

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

JÚLIA PANZARIN SAVIETTO

Estudos sobre as Chuvas e Taxa de Infiltração na Região Norte da
Cidade de São Carlos (SP).

São Carlos/SP
2014

JÚLIA PANZARIN SAVIETTO

Estudos sobre as Chuvas e Taxa de Infiltração na Região Norte da
Cidade de São Carlos (SP).

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia
Ambiental da Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de
São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Lázaro
Valentin Zuquette

São Carlos/SP
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S267e Savietto, Júlia Panzarin
Estudos sobre as chuvas de infiltração na região
norte da cidade de São Carlos (SP) / Júlia Panzarin
Savietto; orientador Lázaro Valentin Zuquette. São
Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. São Carlos. 2. Brasil. 3. Formação Botucatu. 4.
Infiltração. 5. Recarga. I. Título.

FOLHA DE JUGAMENTO

Candidato(a): **Julia Panzarin Savietto**

Título da Monografia: **Estudo sobre as Chuvas e Taxa de Infiltração na Região Norte da Cidade de São Carlos (SP)**

Data da Defesa: 10/07/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Lazaro Valentin Zuquette (Orientador(a))

Marcilene Dantas Ferreira

Claudia Marisse dos Santos Rotta

Resultado:

APROVADA

APROVADA

Aprovada

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação
Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Dedico esse trabalho à minha mãe pelo apoio incondicional durante toda minha graduação. Muito obrigada por tudo!

RESUMO

SAVIETTO, J. P. **Estudos sobre as chuvas e taxa de infiltração na região norte de São Carlos (SP)**. 2014, 93 p. Monografia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

No presente trabalho apresenta-se uma análise de chuvas e infiltração da água no solo, na região norte do município de São Carlos (SP), que é constituído por materiais geológicos da Formação Botucatu. Para isso, foram analisados dados de monitoramento de tensiômetros, poços de monitoramento e de chuvas do período entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2010, assim como resultados de ensaios de infiltrômetro de duplo anel e permeâmetro de Guelph modificado. Para os materiais inconsolidados, foram obtidos índices físicos, curva granulométrica e curva de retenção de água do solo. Foi desenvolvida uma análise correlacionando as curvas de retenção de água no solo com dados de tensiômetros, de pluviógrafos e de poços de monitoramento. Após a análise verificou-se que, a partir da caracterização geológico-geotécnica, as amostras utilizadas no estudo são todas de caráter arenoso e que, pelos ensaios de infiltração, as taxas deste fenômeno mostram-se intensas. Por fim, pelo estudo de monitoramento, é possível observar grande concordância entre os ensaios, além de verificar que existe uma recarga confirmada pelos registros dos tensiômetros mais profundos e pela variação do nível de água dos poços de monitoramento.

Palavras-chave: Infiltração, Recarga, Formação Botucatu, São Carlos, Brasil.

ABSTRACT

SAVIETTO, J.P. **Studies of rainfall and infiltration rate in the northern region of São Carlos (SP)**. 2014, 93 p. Monograph. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The purpose of this study was an analysis of rainfall and infiltration of water in the soil in northern of São Carlos (SP), which is characterized by Botucatu Formation geological materials. Tensiometer data, water depth data (monitoring wells) and rainfall data for the period between January 2009 and February 2010 were analysed. Infiltration and hydraulic conductivity measurements were obtained using double ring infiltrometer and Guelph modified permeameter. Physical properties, grain size distribution and soil water retention curve were also obtained. The data analysis was performed correlating soil water retention curves with data from tensiometers, pluviometer and monitoring wells. It was found from the geological and geotechnical characterization, all sample shows sandy character and intense infiltration rates. The monitoring results demonstrate a close agreement between the infiltration tests. The results also suggest a confirmed recharge because of the deeper tensiometer data evidences and the variation of water level in the monitoring wells.

Keywords: Infiltration, Water Recharge, Botucatu Formation, São Carlos, Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo (Fonte: FAGUNDES, 2010).....	18
Figura 2 – Divisão do Estado de São Paulo em UGRHIs (Fonte: CETESB 2007).....	19
Figura 3 – Delimitação do afloramento da Formação Botucatu (Fonte: FAGUNDES, 2010). 19	
Figura 4 - Delimitação do Aquífero Guarani (Fonte: CETESB, 2004).....	21
Figura 5 - Ciclo hidrológico simplificado (Modificado de USGS: http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html).....	23
Figura 6 - Tipos de aquíferos (Fonte: FAGUNDES, 2010).	25
Figura 7 - Perfil de umedecimento do solo durante infiltração de água (modificado de BRANDÃO <i>et al.</i> , 2006).	29
Figura 8 – Variação da taxa de infiltração potencial ao longo do tempo. (Fonte: BRANDÃO <i>et al.</i> , 2006).....	30
Figura 9 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no estudo.	33
Figura 10 – Infiltrômetro de Duplo Anel.	35
Figura 11 – Permeâmetro de Guelph modificado.....	36
Figura 12 - Relação entre fator de forma e H/a para diferentes tipos de solo. (Fonte: REINOLDS & ELRIK, 1985).	38
Figura 13 - Peneiras e agitadores utilizados no ensaio de peneiramento.	40
Figura 14 - Provetas utilizadas no ensaio de sedimentação.....	42
Figura 15- Anel contendo material indeformado utilizado para o método de papel filtro.	44
Figura 16 – Gráfico representando o fenômeno de Histerese (modificado de FAGUNDES, 2010).....	44
Figura 17 - Processo de saturação dos corpos de prova de maneira indireta.	45
Figura 18 – Exemplos de curvas de retenção. (Fonte: KOOREVAAR <i>et.al</i> , 1983).	46
Figura 19 - Ilustração de um tensiômetro (Fonte: FAGUNDES, 2010).....	47
Figura 20 – Pluviógrafos (a) Detalhe do pluviógrafo; (b) Pluviógrafo instalado em campo (Fonte: FAGUNDES, 2010).	48
Figura 21 - Representação de um poço de monitoramento (modificado de FAGUNDES, 2010).....	49
Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica da amostra do local Fênix.	57
Figura 23 - Curva de distribuição granulométrica do local do Aracê, Ponto 1.	58
Figura 24 – Curva de distribuição granulométrica do local do Aracê, Ponto 2.	59

Figura 25 – Gráfico da taxa de infiltração no local Fênix a partir do ensaio de duplo anel.....	60
Figura 26 - Teor de Umidade em relação à profundidade no local Fênix.	61
Figura 27 – Gráfico da taxa de infiltração no local Aracê a partir do ensaio de duplo anel. ...	62
Figura 28- Teor de Umidade em relação à profundidade no local Aracê.....	63
Figura 29 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 0,5m.	67
Figura 30 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 1,0m.	68
Figura 31 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 1,5m.	68
Figura 32 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 1, profundidade de 0,5m.	69
Figura 33 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 2, profundidade de 1,0m	69
Figura 34 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 1, profundidade de 1,5m.	70
Figura 35 - Precipitações mensais no local Fênix.	73
Figura 36 - Precipitações mensais no local Aracê.	73
Figura 37 - Localização e documentação da área de estudo (Fonte: Modificado de Fagundes, 2010).	86
Figura 38- Diferença de nível da região saturada em várias localizações nos anos de 2009 e 2010, calculados a partir de poços de monitoramento.....	87
Figura 39 – Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Primeira parte do local Fênix.	88
Figura 40 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Segunda parte do local Fênix.	89
Figura 41 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Terceira parte do local Fênix.	90
Figura 42 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Primeira parte do local Aracê.....	91
Figura 43 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Segunda parte do local Aracê.....	92
Figura 44 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Terceira parte do local Aracê.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas de localização geográfica dos poços de monitoramento.....	50
Tabela 2 - Umidades gravimétricas da amostra do Fênix em diferentes profundidades.....	51
Tabela 3 - Dimensões dos cilindros e massas das amostras do local Fênix.	52
Tabela 4 - Massa específica dos os sólidos e outros índices físicos das amostras do local Fênix para cada profundidade.....	52
Tabela 5 - Umidades gravimétricas da amostra do Aracê (Ponto 1 e Ponto 2).....	53
Tabela 6 - Dimensões dos cilindros e massas das amostras do Aracê (Ponto 1 e Ponto2).	53
Tabela 7 - Massa específica dos os sólidos e outros índices físicos das amostras do Aracê (Ponto 1 e Ponto 2) para cada profundidade.....	53
Tabela 8 - Calibração do picnômetro usado para obtenção da massa específica dos sólidos. .	54
Tabela 9 - Valores necessários para o cálculo da massa específica do solo do Fênix.....	54
Tabela 10 - Valores necessários para o cálculo da massa específica do solo do Aracê.	55
Tabela 11 – Ensaio de peneiramento para estudo granulométrico da amostra do local Fênix.	56
Tabela 12 - Etapa de sedimentação para estudo granulométrico da amostra do local Fênix. ..	56
Tabela 13 - Ensaio de peneiramento para estudo granulométrico do material do local do Aracê.....	57
Tabela 14 - Etapa de sedimentação para estudo granulométrico do material do local do Aracê.	58
Tabela 15 - Valores obtidos no ensaio de teor de umidade em diferentes profundidades para o local Fênix.	61
Tabela 16- Valores obtidos no ensaio de teor de umidade em diferentes profundidades para o local do Aracê.....	63
Tabela 17 - Dimensões do aparelho de Guelph modificado.....	64
Tabela 18 - Taxas de infiltração obtidas pelo permeâmetro de Guelph Modificado no local Fênix.	65
Tabela 19 - Valores dos parâmetros Kfs e ϕ Gm do local Fênix.....	65
Tabela 20 - Taxas de infiltração obtidas pelo permeâmetro Guelph Modificado no local Aracê.....	66
Tabela 21 - Valores dos parâmetros Kfs e ϕ Gm do local Aracê.	66
Tabela 22 - Valores dos parâmetros das curvas de retenção dos solos.	67
Tabela 23 - Resumo dos dados do Fênix.	71

