argilo-arenoso	 <p>NT</p> <p>0</p> <p>3</p> <p>4m</p> <p>9</p> <p>10</p> <p>11</p> <p>  </p>
3 a 9	areia siltoosa com matéria orgânica e mica	
9 a 10	silte arenoso-argiloso com mica e matéria orgânica	
10 a 11	areia siltoosa com matéria orgânica e mica	
OBSERVAÇÃO		
		Solo tipo: Aluvionar
Orientanda : Silvia Fernandes Rocha		Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL		PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
Projeto: Filtração em Margem - Tese doutorado Local: Vale da Aeronômica - UFV - Viçosa MG		POÇO DE OBSERVAÇÃO 2
Características do Aquífero Tipo: aquífero livre		Data: 22/08/2013 PROFUNDIDADE DO NÍVEL DE ÁGUA (m) = 4,00 PROFUNDIDADE DO REVESTIMENTO (m) = 20 ϕ = 2pol. PROFUNDIDADE DO FURO (m) = 20,00 ϕ = 4pol.
Coordenada UTM	N 7702207,993	ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NBR 7181 - ABNT)
DATUM SIRGAS	E 721791,685	
Método: Sondagem à percussão ABGE (1999)		
Profundidade (m)	Descrição	PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
1 a 4	argila siltosa com matéria orgânica	
4 a 12	areia siltosa com mica e matéria orgânica	
12 a 18	silte arenoso com matéria orgânica	
18 a 20	areia siltosa com mica e matéria orgânica	
OBSERVAÇÃO		
		Solo tipo: Aluvionar
Orientanda: Sílvia Fernandes Rocha		Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL		PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
Projeto: Filtração em Margem - Tese doutorado		POÇO DE OBSERVAÇÃO 3
Local: Vale da Aeronomia - UFV - Viçosa MG		
Características do Aquífero		Data: 22/08/2013
Tipo: aquífero livre		PROFUNDIDADE DO NÍVEL DE ÁGUA (m) = 4,00
Coordenada UTM	N 7702216,933	PROFUNDIDADE DO REVESTIMENTO (m) = 19,00 Ø = 2 pol.
DATUM SIRGAS	E 721772,67	PROFUNDIDADE DO FURO (m) = 19,00 Ø = 4 pol
Método: Sondagem à percussão ABGE (1999)		ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMETRICA (NBR 7181 - ABNT)
Profundidade (m)	Descrição	PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
1 a 4	argila siltosa com mica	
4 a 11	areia siltosa com mica e matéria orgânica	
11 a 14	areia siltosa com mica e matéria orgânica	
14 a 19	areia siltosa com mica e matéria orgânica	
OBSERVAÇÃO		
TH = TRADO HELICOIDAL		
		Solo tipo: Aluvionar
Orientanda : Silvia Fernandes Rocha		Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Apêndice B - Curvas e classificação granulométricas dos solos estudados

Figura (B) 1 - Curva granulométrica da amostra de solo A1 do poço SP1

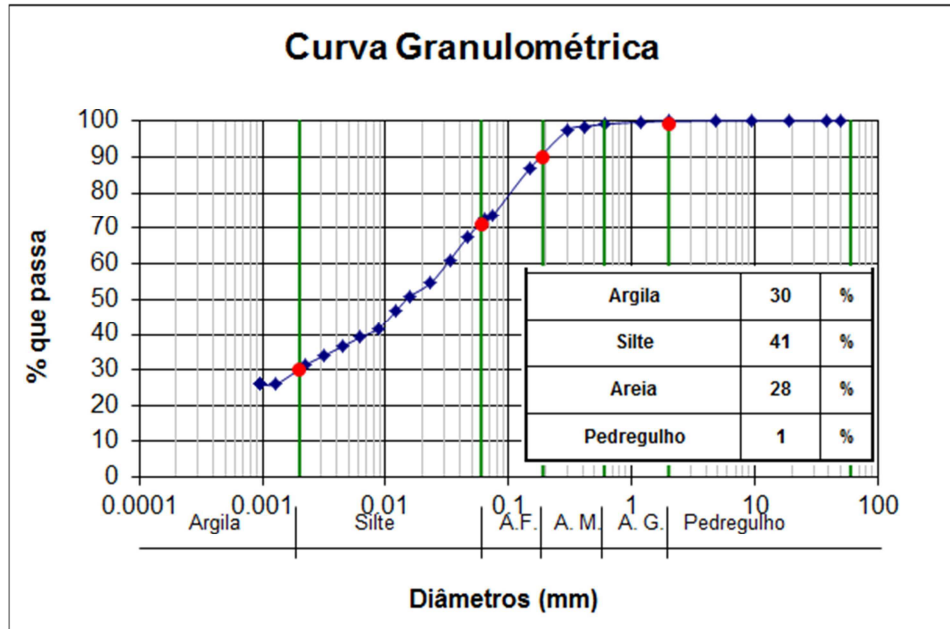


Figura (B) 2 - Curva granulométrica da amostra de solo A2 do poço SP1

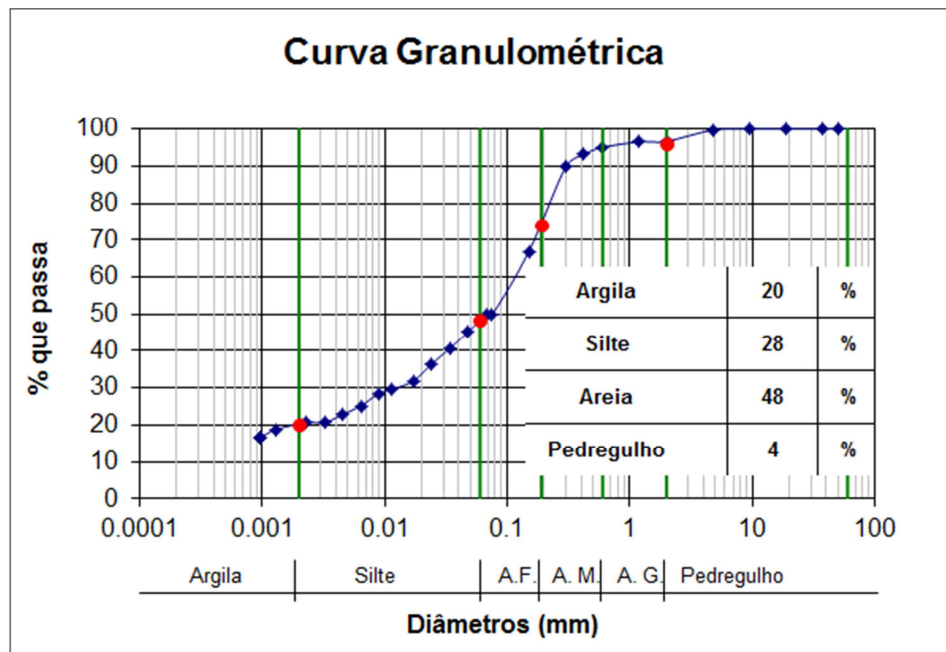


Figura (B) 3- Curva granulométrica da amostra de solo A3 do poço SP1

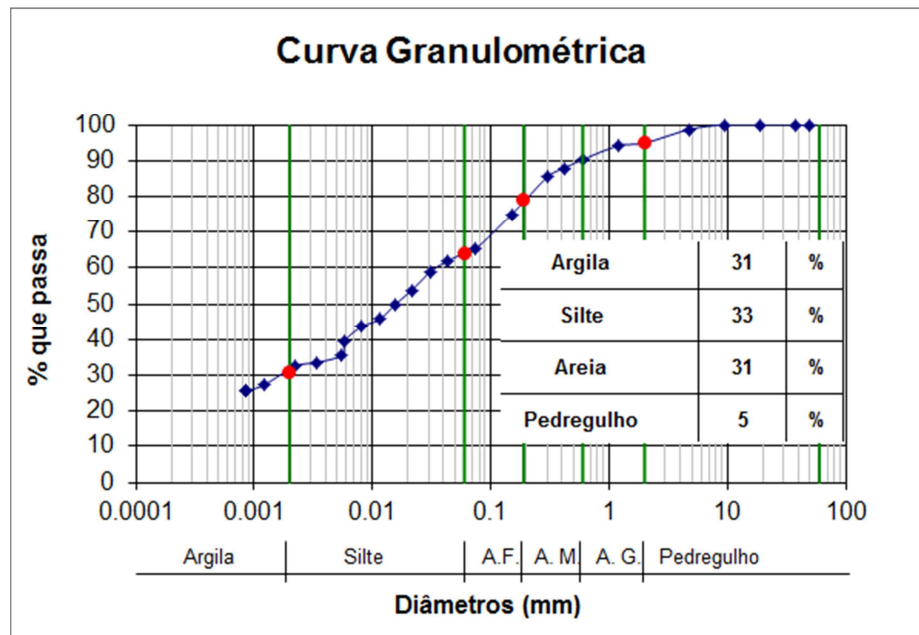


Figura (B) 4 - Curva granulométrica da amostra de solo A4 do poço SP1

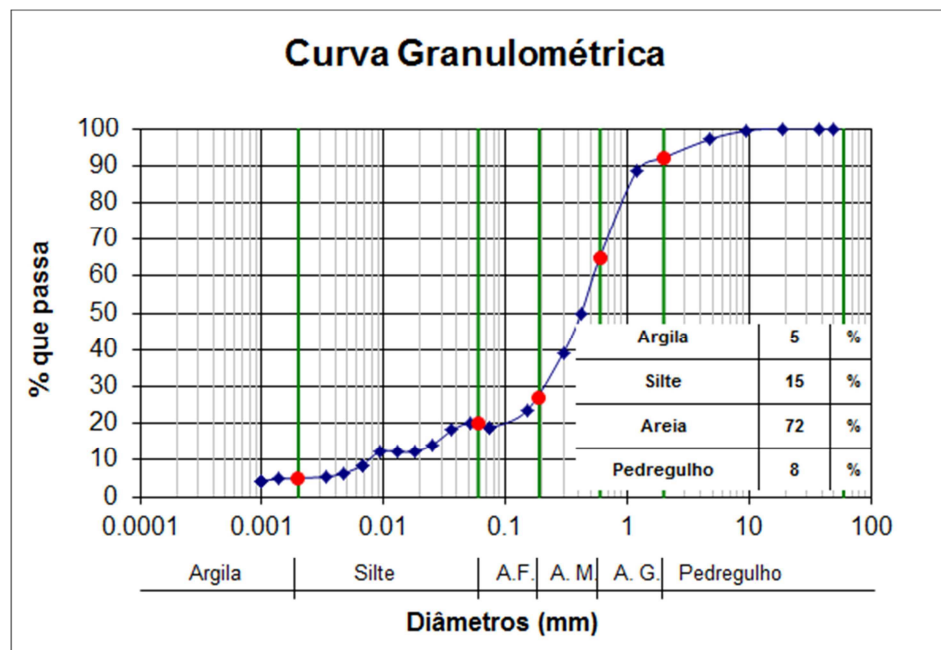


Figura (B) 5 - Curva granulométrica da amostra de solo A5 do poço SP2

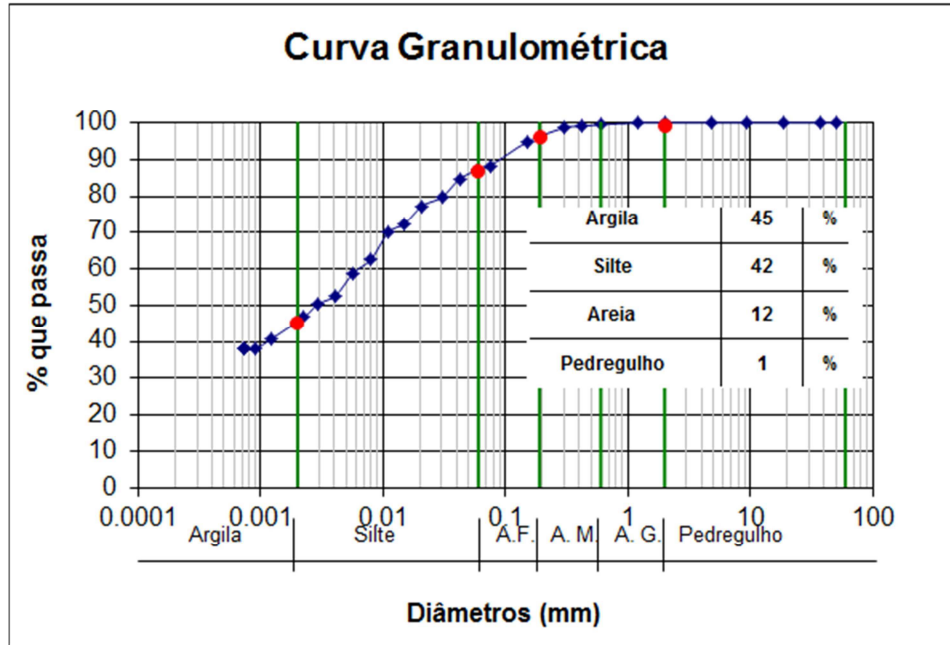


Figura (B) 6 - Curva granulométrica da amostra de solo A6 do poço SP2

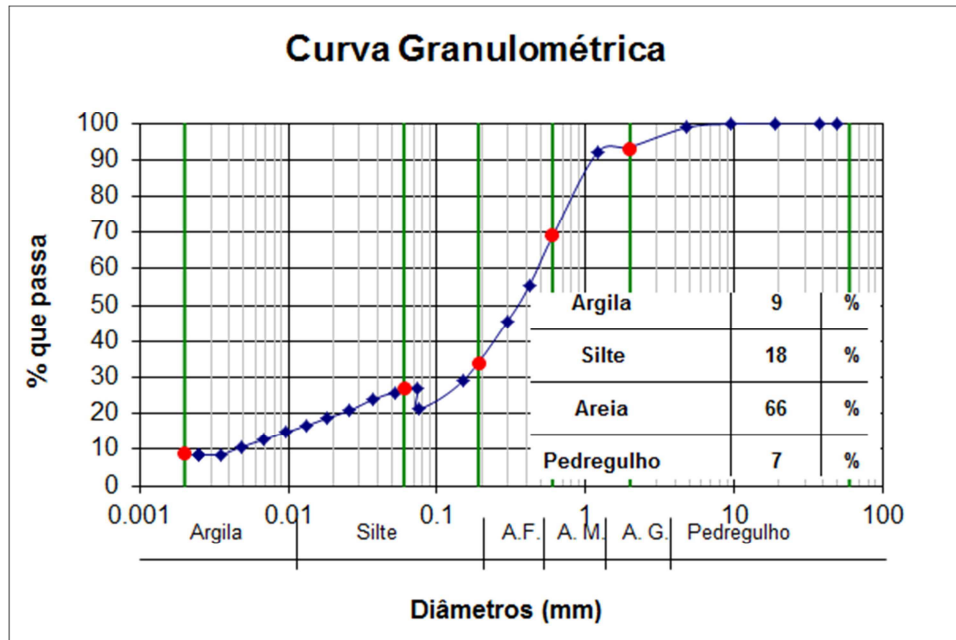


Figura (B) 7 - Curva granulométrica da amostra de solo A7 do poço SP2

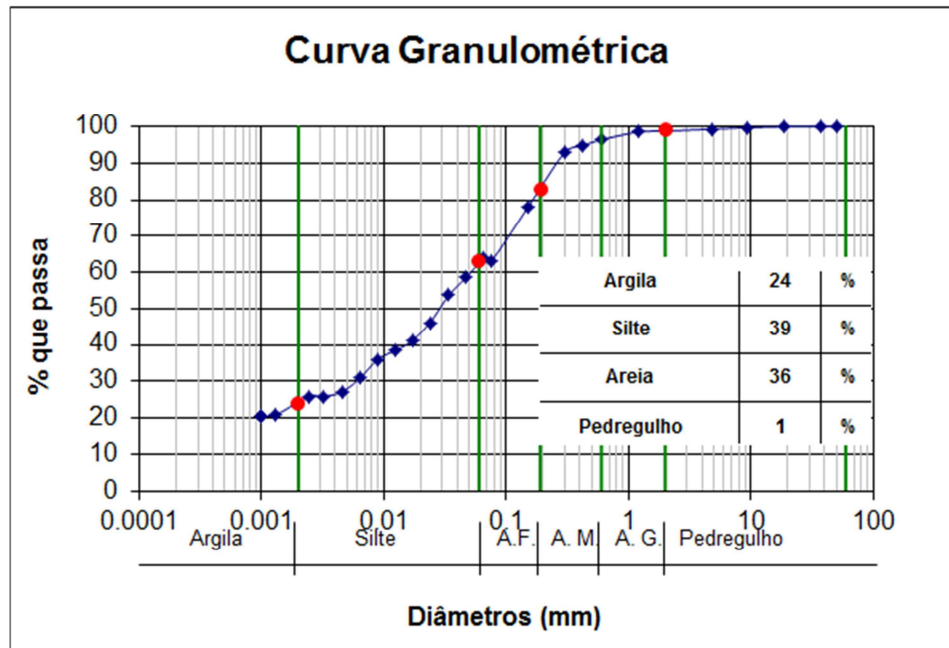


Figura (B) 8 - Curva granulométrica da amostra de solo A8 do poço SP2

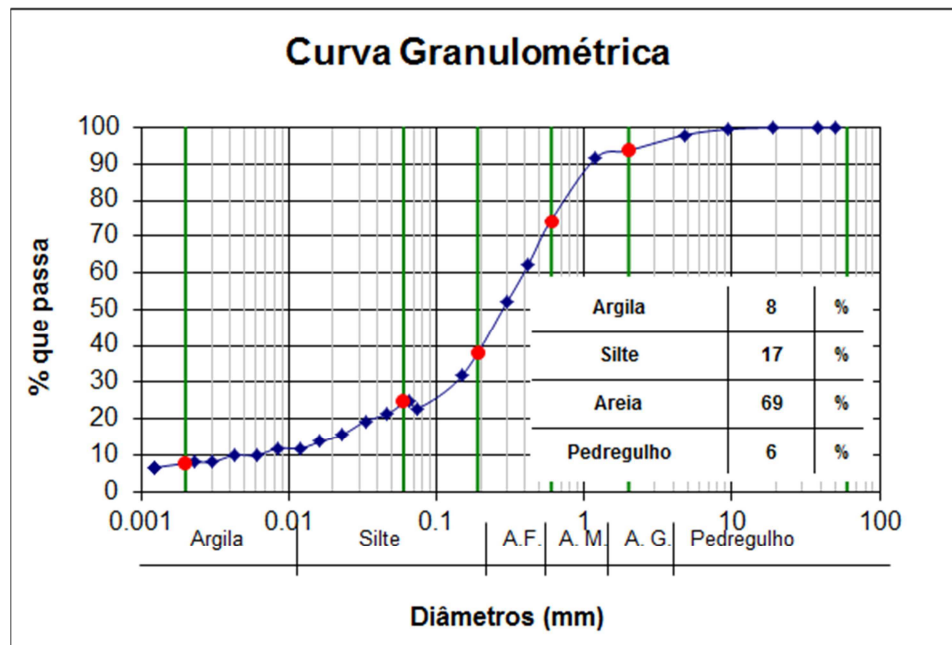


Figura (B) 9 - Curva granulométrica da amostra de solo A9 do poço SP2