Tabela 24 - Resumo dos dados do Aracê.	72
Tabela 25 - Precipitações diárias no ano de 2009 na área do Fênix (valores em mm).....	74
Tabela 26 - Precipitações diárias no ano de 2009 na área do Aracê (valores em mm).	75
Tabela 27 - Precipitações diárias nos meses de janeiro e fevereiro de 2010 (valores em mm).	76
Tabela 28 - Precipitação diária média dividida em períodos.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	JUSTIFICATIVA	17
3	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO.....	18
3.1	LOCALIZAÇÃO	18
3.2	HIDROGRAFIA.....	18
3.3	GEOLOGIA.....	19
3.4	CLIMA	20
3.5	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
4.1	CICLO HIDROLÓGICO.....	22
4.2	HIDROGEOLOGIA	24
4.3	FASES DE UM MATERIAL GEOLÓGICO.....	25
4.3.1	Curva de retenção de água no solo	26
4.4	FENÔMENOS BÁSICOS DO CICLO HIDROGEOLÓGICO	26
4.4.1	Evapotranspiração	27
4.4.2	Infiltração	28
4.4.3	Recarga	31
5	MATERIAIS E MÉTODOS	33
5.1	ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO COM DUPLO ANEL	34
5.2	PERMEÂMETRO DE GUELPH	36
5.3	ÍNDICES FÍSICOS.....	38
5.4	ENSAIO DE GRANULOMETRIA	39
5.4.1	Ensaio de Peneiramento	39
5.4.2	Ensaio de Sedimentação.....	41
5.5	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA - MÉTODO DO PAPEL-FILTRO	43
5.6	MONITORAMENTO.....	46
5.6.1	Tensiômetros.....	47
5.6.2	Pluviógrafo.....	48
5.6.3	Poços de monitoramento	48

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
6.1	MAPA DE LOCALIZAÇÃO E DOCUMENTAÇÃO.....	50
6.2	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA.....	51
6.2.1	Índices físicos	51
6.2.2	Massa específica dos sólidos	54
6.2.3	Granulometria	55
6.3	ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO	59
6.3.1	Duplo anel	59
6.3.2	Infiltração com o Permeâmetro de Guelph modificado	64
6.4	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	66
6.5	DADOS DE CHUVAS	72
6.6	POÇOS DE MONITORAMENTO	76
6.7	DADOS DOS TENSÍOMETROS	77
6.8	CORRELAÇÃO ENTRE CURVA DE UMIDADE GRAVIMÉTICA DO SOLO E PLUVIÓGRAFOS.....	77
6.9	CORRELAÇÃO ENTRE POÇOS DE MONITORAMENTO E PLUVIÓGRAFOS	80
7	CONCLUSÕES.....	81
8	BIBLIOGRAFIA	82
	APÊNDICES	86

1 INTRODUÇÃO

É fato que a população mundial cresce cada vez mais e, como consequência, o consumo de água também apresenta uma tendência de crescimento. Com uma sociedade exigindo cada vez mais deste recurso devem-se buscar e estudar meios alternativos de captação de água que incluem estas encontradas em lençóis freáticos, tanto livres quanto confinados.

A captação de origem superficial, feita, por exemplo, em córregos e rios, normalmente é normalmente preferida basicamente devido aos menores custos de implantação do sistema. Entretanto, além de começar a surgir leis que limitam o volume de água a ser captado superficialmente a captação de água subterrânea apresenta menores custos em longo prazo por ser mais barato economicamente durante seu funcionamento.

Devido ao crescimento da demanda de água para consumo doméstico, industrial, agrícola, dentre outros setores, associado à crescente deterioração das águas, é crescente também a preocupação com a escassez de recursos hídricos superficiais. Tal cenário tem gerado, felizmente, o aumento de pesquisas a respeito de recursos subterrâneos (GOUVÊA, 2009).

Estima-se que no mundo existam 1.400 milhões de km³ de água, dos quais apenas 35 milhões, a 2,53% do total de água no mundo, sejam de caráter doce. Dessa parcela, aproximadamente 98,7% correspondem a águas subterrâneas, e apenas 0,9% corresponde ao volume de água doce superficial, que representa um valor menor ainda se comparado com o total de água no mundo (PERUCHI, 2009). Tais números fundamentam a necessidade de buscar outras fontes de água além da simples captação de água da superfície.

Entretanto, o estudo da ocorrência e da distribuição da água subterrânea no meio geológico é complexo, principalmente pelo fato de que tal recurso não se encontra distribuído uniformemente na natureza, o que torna o volume a ser explorável dependente de fatores ambientais de cada região, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. O conhecimento desses fatores e variáveis ambientais deve, portanto, nortear o gerenciamento das reservas no intuito de determinar a capacidade hídrica de cada região (FAGUNDES, 2010).

O estudo das águas subterrâneas é fundamental para seu manejo e gerenciamento. As informações obtidas pelo monitoramento de recursos hídricos são essenciais para identificar possíveis impactos que as atividades humanas podem causar na quantidade e na qualidade dos aquíferos. Somente por uma rede de monitoramento é possível observar todo o processo de interação entre aquíferos e o meio ambiente.

Se, por um lado, o estudo das águas subterrâneas se mostra essencial e imprescindível, por outro se revela uma tarefa bastante árdua. É possível, no entanto, reduzir as incertezas envolvidas por meio de um sistema de monitoramento integrado bem operado e de tecnologia avançada, que abranja o monitoramento dos recursos superficiais, dos recursos subterrâneos e o monitoramento hidrológico (MAZIERO, 2005).

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal aproveitar os dados de monitoramento de chuvas e infiltrações de água na região norte de São Carlos (SP) durante o período de fevereiro de 2009 até fevereiro de 2010, e a partir dos resultados de ensaios feitos em campo e em laboratório assim como de tensiômetros, pluviógrafos e poços de monitoramento, ao final, avaliar o possível fenômeno de recarga.

2.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de águas subterrâneas apresenta grande importância devido ao possível aproveitamento de tal recurso para sua utilização tanto em áreas urbanas quanto rurais. Não obstante o estudo também apresenta importância para o entendimento do comportamento da água na natureza, fortalecendo pesquisas geológicas e biológicas sobre o ciclo de água.

Além disso, ressalta-se a importância do estudo dos processos de infiltração e recarga devido ao recorrente fenômeno de contaminação da água em aquíferos livres, que ocorre principalmente nas porções de afloramento, caracterizadas como regiões de dinâmica intensa. (FAGUNDES, 2010).

Por sua vez, a seleção do local se justifica pelo possível grande potencial de recarga que a região apresenta. Trata-se de uma área de características geológicas ligadas à formação Botucatu, com extensão por volta de 180 km², que também detém grande presença de aquíferos livres.

3 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo, ilustrada pela Figura 1, abrange parte do aquífero Guarani, localiza-se no estado de São Paulo, dentro do município de São Carlos, limitada pelas latitudes 7566000 e 757600 m N e as longitudes 190000 e 216000 m W da zona UTM 23, totalizando uma área de aproximadamente 200 Km² (FAGUNDES, 2010). Tal município é conectado pelas Rodovias Washington Luis, Dr. Paulo Lauro e Rodovia Engenheiro Tales de Lorena Peixoto Júnior.

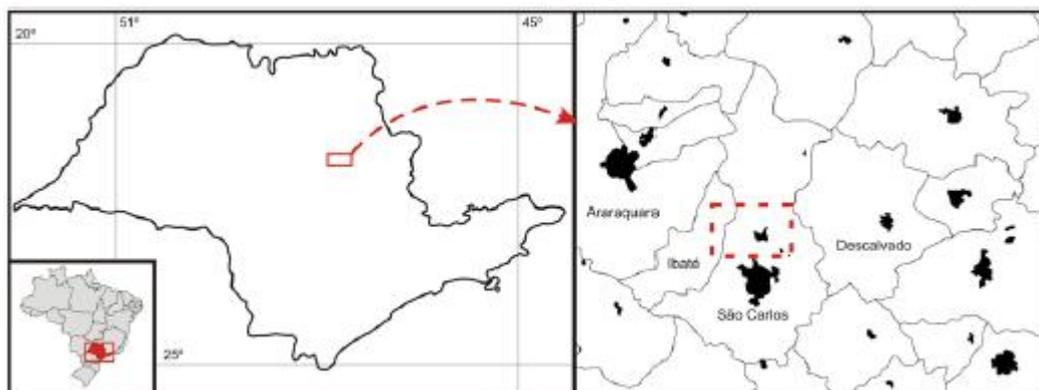


Figura 1 – Localização da área de estudo (Fonte: FAGUNDES, 2010).