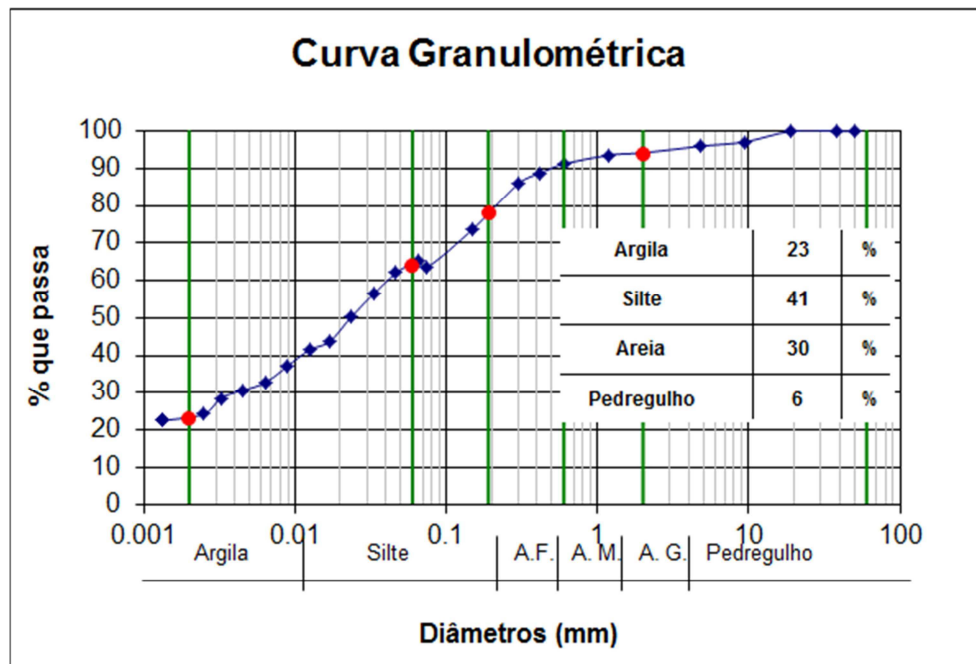


Figura (B) 10 - Curva granulométrica da amostra de solo A10 do poço SP2

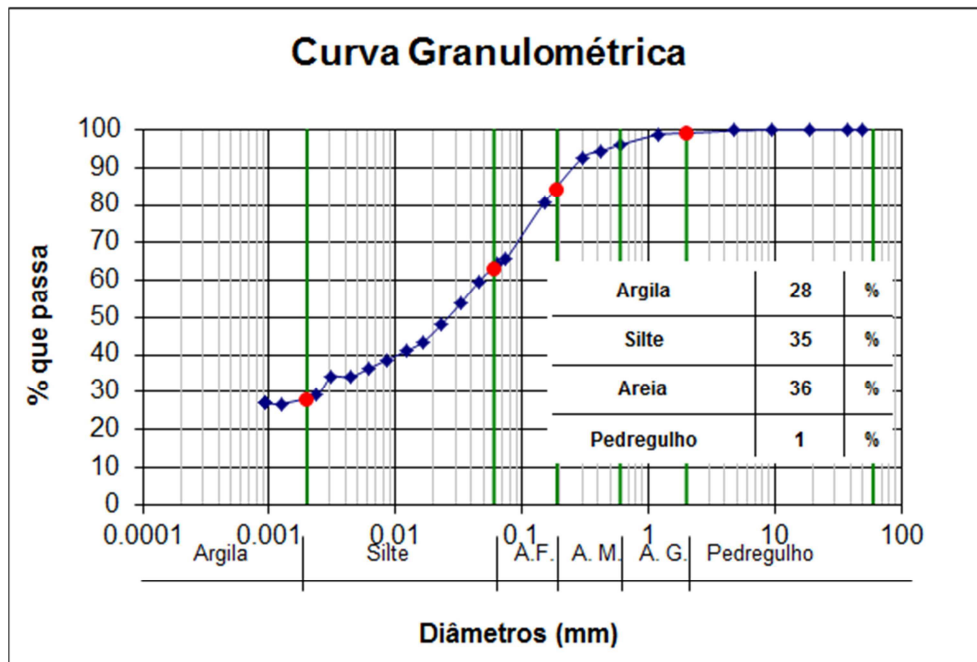


Figura (B) 11 - Curva granulométrica da amostra de solo A11 do poço SP3

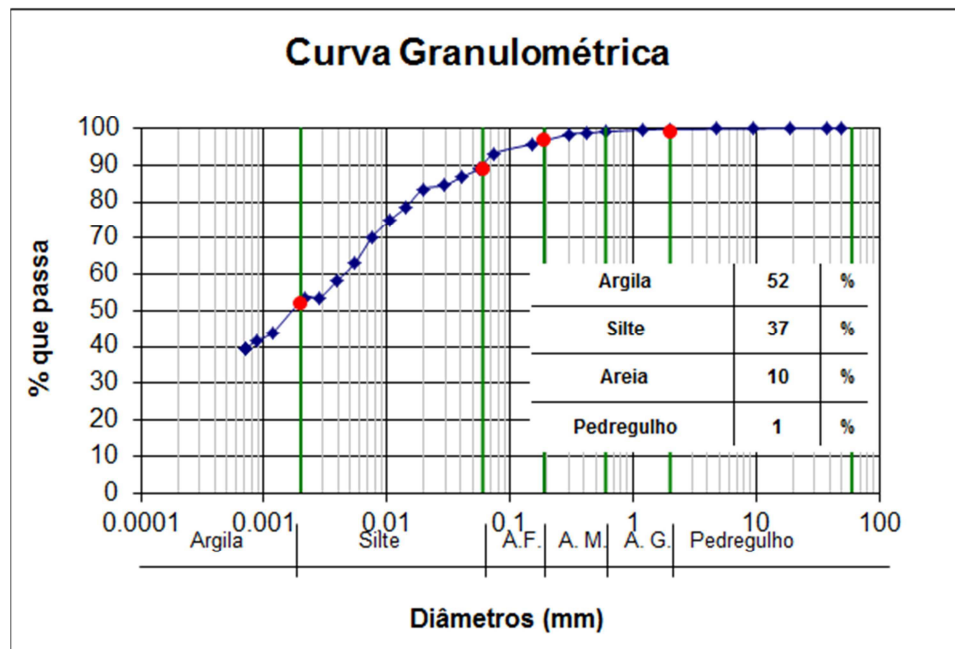


Figura (B) 12 - Curva granulométrica da amostra de solo A12 do poço SP3

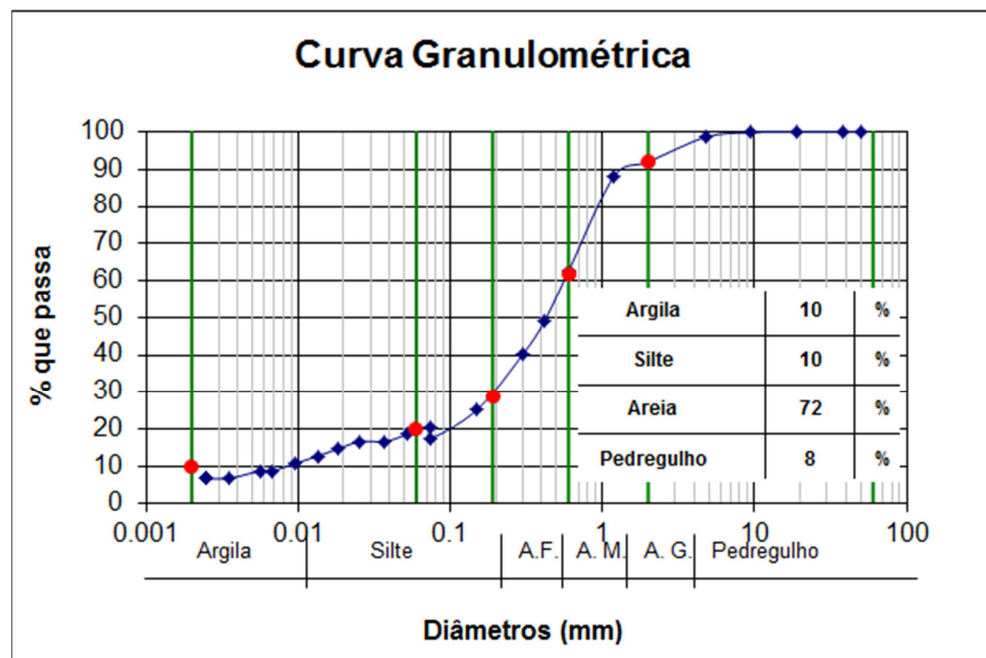


Figura (B) 13 - Curva granulométrica da amostra de solo A13 do poço SP3

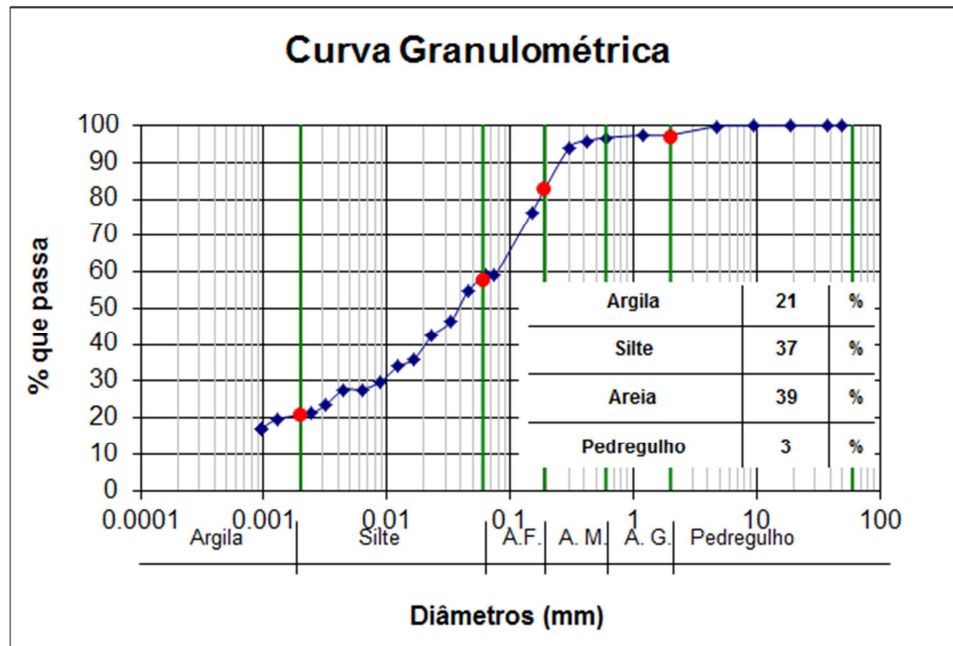
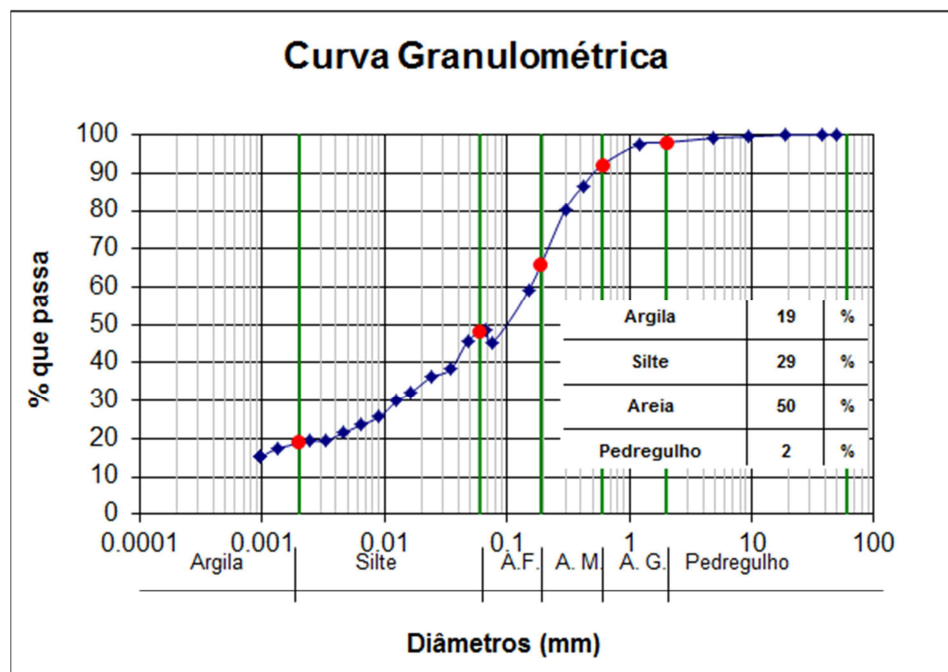


Figura (B) 14 - Curva granulométrica da amostra de solo A14 do poço SP3



Apêndice C – Dados do monitoramento potenciométrico durante o ano hidrológico.

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2/9	4.58	4.7	4.12	4.81	4.26	5.99	4.23	4.56	4.06	4.2	4.14	6.72
3/9	4.63	4.71	4.15	4.88	4.3	6.07	4.25	4.55	4.06	4.19	4.22	6.82
4/9	4.62	4.7	4.13	4.82	4.28	6.02	4.25	4.56	4.05	4.29	4.19	6.83
5/9	4.63	4.71	4.15	4.88	4.3	6.07	4.25	4.55	4.06	4.19	4.22	6.82
6/9	4.63	4.71	4.14	4.89	4.29	6.15	4.25	4.56	4.06	4.19	4.21	6.82
9/9	4.62	4.72	4.15	4.87	4.24	6.12	4.2	4.53	4.04	4.19	4.14	6.7
10/9	4.62	4.71	4.14	4.87	4.26	6.1	4.23	4.53	4.03	4.17	4.17	6.71
11/9	4.62	4.71	4.12	4.86	4.25	5.95	4.23	4.53	4.02	4.19	4.18	6.7
12/9	4.62	4.71	4.13	4.89	4.27	6.03	4.23	4.53	4.04	4.19	4.2	6.72
13/9	4.65	4.73	4.16	4.89	4.29	6	4.25	4.56	4.05	4.19	4.22	6.69
16/9	4.65	4.73	4.16	4.91	4.3	6.04	4.26	4.56	4.07	4.2	4.22	6.7
17/9	4.65	4.74	4.16	4.93	4.3	6.05	4.26	4.58	4.07	4.2	4.22	6.72
18/9	4.65	4.74	4.17	4.95	4.31	6.08	4.25	4.57	4.09	4.21	4.23	6.7
19/9	4.67	4.76	4.19	4.92	4.31	5.95	4.26	4.57	4.1	4.23	4.24	6.72
20/9	4.68	4.76	4.2	4.92	4.34	5.97	4.29	4.58	4.1	4.22	4.23	6.74
23/9	4.67	4.76	4.18	4.87	4.3	5.73	4.26	4.55	4.1	4.24	4.22	6.78
24/9	4.6	4.76	4.2	4.91	4.34	5.87	4.31	4.56	4.11	4.24	4.24	6.76
25/9	4.68	4.78	4.19	4.82	4.32	5.49	4.26	4.53	4.11	4.24	4.23	6.75
26/9	4.67	4.77	4.15	4.83	4.32	5.65	4.26	4.49	4.09	4.22	4.24	6.74
27/9	4.68	4.78	4.19	4.82	4.32	5.49	4.26	4.53	4.11	4.24	4.23	6.75