3.2 HIDROGRAFIA

Pela divisão em Bacias Hidrográficas, feita pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos, plano que dividiu o estado de São Paulo em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), a região de estudo se encontra justamente na divisa entre as UGRHIs 9 e 13, referentes às unidades de Mogi-Guaçu e Tietê/Jacaré, respectivamente (Figura 2). É considerada um ponto divisor de águas superficial e, como consequência, torna-se interessante para um estudo do comportamento da água.



Figura 2 – Divisão do Estado de São Paulo em UGRHIs (Fonte: CETESB 2007).

3.3 GEOLOGIA

Segundo Nishyama e Zuquette (1994), a área da região de São Carlos representa aproximadamente 60% de afloramento da Formação Botucatu (Figura 3). Dessa forma, ela é relacionada à situação de aquífero livre, que apresenta recarga de forma direta.



Figura 3 – Delimitação do afloramento da Formação Botucatu (Fonte: FAGUNDES, 2010).

Além da Formação Botucatu, essa área também conta com formações rochosas de Itaqueri e Serra Geral.

A região é constituída por grupos de encostas consideradas suaves, definidas por terem declividades inferiores a 15°, separadas por zonas de escarpas, com declividades que se encontram entre 45 a 70°.

3.4 CLIMA

A área de estudo é localizada em uma zona climatorial entre os tipos Cwa e Aw, segundo a classificação de Köppen, que é caracterizado por clima entre tropical e clima temperado, com inverno seco entre abril a setembro (TOLENTINO, 1967). A temperatura média do mês mais frio não ultrapassa 18°C, enquanto o mês mais quente apresenta temperaturas maiores que 22°C.

As precipitações desta região são bastante marcadas, com os meses de invernos tendo precipitações mensais de aproximadamente 30 mm, enquanto que nos meses de verão úmido essa precipitação mensal as vezes chega a ser mais de dez vezes maior que esse valor. O período seco abrange os meses de junho a novembro.

A umidade relativa média da área é de 78,2%, e a direção preferencial dos ventos é no sentido NE-SW, com velocidade anual média de 1,8 m/s (ZUQUETTE *et al.*, 2006).

3.5 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O Aquífero Guaraní, situado na porção centro-sul do Brasil e abrangendo também outros países da América Latina, sendo eles Argentina, Paraguai e Uruguai. No Brasil ele está presente nos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina, Goiás e Minas Gerais, como ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Delimitação do Aquífero Guarani (Fonte: CETESB, 2004).

A água encontrada nesse aquífero é de qualidade excelente. É a maior reserva de água doce subterrânea do mundo; sua extensão é de 1,15 milhões de quilômetros quadrados. Tal aquífero tem recarga em torno de 140 bilhões de metros cúbicos por ano, mas estima-se que apenas 40 bilhões de metros cúbicos poderiam ser utilizados com o intuito de preservar este recurso (EMBRAPA, 2004).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CICLO HIDROLÓGICO

Na natureza, a água se encontra em um eterno e constante ciclo estabelecido entre atmosfera, superfície terrestre e corpos d'água. Quando encontrada na atmosfera, dependendo das condições climáticas, ela é condensada, transformando-se em gotículas de água que se precipitam até a superfície da Terra, podendo se encontrar diretamente um armazenamento de água superficial como também pode ser escoada superficial ou sub superficialmente até um corpo d'água, ou seja, rios, lagos ou oceanos. Outra parcela da água pode ser infiltrada pelo solo.

Da água infiltrada, parte fica retida no solo até ser evaporada ou transpirada pelas plantas, num fenômeno chamado evapotranspiração, permitindo que este recurso volte para as camadas mais altas da atmosfera em forma de nuvens. Outra parte dessa água infiltrada, por outro lado, pode alcançar grandes profundidades do solo, podendo ocorrer o fenômeno de recarga dos aquíferos encontrados no local.

O ciclo hidrológico é encontrado na Figura 5.

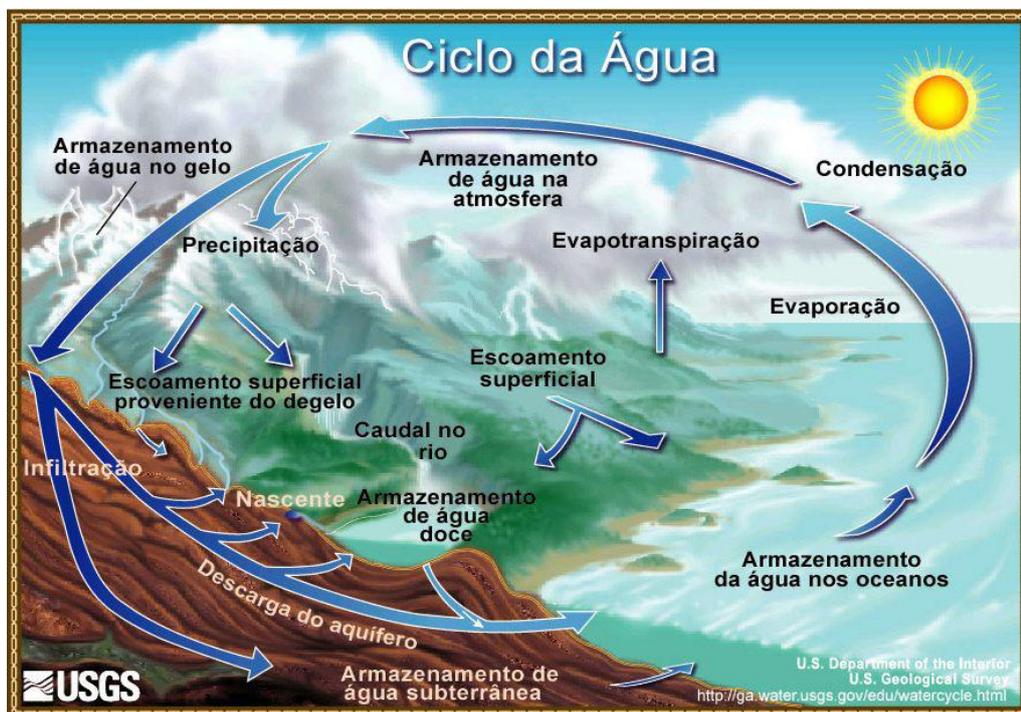


Figura 5 - Ciclo hidrológico simplificado (Modificado de USGS: <http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>).

Em contrapartida, existe outro conceito chamado balanço hídrico do solo, que se define pela contabilidade de entrada e saída de água, cuja interpretação possibilita informações sobre ganho, perda e armazenamento da água pelo solo (PERUCHI, 2009).

O balanço hídrico, definido de forma bastante simplificada, para um volume de controle pode ser descrito como (PERUCHI, 2009):

$$R = P - (ET + ES)$$

Em que:

- R- Recarga profunda;
- P - Precipitação;
- ET - Evapotranspiração;
- ES - Escoamento superficial direto;

Devido à sua simplicidade, a aplicação de tal equação geralmente é encontrada na literatura associada a outros métodos.

A recarga seria, avaliando-se tal equação, a diferença entre o montante de água que entra e de água que sai. Algumas das parcelas são simples de serem medidas, como a precipitação; porém outros parâmetros, como a evapotranspiração e o escoamento superficial, são bastante mais complicados de quantificar.

4.2 HIDROGEOLOGIA

A ciência da hidrogeologia destina-se a estudar o escoamento dos fluidos por meio de unidades geológicas consideradas aquíferos. Essas unidades apresentam materiais capazes de armazenar e transmitir água infiltrada, geralmente de alta qualidade, que muitas vezes pode ser uma boa fonte de água para abastecimento humano.

Um aquífero pode ser considerado, portanto, um reservatório natural de água, e é classificado em dois tipos diferentes: livre ou confinado. Aquíferos livres são aqueles cujo limite superior está submetido diretamente à pressão atmosférica, e podem facilmente receber recarga de forma direta a partir da infiltração de água no solo. Por outro lado, aquíferos confinados designam aqueles cujo limite superior é limitado por materiais geológicos de menor condutividade hidráulica (FAGUNDES, 2010). A Figura 6 ilustra os dois tipos de aquíferos.

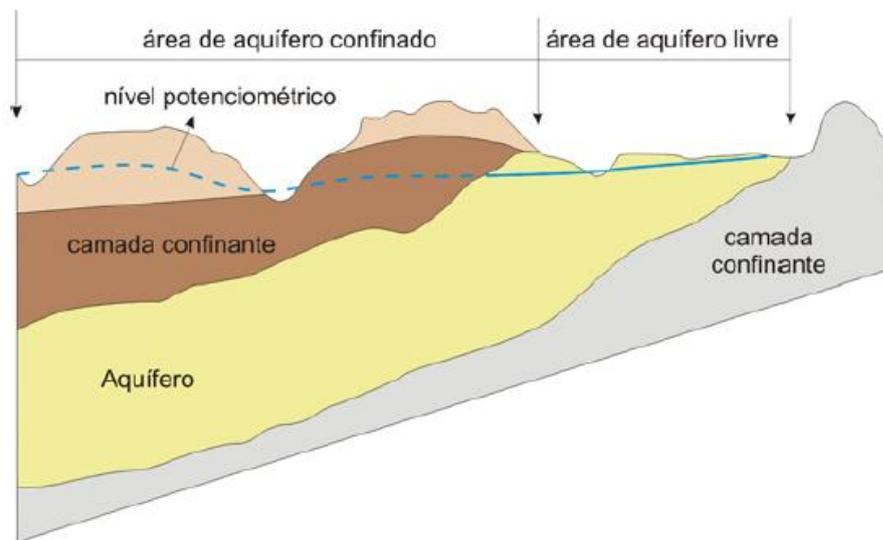


Figura 6 - Tipos de aquíferos (Fonte: FAGUNDES, 2010).

4.3 FASES DE UM MATERIAL GEOLÓGICO

Sabe-se que um material geológico é composto basicamente de água, ar e partículas sólidas. As características de um solo dependem bastante da proporção que existe entre tais fases. Por exemplo, a quantidade de ar existente em um solo representa seu grau de porosidade, enquanto a água interfere na sua umidade.

Essas três fases apresentam fenômenos de relação entre eles. Existe o fenômeno de tensão superficial, manifestado na interface líquido-gás, assim como o fenômeno de capilaridade (interface ar-sólido), e o fenômeno de adsorção (interface líquido-sólido).

Este último fenômeno citado, o de adsorção, significa a retenção de água pelas partículas sólidas do solo, e uma das explicações para isso está na compreensão de que um solo não é um simples tubo capilar, mas sim uma composição irregular de poros e canais formados pelos seus sólidos (LIBARDI, 1995).

4.3.1 Curva de retenção de água no solo

O estudo da curva de retenção de água no solo representa um ponto chave para o estudo da dinâmica da água no solo. O método do papel-filtro, método que consiste em colocar o solo em contato com um tipo de papel específico para a avaliação de tal retenção, se mostra bastante apropriado para o estudo. O relacionamento das umidades encontradas nos papéis-filtro com a sucção do solo para cada umidade diferente é calculado pelas equações de Chandler *et al.*(1992):

Para umidades do papel-filtro > 47%: Sucção (kPa) = $10^{(6.05 - 2.48 \log w)}$

Para umidades do papel-filtro \leq 47%: Sucção (kPa) = $10^{(4.84 - 0.0622 w)}$

A partir dos pontos encontrados pelas equações anteriores, pode-se utilizar o ajuste da curva de retenção da água no solo pelo modelo de Van Genuchten (1980), representado pela seguinte fórmula:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m}$$

Sendo:

θ : umidade volumétrica do solo

ψ : Potencial mátrico (cmca)

θ_r : Umidade volumétrica residual

θ_s : Umidade volumétrica de saturação

α : parâmetro de ajuste;

m e n : parâmetros de ajuste, com $m=1-(1/n)$

4.4 FENÔMENOS BÁSICOS DO CICLO HIDROGEOLÓGICO

Considerando a equação básica do estudo dos aquíferos, os fenômenos mais complexos deste estudo são os fenômenos de evapotranspiração, infiltração e recarga, comentados detalhadamente a seguir:

4.4.1 Evapotranspiração

O termo evapotranspiração é usado para o fenômeno de passagem da água do estado líquido para o estado gasoso e inclui dois processos distintos. A água, quando evaporada, tem seu processo regido apenas por leis puramente físicas; por sua vez, na evaporação da água através de plantas, fenômeno nomeado como transpiração, o processo é biológico e limita as leis físicas. Quando ambos os fenômenos acontecem simultaneamente, o termo evapotranspiração é utilizado (REICHARDT, 2012), sendo este conceito introduzido em 1944 por Thorntwaite.

As plantas, de uma maneira geral, absorvem centenas de gramas de água para cada grama de matéria seca produzida. Elas têm suas raízes mergulhadas em solos que apresentam um mínimo de umidade, que é utilizada, ocorrendo conseqüentemente a transpiração por parte delas. Para crescer adequadamente, as plantas precisam possuir um mecanismo de economia de água em seu interior, pois essa necessidade é constante, ao passo que os processos que adicionam água ao solo, como a chuva, ocorrem apenas ocasionalmente e, de forma geral, com irregularidade (REICHARDT, 1985).

A evapotranspiração depende da demanda evaporativa da atmosfera, determinada por quatro componentes meteorológicos: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. No que se refere à planta, outros fatores são importantes como estágio de desenvolvimento, área foliar, arquitetura foliar e resistência do dossel (MEDEIROS, 2002).

A descrição exata da absorção de água pelas plantas por meio de uma teoria bem fundamentada é muito difícil, se não impossível, devido às complicações inerentes às relações espaço-tempo envolvidas no processo. As raízes crescem desordenadamente nas mais diversas direções e espaços e, até o momento, não existe método experimental para medirem-se os gradientes e fluxos “microscópicos” nas vizinhanças das raízes. Os métodos convencionais de medida de umidade volumétrica do solo e o potencial matricial são baseados nas amostragens de um volume relativamente grande de solo. Devido a essas e muitas outras dificuldades, apenas uma análise semiquantitativa do fenômeno é possível até o presente. (RICHARDT, 1996).

4.4.2 Infiltração

A infiltração da água no solo, processo pelo qual a água percola a partir da superfície do solo, é uma etapa de extrema importância no ciclo hidrológico, pois é responsável pela recarga de aquíferos e influencia de forma direta o escoamento superficial e, por consequência, a erosão hídrica (BRANDÃO *et al.*, 2006).

A parcela de água que infiltra no solo pode ser dividida em três subparcelas: uma porção que sofre evapotranspiração; outra que fica retida no solo e outra que percola pelo solo a camadas mais profundas e atinge, portanto, a zona saturada, caracterizando a recarga.

Segundo Green & Ampt (1911), o valor da infiltração depende principalmente da ocorrência, duração da precipitação e intensidade, porém outros fatores também podem interferir, como a velocidade do vento, temperatura, características e espessura do solo, vegetação, entre outros.

Como a infiltração de água no solo é um processo que depende de diversos fatores, eles podem ser divididos em quatro categorias (RAWLS *et al.*, 1996):

- Fatores relacionados ao solo;
- Fatores relacionados à superfície;
- Preparo e manejo do solo;
- Outros.

Conforme a água infiltra no solo, durante um evento de precipitação, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo no sentido de cima para baixo, alterando de maneira gradual a umidade do solo. Enquanto houver aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em todas as profundidades, sendo naturalmente a camada superficial a primeira a sofrer saturação. Normalmente, em intensidades normais de precipitação, a infiltração dessa água precipitada não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar geralmente apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de água decresce com a profundidade (SILVEIRA *et al.*, 2000).

A distribuição da água no solo, submetido a uma carga hidráulica na superfície, e as quatro zonas encontradas em tal perfil, podem ser observadas na Figura 7:

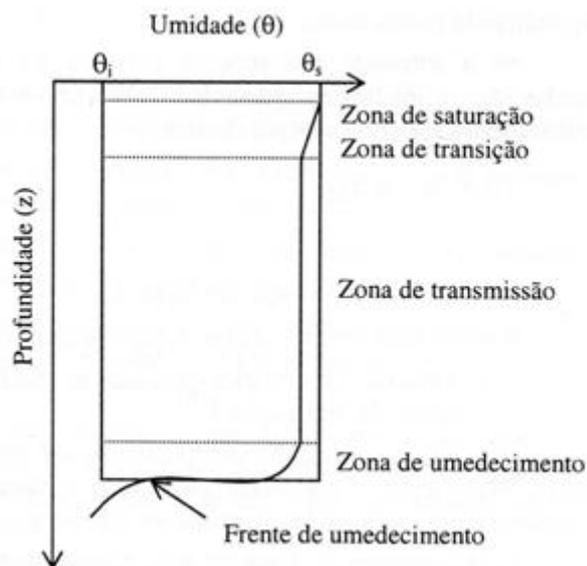


Figura 7 - Perfil de umedecimento do solo durante infiltração de água (modificado de BRANDÃO *et al.*, 2006).

A zona de saturação localiza-se na superfície do solo e é normalmente uma camada estreita. A zona de transição é uma camada que apresenta decréscimo acentuado da umidade. Já a zona de transmissão é a região do perfil através da qual a água é transmitida a profundidades maiores. A zona de umedecimento é uma região com grande redução na umidade com o aumento da profundidade, encontrada em uma camada normalmente estreita (BRANDÃO *et al.*, 2006).