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2013												
1/10	4.61	4.68	4.08	4.79	4.16	5.16	4.05	4.44	3.99	4.13	4.08	4.37
2/10	4.62	4.71	4.11	4.75	4.22	5.55	4.19	4.45	4.03	4.16	4.13	6.71
3/10	4.63	4.69	4.06	4.76	4.21	5.53	4.19	4.45	3.99	4.13	4.11	6.77
4/10	4.62	4.71	4.1	4.66	4.23	5.12	4.18	4.39	3.99	4.12	4.12	6.76
7/10	4.57	4.69	4.04	4.62	4.24	5.1	4.14	4.45	3.97	4.1	4.04	6.72
8/10	4.61	4.68	4.05	4.6	4.17	5.08	4.14	4.38	4.06	4.08	4.07	6.71
9/10	4.59	4.69	4.05	4.6	4.19	5.08	4.18	4.37	3.96	4.08	4.1	6.74
10/10	4.59	4.68	4.06	4.61	4.15	5.15	4.04	4.38	3.97	4.09	4.07	6.8
11/10	4.6	4.69	4.08	4.62	4.19	5.16	4.06	4.39	3.98	4.11	4.08	6.73
14/10	4.57	4.67	4.08	4.6	4.17	4.97	4.15	4.35	3.97	4.11	4.03	6.75
15/10	4.61	4.69	4.13	4.62	4.22	4.92	4.19	4.37	3.99	4.15	4.1	6.73
16/10	4.61	4.71	4.11	4.58	4.25	4.92	4.19	4.42	4.02	4.15	4.12	6.67
17/10	4.65	4.72	4.14	4.6	4.26	4.94	4.22	4.4	4.1	4.15	4.13	6.69
18/10	4.65	4.73	4.22	4.57	4.53	4.91	4.22	4.41	4.11	4.14	4.12	6.66
21/10	4.61	4.67	4.08	4.53	4.19	4.85	4.08	4.34	3.98	4.08	4.04	6.66
22/10	4.68	4.72	4.55	4.56	4.87	4.88	4.4	4.42	4.11	4.13	4.04	4.76
23/10	4.62	4.7	4.53	5.08	4.26	4.87	4.23	4.33	4.1	4.1	4.11	4.58
24/10	4.62	4.72	4.55	5.07	4.27	4.86	4.15	4.34	4.13	4.13	4.14	6.7
25/10	4.6	4.71	4.55	4.6	4.27	4.89	4.18	4.35	3.98	4.11	4.08	6.79
28/10	4.78	4.78	4.61	5.1	4.81	4.92	4.46	4.48	4.2	4.22	6.7	6.7
29/10	4.7	4.79	4.18	4.67	4.22	5.01	4.25	4.42	4.17	4.24	4.23	6.72
30/10	4.74	4.79	4.2	4.67	4.35	5.09	3.97	4.47	4.15	4.22	4.2	6.84
31/10	4.71	4.8	4.22	4.69	4.35	5.1	4.31	4.47	4.12	4.23	4.2	6.69

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2013												
1-Nov	4.72	4.81	4.22	4.71	4.34	5.13	4.29	4.49	4.12	4.24	4.21	6.71
4-Nov	4.73	4.83	4.33	4.72	4.36	5.2	4.24	4.53	4.18	4.32	6.62	6.7
5-Nov	4.73	4.81	4.24	4.82	4.4	5.4	4.31	4.55	4.19	4.29	4.24	6.7
6-Nov	4.76	4.82	4.26	4.82	4.41	5.45	4.4	4.56	4.19	4.27	4.24	6.71
7-Nov	4.76	4.83	4.27	4.83	4.42	5.48	4.36	4.55	4.18	4.29	4.26	6.7
8-Nov	4.76	4.83	4.27	4.83	4.42	5.48	4.36	4.55	4.18	4.29	4.26	6.7
11-Nov	4.69	4.74	4.16	4.62	4.23	5.15	4.18	4.39	4.09	4.17	4.1	6.7
12-Nov	4.68	4.78	4.17	4.76	4.25	5.43	4.21	4.52	4.1	4.19	4.2	6.71
13-Nov	4.68	4.77	4.19	4.62	4.25	5.14	4.25	4.42	4.08	4.17	4.16	6.69
18-Nov	4.67	4.76	4.17	4.76	4.27	5.3	4.22	4.48	4.05	4.21	4.13	6.72
19-Nov	4.66	4.77	4.18	4.76	4.32	5.35	4.24	4.47	4.07	4.21	4.2	6.7
20-Nov	4.69	4.78	4.18	4.66	4.32	5.1	4.25	4.46	4.14	4.22	4.2	6.76
21-Nov	4.69	4.8	4.23	4.8	4.35	5.47	4.25	4.53	4.12	4.26	4.24	6.7
22-Nov	4.72	4.84	4.23	4.83	4.34	5.39	4.3	4.49	4.12	4.28	4.25	6.68
25-Nov	4.76	4.84	4.26	4.87	4.33	5.35	4.3	4.55	4.1	4.31	4.24	6.7
26-Nov	4.76	4.84	4.24	4.83	4.35	5.47	4.29	4.55	4.1	4.22	4.2	6.7
27-Nov	4.69	4.79	4.19	4.76	4.27	5.3	4.22	4.37	4.05	4.19	4.13	6.7
28-Nov	4.62	4.74	4.14	4.69	4.19	5.13	4.15	4.19	4	4.16	4.06	6.7
29-Nov	4.64	4.78	4.11	4.64	4.2	5.04	4.16	4.4	4	4.16	4.06	6.73

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2013												
2-Dec	4.57	4.65	3.99	4.59	4.09	5.19	4.07	4.28	3.87	4.06	3.9	6.7
3-Dec	4.56	4.64	3.99	4.61	4.09	5.24	4.04	4.34	3.85	4.01	3.96	6.8
4-Dec	4.51	4.59	3.97	4.62	4.12	5.35	4.06	4.31	3.87	4	4	6.68
5-Dec	4.53	4.6	3.96	4.59	4.11	5.3	4.05	4.33	3.88	4.01	4.02	6.68
6-Dec	4.5	4.61	3.97	4.56	4.1	5.34	4.08	4.32	3.87	4.01	4	6.68
13-Dec	4.28	4.57	3.75	4.6	3.88	5.11	3.89	4.29	3.62	4	3.74	6.72
16-Dec	4.29	4.39	3.78	4.31	3.93	5.09	3.93	4.13	3.68	3.83	3.78	6.68
17-Dec	4.26	4.35	3.73	4.36	3.88	5.04	3.89	4.09	3.6	3.75	3.73	6.68
18-Dec	4.23	4.34	3.74	4.37	3.91	5.07	3.89	4.09	3.64	3.77	3.73	6.68

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
14-Jan	4.1	4.18	3.65	4.15	3.83	4.6	3.84	4.01	3.55	3.7	3.7	6.25
15-Jan	4.1	4.19	3.67	4.09	3.86	4.43	3.86	4.04	3.57	3.7	3.72	6.7
16-Jan	4.14	4.24	3.69	4.28	3.86	4.78	3.87	4.08	3.58	3.74	3.72	6.74
17-Jan	4.15	4.25	3.71	4.31	3.88	4.77	3.89	4.09	3.6	3.71	3.77	6.73
20-Jan	4.18	4.29	3.73	4.31	3.9	4.84	3.89	4.11	3.63	3.79	3.71	6.7
21-Jan	4.19	4.28	3.74	4.17	3.93	4.84	3.92	4.1	3.63	3.79	3.79	6.7
22-Jan	4.21	4.33	3.77	4.32	3.94	4.79	3.93	4.07	3.65	3.8	3.8	6.7
23-Jan	4.23	4.28	3.76	4.3	3.93	4.8	3.94	4.07	3.66	3.8	3.82	6.7
24-Jan	4.26	4.36	3.79	4.38	3.92	4.9	3.92	4.13	3.68	3.86	3.84	6.7
27-Jan	4.24	4.34	3.79	4.35	3.94	4.86	3.92	4.09	3.74	3.86	3.82	6.7
28-Jan	4.3	4.41	3.86	4.47	4.02	5.11	4.03	4.25	3.75	3.92	3.89	6.7
29-Jan	4.32	4.43	3.9	4.48	4.05	5.05	4.03	4.27	3.78	3.95	3.93	6.7
30-Jan	4.35	4.46	3.9	4.47	4.07	5.06	4.05	4.25	3.8	3.91	3.94	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
3-Feb	4.38	4.49	3.96	4.57	3.92	4.98	4.15	4.34	3.85	4.01	3.9	6.7
4-Feb	4.41	4.51	3.99	4.55	3.99	4.89	4.2	4.28	3.9	4.04	4	6.7
5-Feb	4.41	4.51	3.99	4.55	3.99	4.89	4.2	4.28	3.9	4.04	4	6.7
6-Feb	4.44	4.55	4.03	4.61	4.02	5.02	4.24	4.39	3.92	4.07	4.03	6.7
7-Feb	4.47	4.57	4.05	4.63	4.05	4.96	4.26	4.4	4	4.09	4.09	6.71
10-Feb	4.48	4.57	4.07	4.61	4.06	4.98	4.25	4.37	3.97	4.07	4.09	6.68
11-Feb	4.52	4.63	4.08	4.65	4.06	5.01	4.28	4.38	3.98	4.13	4.08	6.72
12-Feb	4.52	4.62	4.1	4.67	4.09	4.97	4.29	4.41	4	4.15	4.1	6.72
13-Feb	4.54	4.65	4.09	4.69	4.06	4.98	4.28	4.43	4	4.16	4.08	6.72
14-Feb	4.55	4.64	4.11	4.67	4.09	4.96	4.31	4.42	4.01	4.15	4.16	6.72
17-Feb	4.55	4.64	4.11	4.67	4.09	4.96	4.31	4.42	4.01	4.15	4.16	6.72
18-Feb	4.52	4.59	4.04	4.57	3.99	4.76	4.21	4.28	3.95	4.15	3.98	6.7
19-Feb	4.52	4.59	4.04	4.57	3.99	4.76	4.21	4.28	3.95	4.15	3.98	6.7
20-Feb	4.58	4.68	4.15	4.72	4.13	4.99	4.34	4.45	4.05	4.19	4.15	6.7
21-Feb	4.6	4.7	4.12	4.7	4.08	4.95	4.3	4.42	4.02	4.17	4.05	6.7
24-Feb	4.6	4.7	4.13	4.7	4.08	4.95	4.3	4.42	4.02	4.17	4.12	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
17-Mar	4.4	4.53	3.9	4.5	4.03	4.89	4.02	4.23	3.82	3.98	3.82	6.7
18-Mar	4.41	4.55	3.92	4.52	4.05	4.9	4.05	4.29	3.82	4	3.91	6.7
19-Mar	4.44	4.59	3.94	4.54	4.07	4.92	4.07	4.31	3.84	4.02	3.93	6.7
20-Mar	4.48	4.59	3.96	4.56	4.09	4.94	4.06	4.32	3.86	4.04	3.95	6.7
21-Mar	4.48	4.59	3.96	4.54	4.09	4.9	4.06	4.32	3.86	4.03	3.95	6.7
24-Mar	4.43	4.56	3.94	4.53	4.05	4.92	4.07	4.28	3.85	4	3.94	6.7
25-Mar	4.43	4.56	3.93	4.52	4.05	4.91	4.05	4.29	3.83	4	3.91	6.7
26-Mar	4.43	4.55	3.91	4.52	4.04	4.89	4.04	4.29	3.82	4	3.87	6.7
27-Mar	4.44	4.56	3.93	4.53	4.05	4.88	4.05	4.27	3.83	4	3.92	6.7
28-Mar	4.5	4.62	3.92	4.53	4.06	4.87	4.06	4.28	3.82	4.01	3.95	6.7
31-Mar	4.46	4.56	3.94	4.53	4.06	4.87	4.04	4.28	3.82	4.01	3.94	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
1-Apr	4.43	4.51	3.93	4.47	4.04	4.8	4.05	4.27	3.82	3.97	3.89	6.7
2-Apr	4.41	4.5	3.91	4.47	4.03	4.8	4.03	4.26	3.82	3.97	3.89	6.7
3-Apr	4.39	4.49	3.87	4.42	3.98	4.75	3.98	4.16	3.76	3.9	3.84	6.7
4-Apr	4.41	4.49	3.87	4.45	3.97	4.77	3.99	4.18	3.8	3.93	3.84	6.71
7-Apr	4.37	4.47	3.86	4.48	3.98	4.87	4	4.19	3.77	3.91	3.83	6.7
8-Apr	4.37	4.47	3.86	4.48	3.98	4.87	4	4.19	3.77	3.91	3.83	6.7
9-Apr	4.39	4.51	3.87	4.5	4.01	4.89	4.01	4.26	3.77	3.94	3.82	6.7
10-Apr	4.39	4.51	3.88	4.48	3.99	4.83	4.01	4.22	3.77	3.93	3.83	6.81
11-Apr	4.39	4.5	3.87	4.5	3.98	4.86	4	4.24	3.76	3.92	3.82	6.81
14-Apr	4.38	4.49	3.85	4.48	3.97	4.85	4	4.24	3.77	3.9	3.84	6.76
15-Apr	4.39	4.49	3.87	4.49	3.99	4.87	4.01	4.2	3.78	3.9	3.82	6.77

16-Apr	4.39	4.49	3.87	4.49	3.99	4.87	4.01	4.2	3.78	3.9	3.82	6.77
22-Apr	4.37	4.49	3.85	4.45	3.98	4.85	3.98	4.2	3.76	3.94	3.77	6.7
23-Apr	4.4	4.49	3.89	4.47	4.01	4.89	4.04	4.2	3.77	3.91	3.87	6.7
24-Apr	4.41	4.5	3.9	4.48	4.03	4.88	4.04	4.2	3.79	3.94	3.87	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
6-May	4.42	4.53	3.92	4.54	4.04	4.97	3.98	4.2	3.76	3.94	3.77	6.7
7-May	4.44	4.54	3.95	4.56	4.08	5.07	4.08	4.3	3.84	4	3.92	6.7
8-May	4.45	4.55	3.97	4.57	4.08	5.07	4.08	4.3	3.86	4.02	3.9	6.7
9-May	4.46	4.55	3.99	4.59	4.09	5.09	4.09	4.32	3.87	4.03	3.92	6.7
12-May	4.47	4.56	3.99	4.59	4.09	5.09	4.08	4.3	3.87	4.04	3.91	6.7
13-May	4.53	4.62	4.05	4.64	4.15	5.19	4.13	4.39	3.94	4.09	4.04	6.7
14-May	4.52	4.63	4.07	4.64	4.16	5.19	4.14	4.4	3.94	4.09	4	6.7
15-May	4.54	4.65	4.07	4.68	4.18	5.2	4.17	4.4	3.95	4.12	4.06	6.7
16-May	4.61	4.69	4.05	4.72	4.17	5.24	4.14	4.44	3.93	4.16	4.05	6.7
19-May	4.61	4.7	4.16	4.72	4.65	5.26	4.2	4.42	4	4.17	4.14	6.7
20-May	4.61	4.7	4.13	4.72	4.25	5.26	4.21	4.42	4.03	4.17	4.06	6.7
21-May	4.61	4.7	4.13	4.72	4.25	5.26	4.21	4.42	4.03	4.17	4.06	6.7
22-May	4.61	4.7	4.13	4.72	4.25	5.26	4.21	4.42	4.03	4.17	4.06	6.7
23-May	4.61	4.7	4.13	4.72	4.25	5.26	4.21	4.42	4.03	4.17	4.06	6.7
26-May	4.61	4.7	4.13	4.72	4.25	5.26	4.21	4.42	4.03	4.17	4.06	6.7
27-May	4.58	4.74	4.1	4.77	4.2	5.36	4.18	4.47	4.02	4.22	4.04	6.7
28-May	4.58	4.74	4.1	4.77	4.2	5.36	4.18	4.47	4.02	4.22	4.04	6.7
29-May	4.58	4.74	4.1	4.77	4.2	5.36	4.18	4.47	4.02	4.22	4.04	6.7
30-May	4.56	4.72	4.1	4.76	4.26	5.29	4.18	4.41	4.02	4.19	4	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
2-Jun	4.58	4.78	4.11	4.78	4.25	5.35	4.2	4.42	4.03	4.24	4.02	6.7
3-Jun	4.68	4.77	4.2	4.78	4.31	5.32	4.28	4.43	4.1	4.24	4.13	6.7
4-Jun	4.69	4.78	4.21	4.81	4.31	5.41	4.28	4.43	4.11	4.26	4.17	6.7
5-Jun	4.69	4.79	4.22	4.82	4.33	5.42	4.29	4.44	4.12	4.26	4.2	6.7
6-Jun	4.71	4.8	4.22	4.82	4.32	5.42	4.3	4.44	4.12	4.27	4.21	6.7
9-Jun	4.7	4.8	4.2	4.82	4.32	5.44	4.3	4.47	4.12	4.28	4.21	6.7
10-Jun	4.72	4.81	4.26	4.8	4.36	5.39	4.32	4.52	4.16	4.28	4.21	6.7
11-Jun	4.73	4.82	4.27	4.81	4.36	5.4	4.33	4.53	4.17	4.29	4.21	6.7
12-Jun	4.73	4.82	4.27	4.81	4.36	5.4	4.33	4.53	4.17	4.29	4.21	6.7
13-Jun	4.73	4.82	4.27	4.87	4.36	5.4	4.33	4.53	4.17	4.29	4.21	6.7
16-Jun	4.74	4.82	4.27	4.87	4.36	5.45	4.35	4.55	4.17	4.32	4.21	6.7
17-Jun	4.74	4.82	4.27	4.87	4.36	5.45	4.35	4.55	4.17	4.32	4.25	6.7
18-Jun	4.74	4.82	4.27	4.87	4.36	5.45	4.35	4.55	4.17	4.32	4.25	6.7
23-Jun	4.74	4.82	4.27	4.87	4.36	5.45	4.35	4.57	5.22	4.32	4.25	6.7
24-Jun	4.84	4.9	4.32	4.91	4.47	5.47	4.35	4.6	4.26	4.37	4.27	6.7
25-Jun	4.8	4.91	4.36	4.92	4.47	5.5	4.41	4.62	4.27	4.39	4.3	6.7
26-Jun	4.84	4.92	4.37	4.92	4.49	5.5	4.42	4.62	4.27	4.39	4.34	6.7
27-Jun	4.84	4.92	4.37	4.92	4.48	5.55	4.42	4.68	4.27	4.39	4.35	6.7
30-Jun	4.84	4.95	4.36	4.99	4.47	5.55	4.42	4.7	4.28	4.42	4.35	6.7