Quando houver excesso de água na superfície do solo, ocorrido pela condição de empoçamento, a capacidade de infiltração é decrescente ao longo do tempo até atingir um valor aproximadamente constante após um período longo, denominado taxa de infiltração estável ou T_{ie} . A taxa de infiltração conforme o tempo se encontra na Figura 8:

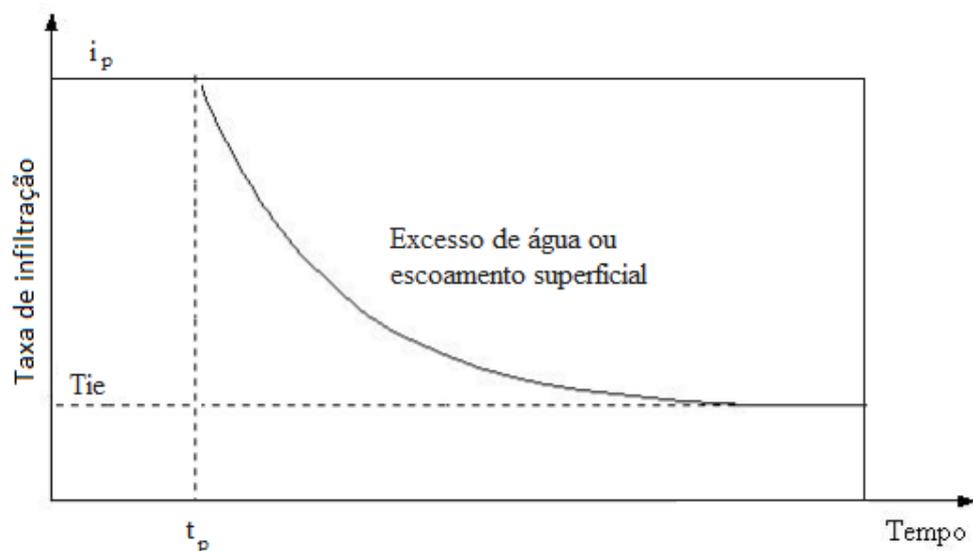


Figura 8 – Variação da taxa de infiltração potencial ao longo do tempo. (Fonte: BRANDÃO *et al.*, 2006).

Caso ocorra sobre o solo uma precipitação com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetrará no perfil a uma taxa igual à intensidade da precipitação. Caso a chuva continue a ocorrer, pode-se chegar a um ponto em que a capacidade de infiltração se iguala à intensidade de precipitação. A partir desse momento, a taxa de infiltração passa a se processar nas mesmas taxas da curva de capacidade de infiltração, que continua a decrescer no tempo, tendendo a atingir o valor da condutividade hidráulica do solo saturado.

O modelo de Green & Ampt (1911) exprime a infiltração em função da condutividade hidráulica do solo saturado, do potencial matricial do solo antes da ocorrência da infiltração e das umidades inicial e de saturação, e não do tempo de duração do processo. Por se basear numa análise física e por apresentar bons resultados no estudo da infiltração, o modelo de Green & Ampt destaca-se dos demais, sendo um dos mais utilizados para sua simulação.

Este modelo assume que o movimento da água ocorre semelhante ao mecanismo de um pistão e considera apenas solos homogêneos, em que a frente de umedecimento apresenta um limite bem definido entre as zonas úmida e seca. Este método se caracteriza pela facilidade de obtenção dos parâmetros necessários para sua utilização e sua possibilidade de adaptação a cenários diversos.

Ele é baseado na equação de Darcy, e deve haver as premissas seguintes para sua utilização:

- Existência de uma carga hidráulica constante na superfície;
- A sucção na frente de saturação permanece constante, em função do tempo e da posição;
- Uma altura constante de água é mantida na superfície do solo.
- O solo é infinito e considerado homogêneo em toda profundidade.
- A frente de umedecimento criada pelo evento chuvoso deve ser abrupta

4.4.3 Recarga

A recarga pode ocorrer naturalmente pela precipitação, por rios, canais e lagos, fluxos inter-aquíferos e via fenômenos induzidos por atividades humanas, como a irrigação e a urbanização (LERNER *et al.*, 1990). Uma vez atingida à superfície, a precipitação proporciona a água necessária para umedecimento do solo e para escoamento superficial, assim como para percolação profunda ao nível freático.

Em áreas de recarga dos aquíferos, uma parte da água que infiltra no solo participa do escoamento básico, enquanto outra parte pode ir para as porções profundas ou confinadas, podendo se transformar em recarga profunda (GOMES, 2008).

Podem-se classificar os mecanismos de recarga de águas subterrâneas em três classes diferentes (LERNER *et al.*, 1990):

- Recarga direta: quando a parcela da precipitação atravessa a zona não saturada e soma-se à reserva subterrânea;
- Recarga indireta: quando ocorre a drenagem das águas através das fissuras das rochas e pelo fluxo subterrâneo indireto, ao longo de descontinuidades;
- Recarga localizada: quando ocorre um processo em que a água move-se em curtas distancias lateralmente antes da infiltração.

A recarga depende basicamente da disponibilidade de água. Em muitos lugares, esta disponibilidade depende da interação entre o fornecimento em forma de precipitação e a água

evaporada que retorna pra a atmosfera. Para quantificar a recarga, é necessário medir alguns fenômenos, dos quais é possível estimar a recarga por subtração. Portanto, erros nas medições destes fenômenos traduzem-se em incertezas na magnitude estimada da recarga (GOMES, 2008).

Estudos detalhados de recarga têm sido empreendidos em muitas partes do mundo; Lerner *et al.* (1990) apresentam uma extensa gama de exemplos. Em tais estudos, verificou-se amplo relacionamento entre a taxa de precipitação anual total e recarga anual. Muitas estimativas de taxas de recarga natural estão compreendidas na faixa de 5% a 25% da precipitação. Entretanto, é importante examinar qualquer estimativa de recarga que exceda 30% do total precipitado na área de estudo, pois são relativamente incomuns na prática.

Segundo Custodio (2002), o cálculo necessário para quantificar a recarga local pode ser bastante impreciso em função de variáveis espaciais e temporais existentes, das possíveis mudanças de uso no solo, além da escala de trabalho. Sendo assim, Lerner *et al.* (1990) sugerem que uma certa área determinada seja dividida em blocos homogêneos.

Percebe-se, portanto, a dificuldade da determinação e estimativa do processo de recarga, tornando tal tema em uma tarefa bastante laboriosa e alvo de muitos estudos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será detalhado o procedimento de cada método utilizado para o estudo em questão, antes disso foi feito um fluxograma da metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho (Figura 9). As células de cor escura representam as três fases do trabalho: Campo, laboratório e escritório (análise), enquanto as células ovais representam os principais métodos e ensaios feitos para a obtenção dos resultados.

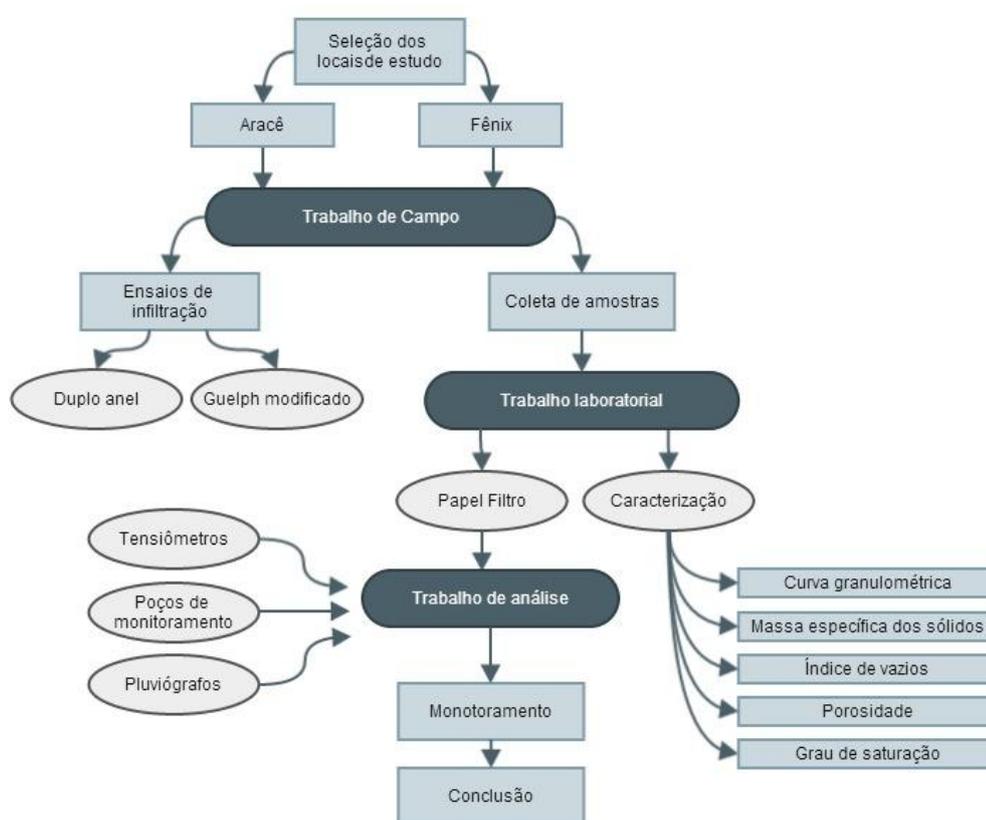


Figura 9 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no estudo.

Este capítulo obedecerá a sequência feita no andamento do estudo, a mesma encontrada no fluxograma. Sendo assim, o primeiro tópico apresentado se refere aos ensaios de infiltração; os seguintes, aos ensaios laboratoriais e, por último, segue-se uma descrição dos dados obtidos a partir de tensiômetros, poços de monitoramento e pluviógrafos.

5.1 ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO COM DUPLO ANEL

O infiltrômetro de duplo anel é um método bastante simples que tem como objetivo simular um evento de saturação do solo, algo similar ao que pode acontecer em um momento de chuva muito intensa. Este ensaio é influenciado pelas condições de superfície em que se encontram o solo no momento do estudo como, por exemplo, o teor de umidade antes do procedimento.