Data	Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5		Poço de Produção	
	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)	NA (manha)	NA (tarde)
2014												
1-Jul	4.88	4.96	4.4	5	4.51	5.69	4.44	4.67	4.31	4.44	4.37	6.8
2-Jul	4.88	4.96	4.39	5.01	4.5	5.69	4.44	4.67	4.31	4.44	4.33	6.8
3-Jul	4.88	4.96	4.39	5.01	4.5	5.69	4.44	4.67	4.31	4.44	4.33	6.8
7-Jul	4.86	4.99	4.38	5.02	4.5	5.69	4.44	4.72	4.31	4.44	4.33	6.8
8-Jul	4.89	4.99	4.41	5.02	4.53	5.67	4.47	4.72	4.34	4.46	4.35	6.8
9-Jul	4.91	4.99	4.42	5.02	4.52	5.67	4.45	4.72	4.34	4.46	4.37	6.8
10-Jul	4.91	4.99	4.42	5.03	4.54	5.7	4.47	4.69	4.34	4.46	4.38	6.8
11-Jul	4.9	5.01	4.41	5.02	4.54	5.68	4.47	4.69	4.34	4.47	4.41	6.8
14-Jul	4.89	5	4.41	5.04	4.53	5.72	4.47	4.7	4.34	4.48	4.41	6.8
15-Jul	4.92	5.01	4.43	5.06	4.54	5.77	4.47	4.7	4.36	4.49	4.41	6.8
16-Jul	4.92	5.01	4.43	5.06	4.54	5.77	4.48	4.7	4.36	4.49	4.38	6.8
17-Jul	4.93	5.02	4.44	5.07	4.55	5.77	4.48	4.7	4.36	4.5	4.41	6.8
23-Jul	4.94	5.01	4.44	5.07	4.55	5.77	4.48	4.7	4.38	4.5	4.41	6.8
28-Jul	4.92	4.99	4.4	4.86	4.53	5.21	4.42	4.56	4.3	4.42	4.32	6.8
29-Jul	4.88	4.95	4.35	4.76	4.42	5.08	4.37	4.5	4.25	4.35	4.3	6.8
30-Jul	4.86	4.95	4.33	4.76	4.39	5.08	4.34	4.5	4.22	4.35	4.3	6.8
19-Aug	4.92	4.99	4.42	4.87	4.53	5.2	4.47	4.61	4.36	4.46	4.39	6.2
20-Aug	4.93	5	4.45	4.87	4.55	5.19	4.48	4.61	4.37	4.46	4.45	6.2
21-Aug	4.94	5.02	4.46	4.87	4.56	5.2	4.5	4.64	4.38	4.46	4.46	6.2
22-Aug	4.95	5.02	4.48	4.87	4.56	5.2	4.5	4.64	4.38	4.46	4.47	6.7
25-Aug	4.96	5.02	4.48	4.91	4.56	5.24	4.5	4.69	4.38	4.48	4.48	6.7
26-Aug	4.98	5.05	4.52	5.06	4.57	5.31	4.5	4.69	4.4	4.48	3.49	6.7
27-Aug	4.98	5.07	4.52	5.07	4.62	5.36	4.51	4.7	4.4	4.49	4.5	6.7
28-Aug	4.98	5.07	4.54	5.07	4.62	5.38	4.51	4.7	4.42	4.5	4.5	6.7
29-Aug	4.98	5.07	4.54	5.12	4.65	5.38	4.52	4.7	4.42	4.5	4.5	6.7

Apêndice D – Resultados estatísticos obtidos no SPSS

Apêndice D (1) – Resultados estatísticos para o parâmetro Condutividade elétrica

Testes estatísticos

Um teste Kolmogorov-Smirnov de uma amostra

		poço sem outliers	condutividade na lagoa
N		214	26
Normal Parameters ^{a,b}	Média	79,3879	61,8462
	Desvio padrão	11,56748	4,07620
Most Extreme Differences	Absoluto	,191	,135
	Positive	,191	,135
	Negative	-,114	-,089
Kolmogorov-Smirnov Z		2,793	,688
Sig. Assint. (2 caudas)		,000	,731
Sig exata (2 extremidades)		,000	,681
Probabilidade de ponto		,000	,000

a. A distribuição do teste é Normal.

b. Calculado dos dados.

Mann-Whitney Test

Classificações

SEMESTRE coletado no poço sem outliers	N	Mean Rank	Sum of Ranks
	107	133,07	14238,50
poço sem outliers	107	81,93	8766,50
	214		

Test Statistics^a

	poço sem outliers
Mann-Whitney U	2988,500
Wilcoxon W	8766,500
Z	-6,049
Sig. Assint. (2 caudas)	,000

a. Variável de agrupamento: semestre coletado no poço filtrado

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coleta lago	N	Média	Desvio padrão
condutividade no lago	1	66,3750	2,72226
	2	59,8333	2,72785

Estatísticas de grupo

semestre coleta lago	Erro padrão da média
condutividade no lago	,96247
	,64296

Teste de amostras independentes

		condutividade no lago
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	deF	,045
	Sig.	,833
	t	5,647
	df	24
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	6,54167
	Erro padrão de diferença	1,15842
	95% Intervalo de confiança da diferença	4,15080
	daInferior Superior	8,93253

Teste de amostras independentes

		condutividade no lago
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	deF	
	Sig.	
	t	5,652
	df	13,532
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	6,54167
	Erro padrão de diferença	1,15747
	95% Intervalo de confiança da diferença	4,05106
	daInferior Superior	9,03227

Mann-Whitney Test

Classificações

gupos: 1 poço, 2 lago	N	Mean Rank	Sum of Ranks
condutividade poço e lago	214	132,90	28441,00
	26	18,42	479,00
	240		

Test Statistics^a

	condutividade poço e lago
Mann-Whitney U	128,000
Wilcoxon W	479,000
Z	-7,947
Sig. Assint. (2 caudas)	,000

a. Variável de agrupamento: gupos: 1 poço, 2 lago

Apêndice D (2) – Resultados estatísticos para o parâmetro pH

Um teste Kolmogorov-Smirnov de uma amostra

		ph no poço sem outliers	ph na lago
N		215	26
Normal Parameters ^{a,b}	Média	5,6170	6,2477
	Desvio padrão	,26102	,27225
Most Extreme Differences	Absoluto	,063	,088
	Positive	,063	,088
	Negative	-,045	-,086
Kolmogorov-Smirnov Z		,925	,447
Sig. Assint. (2 caudas)		,359	,988
Sig exata (2 extremidades)		,344	,978
Probabilidade de ponto		,000	,000

a. A distribuição do teste é Normal.

b. Calculado dos dados.