O método do duplo anel, ou infiltrômetro de duplo anel, regido pela norma ASTM 8338, é utilizado na determinação da taxa de infiltração da água no solo, e consiste de dois anéis de metal que são posicionados de forma concêntrica no solo. O anel interno e o externo utilizados, de posse do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, apresentam diâmetros de 0,3 m e de 0,6 m, respectivamente.

Os anéis são cravados verticalmente de forma concêntrica no solo, deixando-se uma borda livre por volta de 150 mm. O anel externo tem a finalidade de reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno. Assim, a água do anel interno infiltra no perfil do solo em uma direção predominantemente vertical, o que evita superestimativa da taxa de infiltração.

A reposição de água nos anéis é feita de forma diferente para cada um. O anel interno é interligado a um tambor que serve como reservatório de água. O anel externo, por sua vez, é sempre recarregado manualmente, quando apresentar necessidade de mais água (Figura 10).



Figura 10 – Infiltrômetro de Duplo Anel.

O ensaio deve ser realizado até que a taxa de infiltração, medida no reservatório que fornece água ao anel interno, torne-se constante com o tempo. Essa constância é garantida quando, no mínimo, as últimas três leituras apresentam variações iguais.

Com os dados dos diâmetros dos anéis, da altura de água formada pelo anel interno, pelo avanço da frente de umedecimento e pela taxa de infiltração constante encontrada no final do ensaio, utiliza-se a equação de Darcy para a obtenção da condutividade hidráulica saturada, como encontrada a seguir:

$$K_{fs} = \frac{Q}{\left(\frac{h+Z_w}{Z_w}\right) \cdot A \cdot t}$$

Sendo:

K_{fs} – condutividade hidráulica saturada

Q – volume de água infiltrada;

h – altura da lâmina de água no anel interno durante o ensaio;
 Z_w – profundidade alcançada pela frente de umedecimento;
 A – área da seção transversal do anel interno;
 t – tempo entre duas leituras.

5.2 PERMEÂMETRO DE GUELPH

O infiltrômetro ou permeâmetro do tipo Guelph, equipamento que tem como base o princípio do frasco de Mariotte, opera sobre carga hidráulica constante. É considerado um experimento simples por requerer pouco tempo de análise e pouca água para sua operação.

Foi usado para o estudo o aparelho de Guelph modificado (Figura 11) do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Seu princípio de funcionamento é igual ao original; a única diferença se encontra no fato de a conexão entre a base e a haste principal ser de PV, não apresentando a rigidez encontrada no Guelph original, oferecendo assim maior facilidade para seu manuseio.



Figura 11 – Permeâmetro de Guelph modificado.

Inicia-se o ensaio fazendo-se pequenos orifícios cilíndricos no solo, com tamanhos de abertura conhecidos para que se acople o equipamento. Em tais orifícios deve-se garantir um nível de água constante. Cada ensaio deve ser feito duas vezes, uma para uma carga hidráulica de 5 centímetros e outra, por sua vez, de 10 centímetros. A carga hidráulica é estipulada pelo próprio aparelho.

Durante o andamento do ensaio anota-se, a cada espaço de tempo definido, a altura da água dentro do aparelho. A diferença do valor em cada leitura resulta na variação de infiltração no solo. O ensaio deve ser finalizado somente quando três leituras seguidas apresentarem a mesma taxa de infiltração.

Para a obtenção da condutividade hidráulica saturada, K_{SAT} , e do ϕ , utilizam-se as seguintes fórmulas empíricas:

$$K_{SAT} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1$$

$$\phi = G_3 \cdot Q_1 - G_4 \cdot Q_2$$

Onde Q_1 e Q_2 representam as vazões da infiltração encontrada, quando a taxa de infiltração permanece constante para cada carga hidráulica utilizada no ensaio. Podem ser calculadas como a multiplicação entre a diferença de altura de água encontrada no interior do equipamento e a sua área de seção transversal.

G_1 , G_2 , G_3 e G_4 , por sua vez, são valores obtidos por meio de equações que podem ser consultadas em SOILMOISTURE (2005). Essas equações necessitam de valores definidos como Fator de Forma (C), que depende da relação entre a carga hidráulica (H) e do raio do furo (a). Tal fator de forma pode ser obtido pelo gráfico da Figura 12.

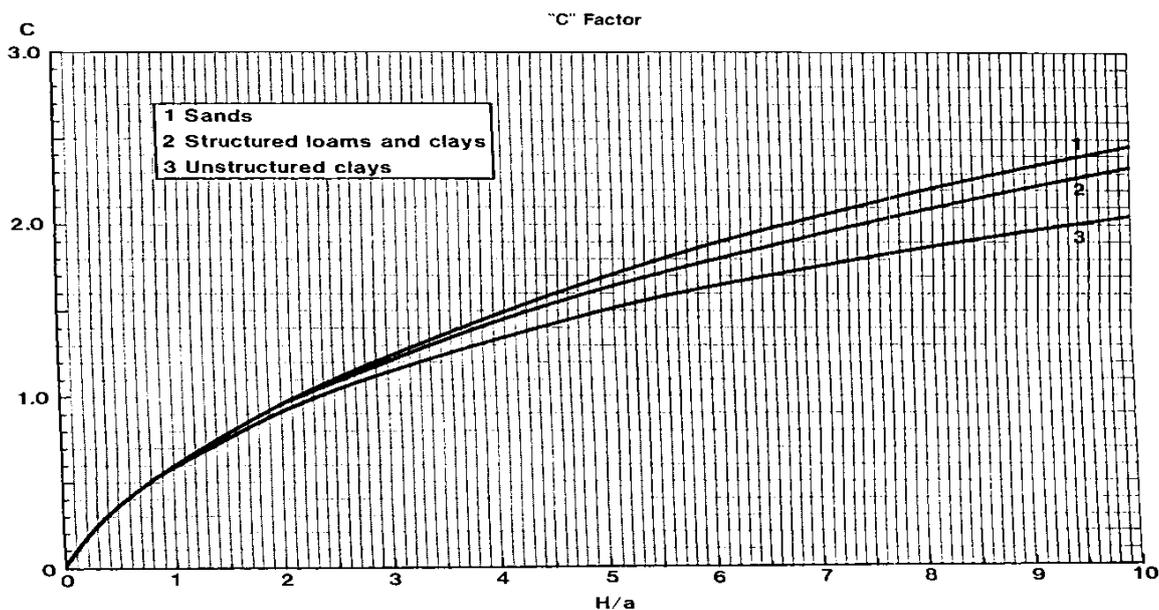


Figura 12 - Relação entre fator de forma e H/a para diferentes tipos de solo. (Fonte: REINOLDS & ELRIK, 1985).

5.3 ÍNDICES FÍSICOS

Em campo foram extraídas algumas amostras de solo, tanto deformadas quanto indeformadas, para levar ao laboratório com o objetivo de fazer uma caracterização desse material. Além do ensaio de granulometria e de massa específica dos sólidos, detalhados separadamente, foram calculados com essas amostras os seguintes índices físicos:

- Umidade Gravimétrica (w): relação entre o peso de água e o peso de sólidos. Fórmula: M_A/M_S . Valor em porcentagem.
- Densidade do material (ρ): relação entre a massa total e o volume total da amostra. Fórmula: M_T/V_T . Valor em g/cm^3 .
- Índice de vazios (e): relação entre o volume de vazios, constituído tanto por água quanto por ar, e o volume das partículas sólidas. Fórmula: $e = V_V/V_S$. Valor adimensional.
- Porosidade (n): relação entre o volume de vazios e o volume total. Fórmula: $n = V_V/V_T$. Valor em porcentagem.

- Grau de saturação (S): relação entre o volume de água e o volume de vazios.
Fórmula: $S = V_w/V_v$. Valor em porcentagem.

O índice da massa específica dos sólidos de um solo é calculado a partir de um ensaio especial, feito com o auxílio de um picnômetro, deaerador e termômetro. Tiram-se vários valores da massa do conjunto picnômetro e solução com amostra e água deaerada a diferentes temperaturas. Esses valores auxiliam na obtenção do valor da massa específica dos sólidos do solo.

Esse índice é determinado em função da presença dos minerais constituintes e da percentagem de ocorrência de cada um deles nesse solo, pois cada tipo de mineral encontrado em sua composição apresenta uma massa específica distinta, resultando em uma composição de massa específica própria.

5.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O ensaio de granulometria é feita em duas etapas: sedimentação e peneiramento. A primeira faz a análise granulométrica de partículas menores que 0,075mm, e a segunda avalia partículas maiores que 0,075mm. A curva gerada será utilizada na classificação da textura dos solos.

Inicia-se o ensaio retirando-se toda a umidade contida no solo *in natura* que será utilizado para o ensaio (aproximadamente 130g para o tipo de solo do estudo) em estufa. Separadamente, é calculada também a taxa de umidade deste solo com porções menores de amostra. Essa etapa se realiza em triplicata.

5.4.1 Ensaio de Peneiramento

Com a amostra totalmente seca a primeira etapa é a do peneiramento. É selecionado um conjunto de recipientes com peneiras no fundo. Eles são então encaixados de forma empilhada. O tamanho da abertura das respectivas redes deve ser crescente de baixo para cima. Embaixo da peneira de menor abertura deverá ser colocado um recipiente sem peneira

nem nenhum tipo de abertura no fundo, definido como “prato”, que recolherá os grãos que passarão por todas as peneiras encontradas acima deste ultimo recipiente. Isso significa que todo o material que chegar ao “prato” terá tamanho menor ou igual á 0,075 mm. Todo este material encontrado no “prato” será guardado para ser utilizado na segunda parte do ensaio de granulometria: a de sedimentação.

Por cima do primeiro recipiente coloca-se uma tampa para evitar a perda de material durante a agitação.

A Figura 13 apresenta as peneiras empilhadas e, ao lado delas, o agitador utilizado para a devida separação dos grãos.



Figura 13 - Peneiras e agitadores utilizados no ensaio de peneiramento.

5.4.2 Ensaio de Sedimentação

Utilizando o material do de tamanho inferior a 0,075 mm do ensaio de peneiramento inicia-se então o ensaio de sedimentação. Isso é feito porque tal amostra é de um diâmetro tão reduzido que o conceito de peneiramento não é suficiente, sendo necessário então um método alternativo.

Para a preparação da amostra, deve-se adicionar a ela uma solução defloculante, que, nesse caso, é preparada com hexametáfosfato de sódio e água destilada. A mistura da amostra com tal solução deve ser deixada em repouso por, no mínimo, 12 horas, mas não deve exceder 30 dias da data de sua preparação. Esta mistura não poderá receber de forma direta a luz do sol.

Após este tempo de repouso o material é transferido para uma proveta de volume 1.000 mL. A proveta é completada com água destilada até a marcação de sua capacidade. Agita-se vigorosamente a amostra com a utilização de um agitador manual, acionando o cronômetro na hora em que se encerra tal agitação.

Em tempos diferentes pré-estabelecidos deve-se fazer a leitura de sedimentação com um densímetro de bulbo simétrico. Essas leituras são feitas nos intervalos de 30 segundos, um minuto, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos contados a partir do início da cronometragem. Deve-se também medir a temperatura ambiente com o auxílio de um termômetro em todas as leituras.

Na Figura 14 encontra-se a proveta contendo a amostra, o cronometro utilizado e uma segunda proveta contendo o densímetro e o termômetro.



Figura 14 - Provetas utilizadas no ensaio de sedimentação.

Conforme o tempo passa, o material é cada vez mais sedimentado no fundo da proveta. Como consequência disso, a solução encontra-se cada vez menos densa. A equação a seguir apresenta o cálculo necessário para encontrar o diâmetro correspondente das partículas dessa solução na borda a cada intervalo de tempo:

$$D_i = \left[\frac{18\mu}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g} \cdot \frac{z}{t} \right]^{1/2}$$

Onde:

D_i : diâmetro equivalente da partícula, em m;

ρ_s : massa específica das partículas, em kg/m^3 ;

ρ : massa específica da água, variável com a temperatura, em kg/m^3 ;

g : aceleração da gravidade, considerada igual à $9,81 \text{ m/s}^2$;

μ : viscosidade dinâmica da água, variável com a temperatura.

z : distância entre o centro de volume do bulbo do densímetro e a superfície da suspensão calculada através da curva de calibração do densímetro, em m;

t : tempo decorrido do instante zero até a leitura realizada, em s.

Com a junção dos dois ensaios (peneiramento e sedimentação) é possível traçar a curva granulométrica.

5.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA - MÉTODO DO PAPEL-FILTRO

O objetivo deste método é a obtenção da curva de retenção da água no solo. De forma geral, a geometria dos poros, a magnitude e composição mineralógica da fração fina são determinantes na posição relativa, forma, e inclinação desta curva.

A técnica de papel filtro baseia-se no princípio de absorção de umidade e equilíbrio de potenciais que existem quando um material poroso, com diferença de teor de umidade é colocado em contato direto ou não, com um papel filtro, o papel passa a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema atinja o equilíbrio. A sucção do solo pode ser obtida referindo-se a curva de calibração do papel filtro (FREITAS NETO, 2008).

De acordo com Marinho (1994), o método do papel filtro tem se mostrado eficiente na medição da sucção total e matricial dos solos. É utilizado na determinação das características de retenção de água nos solos tanto nos processos de secagem como de umedecimento.

Primeiro passo do método é a retirada do material em campo. Ele deve ser recolhido do local sem deformações. Em laboratório tal material indeformado é moldado em pequenos anéis feitos de tubos de PVC. Um anel contendo material em seu interior é apresentado na Figura 15.



Figura 15- Anel contendo material indeformado utilizado para o método de papel filtro.

Um fenômeno importante para se levar em consideração na hora de utilizar o método do papel-filtro é o de histerese, que afeta diretamente as condições de fluxo no solo não saturado. Ele corresponde à diferença de trajetórias mostradas pelas curvas características obtidas pelo processo de secagem e de umedecimento para um mesmo solo. A diferença das trajetórias obtidas, usando-se ambos os processos, é mostrado na Figura 16.

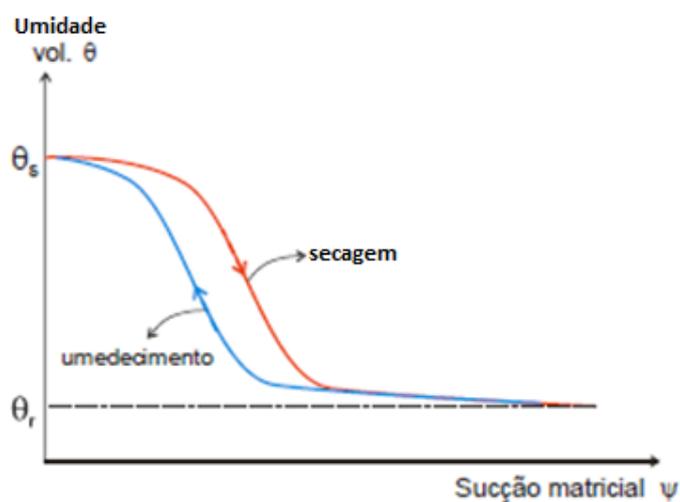


Figura 16 – Gráfico representando o fenômeno de Histerese (modificado de FAGUNDES, 2010).

Para que se evite este problema, todos os corpos de prova (anéis anteriormente ilustrados) serão saturados para então serem secados cada um com uma umidade pré-estabelecida desejada. Esta saturação é feita de forma indireta, com o auxílio de uma placa porosa e pelo papel Whatman nº 42 (Figura 17). Parte deste papel entrará em contato com água, enquanto outra parte estará em contato com os corpos de prova, passando indiretamente água para o solo indeformado até sua saturação.



Figura 17 - Processo de saturação dos corpos de prova de maneira indireta.

Após a saturação, quando estes solos forem secados, todos respeitarão apenas a curva de secagem mostrada na Figura 16.

Antes de seguir com o ensaio será estipulado os teores de umidade que cada corpo de prova deve alcançar. Para isso, a partir da saturação, será feito o processo de secagem. Quando cada corpo de prova alcançar a umidade pré-determinada eles serão então previamente pesados e colocados em contato com o papel Whatman n.42. Os vários conjuntos - corpo de prova e papel-filtro - serão embalados e guardados por alguns dias para garantir que o equilíbrio seja alcançado.

Passado este tempo de espera, os papéis-filtro serão cuidadosamente retirados e pesados. A diferença de umidade do papel-filtro antes e depois do contato será utilizada para o cálculo da sucção a partir das equações de Chandler *et al.*(1992).

Foi utilizado o programa “Soil Water Retention Curve” (DOURADO-NETO, 2003), desenvolvido pela Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz” (ESALQ) para a obtenção dos parâmetros necessários. Nele é estipulada a utilização da equação de Van Guenutchen. São fornecidos ao programa todos os valores obtidos pelo método do papel-filtro, e como resultado o programa fornece os valores dos cinco parâmetros da equação eleita, necessários para a construção da curva de retenção. Posteriormente, após vários valores de sucção do solo com sua respectiva umidade gravimétrica utiliza-se o programa comentado, sendo finalmente possível construir a curva de retenção que relaciona o teor de umidade gravimétrica do solo com os valores de sucção matricial.

Os perfis das curvas de retenção de água dependem do tipo de solo em estudo. Na Figura 18 encontram-se alguns exemplos de diferentes curvas de retenção devido aos diferentes materiais possíveis.

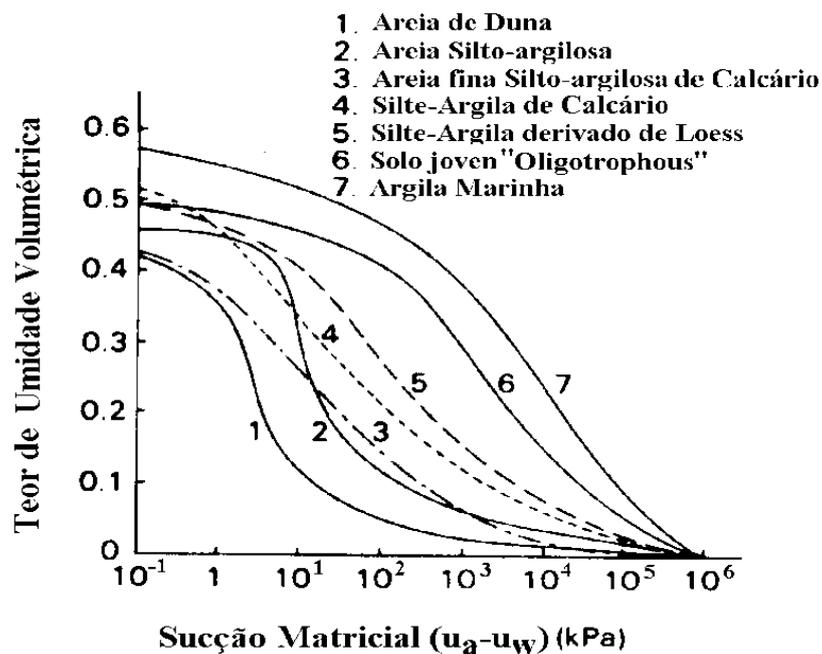


Figura 18 – Exemplos de curvas de retenção. (Fonte: KOOREVAAR *et.al*, 1983).