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre poco ph filtrado		N	Média	Desvio padrão
ph no poço sem outliers	1	108	5,6168	,27315
	2	107	5,6172	,24946

Estatísticas de grupo

semestre poco ph filtrado		Erro padrão da média
ph no poço sem outliers	1	,02628
	2	,02412

Teste de amostras independentes

		ph no poço sem outliers
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	1,391
	Sig.	,240
	t	-,012
	df	213
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,990
	Diferença média	-,00044
	Erro padrão de diferença	,03569
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior

Teste de amostras independentes

		ph no poço sem outliers
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	-,012
	df	211,605
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,990
	Diferença média	-,00044
	Erro padrão de diferença	,03567
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coleta lagoa		N	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média
ph na lagoa	1	8	6,5088	,16287	,05758
	2	18	6,1317	,22750	,05362

Teste de amostras independentes

		ph no lago
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para	F	,346
Igualdade de variâncias	Sig.	,562
	t	4,212
	df	24
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de	Diferença média	,37708
Médias	Erro padrão de diferença	,08953
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior
		,19230 ,56187

Teste de amostras independentes

		ph na lago
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	4,792
	df	18,634
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	,37708
	Erro padrão de diferença	,07868
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior
		,21218 ,54199

Estatísticas de grupo

gupos: 1 poço, 2 lagoa		N	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média
ph poço e lagoa	1	215	5,6170	,26102	,01780
	2	26	6,2477	,27225	,05339

Teste de amostras independentes

		ph poço e lagoa
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	,203
	Sig.	,653
	t	-11,584
	df	239
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	-,63072
	Erro padrão de diferença	,05445
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior
		-,73797 -,52346

Teste de amostras independentes

		ph poço e lagoa	
		Variâncias iguais não assumidas	
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F		
	Sig.		
teste-t para Igualdade de Médias	t	-11,206	
	df	30,822	
	Sig. (2 extremidades)	,000	
	Diferença média	-,63072	
	Erro padrão de diferença	,05628	
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior	-,74553
		Superior	-,51590

Apêndice D (3) – Resultados estatísticos para o parâmetro Eh

Um teste Kolmogorov-Smirnov de uma amostra

		Potencial de oxirredução sem outliers	Potencial de oxirredução na lagoa
N		225	26
Normal Parameters ^{a,b}	Média	22,7162	-11,5308
	Desvio padrão	27,96200	23,70497
	Absoluto	,051	,108
Most Extreme Differences	Positive	,029	,108
	Negative	-,051	-,079
Kolmogorov-Smirnov Z		,765	,550
Sig. Assint. (2 caudas)		,602	,923
Sig exata (2 extremidades)		,584	,891
Probabilidade de ponto		,000	,000

a. A distribuição do teste é Normal.

b. Calculado dos dados.

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coletados no poço filtrado	N	Média	Desvio padrão
Potencial de oxirredução sem outliers ¹	119	19,2617	28,37656
2	106	26,5944	27,09915

Estatísticas de grupo

semestre coletados no poço filtrado	Erro padrão da média
1	2,60127
2	2,63210

Teste de amostras independentes

		Potencial de oxirredução sem outliers
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	,759
	Sig.	,384
	t	-1,976
	df	223
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,049
	Diferença média	-7,33268
	Erro padrão de diferença	3,71052
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior -14,64484
		Superior -,02051

Teste de amostras independentes

		Potencial de oxirredução sem outliers
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	-1,981
	df	221,907
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,049
	Diferença média	-7,33268
	Erro padrão de diferença	3,70062
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior -14,62553
		Superior -,03982

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coleta lagoa	N	Média	Desvio padrão
Potencial de oxirredução na lagoa 1	8	-37,8875	10,77158
2	18	,1833	17,50389

Estatísticas de grupo

semestre coleta lagoa	Erro padrão da média
Potencial de oxirredução na lagoa 1	3,80833
2	4,12571

Teste de amostras independentes

	Potencial de oxirredução na lagoa

		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	1,410
	Sig.	,247
	t	-5,657
	df	24
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	-38,07083
	Erro padrão de diferença	6,73016
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior -51,96120
		Superior -24,18047

Teste de amostras independentes

		Potencial de oxirredução na lagoa
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	-6,781
	df	21,103
	Sig. (2 extremidades)	,000
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	-38,07083
	Erro padrão de diferença	5,61470
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior -49,74375
		Superior -26,39791

Teste-T

Estatísticas de grupo

grupos: 1 poço, 2 lagoa	N	Média	Desvio padrão
Potencial oxirredução poço e lagoa	225	22,7162	27,96200
	26	-11,5308	23,70497

Estatísticas de grupo

grupos: 1 poço, 2 lagoa	Erro padrão da média
Potencial oxirredução poço e lagoa	1,86413
	4,64893

Teste de amostras independentes

		Potencial oxirredução poço e lagoa

		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	1,148
	Sig.	,285
	t	5,998
	df	249
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,000
	Diferença média	34,24696
	Erro padrão de diferença	5,70960
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior 23,00169
		Superior 45,49222

Teste de amostras independentes

		Potencial oxirredução poço e lagoa
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	6,837
	df	33,589
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,000
	Diferença média	34,24696
	Erro padrão de diferença	5,00874
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior 24,06337
		Superior 44,43054

Apêndice D (4) – Resultados estatísticos para o Parâmetro Temperatura (T)

Um teste Kolmogorov-Smirnov de uma amostra

		Temperatura no poço sem outliers	Temperatura na lagoa
N		225	22
Normal Parameters ^{a,b}	Média	23,1197	23,4909
	Desvio padrão	1,04904	2,73274
Most Extreme Differences	Absoluto	,047	,225
	Positive	,047	,225
	Negative	-,036	-,111
Kolmogorov-Smirnov Z		,706	1,053
Sig. Assint. (2 caudas)		,701	,217
Sig exata (2 extremidades)		,683	,187
Probabilidade de ponto		,000	,000

a. A distribuição do teste é Normal.

b. Calculado dos dados.

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coletados no poço temperatura filtrado	N	Média	Desvio padrão
Temperatura no poço sem outliers	118	23,1671	1,18761
	107	23,0675	,87380

Estatísticas de grupo

semestre coletados no poço temperatura filtrado	Erro padrão da média
1	,10933
2	,08447

Teste de amostras independentes

		Temperatura no poço sem outliers	
		Variâncias iguais assumidas	
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	12,825	
	Sig.	,000	
	t	,711	
	df	223	
	Sig. (2 extremidades)	,478	
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	,09964	
	Erro padrão de diferença	,14019	
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior	-,17663 ,37592

Teste de amostras independentes

		Temperatura no poço sem outliers	
		Variâncias iguais não assumidas	
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F		
	Sig.		
	t	,721	
	df	214,152	
	Sig. (2 extremidades)	,472	
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	,09964	
	Erro padrão de diferença	,13816	
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior	-,17269 ,37197

Teste-T

Estatísticas de grupo

semestre coleta lagoa		N	Média	Desvio padrão
Temperatura na lagoa	1	8	26,2375	2,42944
	2	14	21,9214	1,26109

Estatísticas de grupo

semestre coleta lagoa		Erro padrão da média
Temperatura na lagoa	1	,85894
	2	,33704

Teste de amostras independentes

		Temperatura na lagoa
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	5,171
	Sig.	,034
	t	5,531
	df	20
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,000
	Diferença média	4,31607
	Erro padrão de diferença	,78027
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior 2,68845
		Superior 5,94369

Teste de amostras independentes

		Temperatura na lagoa
		Variâncias iguais não assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	
	Sig.	
	t	4,678
	df	9,204
teste-t para Igualdade de Médias	Sig. (2 extremidades)	,001
	Diferença média	4,31607
	Erro padrão de diferença	,92269
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior 2,23582
		Superior 6,39632

Teste-T

Estatísticas de grupo

grupos: 1 poço, 2 lagoa		N	Média	Desvio padrão
temperatura poço e lagoa	1	225	23,1197	1,04904
	2	22	23,4909	2,73274

Estatísticas de grupo

grupos: 1 poço, 2 lagoa		Erro padrão da média
temperatura poço e lagoa	1	,06994
	2	,58262

Teste de amostras independentes

		temperatura poço e lagoa
		Variâncias iguais assumidas
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F	81,951
	Sig.	,000
	t	-1,295
	df	245
	Sig. (2 extremidades)	,197
teste-t para Igualdade de Médias	Diferença média	-,37118
	Erro padrão de diferença	,28661
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior Superior
		-,93572 ,19336

Teste de amostras independentes

		temperatura poço e lagoa	
		Variâncias iguais não assumidas	
Teste de Levene para igualdade de variâncias	F		
	Sig.		
teste-t para Igualdade de Médias	t	-,633	
	df	21,609	
	Sig. (2 extremidades)	,534	
	Diferença média	-,37118	
	Erro padrão de diferença	,58680	
	95% Intervalo de confiança da diferença	Inferior	-1,58941
		Superior	,84706