5.6 MONITORAMENTO

Consideram-se ensaios de monitoramento aqueles ensaios simples, porém com tempo de leitura longa e contínua. De preferência, tais leituras deveriam ser feitas diariamente. Para

o estudo, o monitoramento será feito com tensiômetros, pluviógrafos e poços de monitoramento:

5.6.1 Tensiômetros

Tensiômetros (Figura 19) são equipamentos cilíndricos e alongados que medem a pressão matricial, do local onde a ponta inferior do instrumento, contendo um material de placa porosa, toca. Na extremidade superior do tensiômetro é localizado um manômetro, dispositivo de leitura da sucção. Sua unidade de medida pode variar bastante, podendo ser, por exemplo, kPa, cbar, mmHg ou cmH₂O.

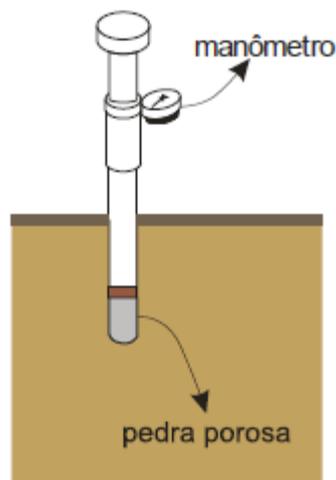


Figura 19 - Ilustração de um tensiômetro (Fonte: FAGUNDES, 2010).

O valor de sucção é definido principalmente pela quantidade de água contida no solo, tornando esse ensaio bastante interessante para obtenção indireta da umidade do solo, isso facilita bastante o monitoramento de uma frequência maior da umidade local devido a sua facilidade de leitura.

Para atingir os valores de umidade a partir dos resultados obtidos pelos tensiômetros é necessária a utilização da curva de retenção de água do solo em questão obtida através do

método do papel-filtro (item 5.5), curva essa que relaciona os valores de sucção com os valores de umidade gravimétrica do solo.

5.6.2 Pluviógrafo

O pluviógrafo (Figura 20) utilizado contém um sistema eletrônico em seu interior que faz a medida a cada 0,2mm de chuva, ou seja, a cada 0,2mm de chuva precipitada o equipamento provoca um “golpe” que é registrado em uma memória interna e posteriormente transferido para um computador para a contabilização do ensaio.

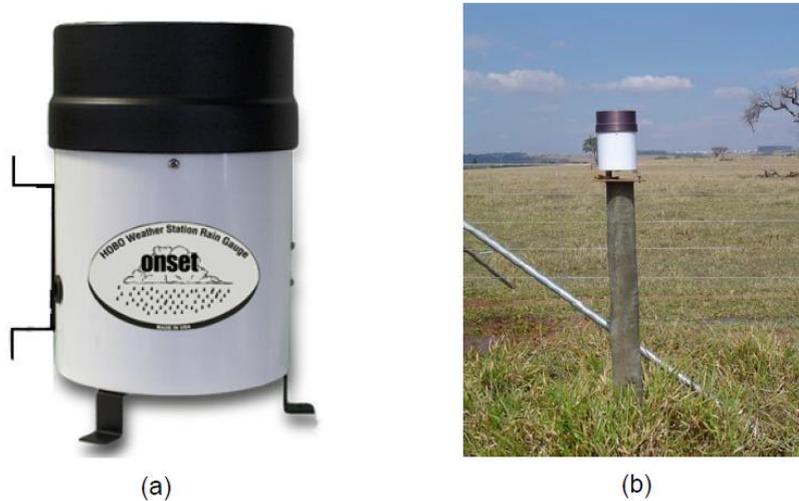


Figura 20 – Pluviógrafos (a) Detalhe do pluviógrafo; (b) Pluviógrafo instalado em campo (Fonte: FAGUNDES, 2010).

5.6.3 Poços de monitoramento

São muito utilizados nos estudos de recarga de aquíferos para se avaliar diretamente a variação do nível da zona saturada do solo. Healy e Cook (2002) propuseram a seguinte equação para o estudo de recarga a partir de tal ensaio:

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Onde:

R: Recarga;

S_y : Rendimento específico;

Δh : Variação no nível de água;

Δt : Variação no tempo.

A Figura 21 é uma representação ilustrativa de um poço de monitoramento instalado.

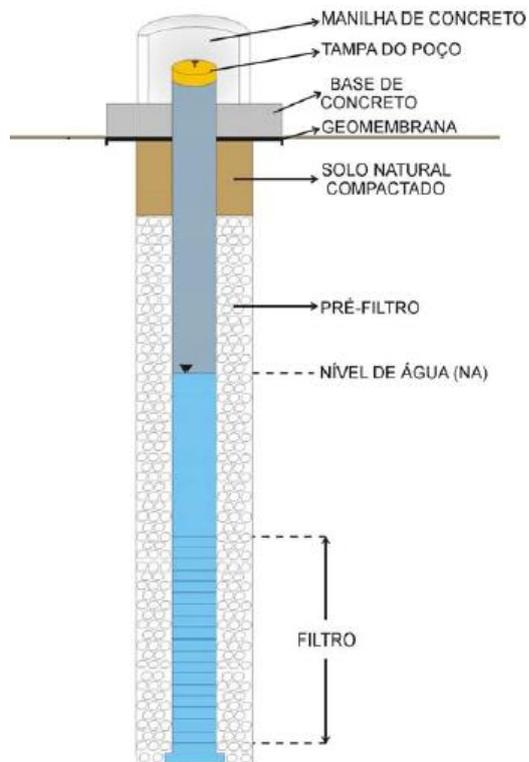


Figura 21 - Representação de um poço de monitoramento (modificado de FAGUNDES, 2010).

A leitura do nível de água é feito com um medidor elétrico de nível.

Embora bastante simples e aparentemente suficiente para o estudo de recarga de aquíferos, ele não deve ser analisado isoladamente. Os eventos de subida ou descida no nível da zona saturada devem ser correlacionados com os eventos que ocorrem externamente a ele, tais como os estudos de chuva, retenção de água no solo e perda de água pela evapotranspiração.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão abordados todos os ensaios mencionados no capítulo de materiais e métodos, porém antes disso, se comentará sobre a localização exata e documentação dos ensaios de monitoramento. Segue-se o estudo com os ensaios de caracterização do solo (índices físicos, massa específica dos solos, curva granulométrica e curva de retenção de água), seguido dos que foram feitos em campo, e por último os ensaios de monitoramento. (

6.1 MAPA DE LOCALIZAÇÃO E DOCUMENTAÇÃO

Na Tabela 1 encontram-se as coordenadas dos poços de monitoramento utilizados para o estudo e posicionados na região norte de São Carlos.

Tabela 1 – Coordenadas de localização geográfica dos poços de monitoramento (FAGUNDES, 2009).

Poço	Coord L (m)	Coord N (m)	Cota da boca (m)	ZP (m)
PM 1	190478	190478	7576194	11
PM 2	193797	193797	7572277	7
PM 3	196629	196629	7569921	11
PM 4	201969	201969	7572369	10
PM 5	203028	203028	7572060	16
PM 6	205220	205220	7574300	19
PM 7	207961	207961	7574284	11
PC 8	204928	204928	7573580	**
PC 9	202021	202021	7574346	**
PC 10	200276	200276	7575338	**
PC 11	198951	198951	7576845	**
PC 12	195009	195009	7577783	**
PC 13	191392	191392	7572180	**
PC 14	192815	192815	7569596	**
PC 15	196584	196584	7571844	**
PC 16	202836	202836	7572929	**

Sendo Z_p a profundidade de perfuração do poço de monitoramento.

Encontra-se nos Apêndices, na Figura 37, o mapa de documentação que contém a localização dos pontos de estudo *in situ*, ou seja o local Fênix (propriedade particular rural) e o local Aracê (campo aberto). Além disso, encontra-se também, na mesma representação espacial, a documentação das posições dos equipamentos utilizados para o estudo.

6.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

A grande maioria dos ensaios de caracterização será feita para três profundidades distintas, são elas 0,5 metros, 1,0 metro e 1,5 metros, pois as características podem variar consideravelmente conforme a distância em que a amostra se encontra desde a superfície.

É de grande importância também o conhecimento da umidade contida no solo no momento dos ensaios, pois ela será usada em muitos dos cálculos, por isso será sempre feito o estudo da umidade gravimétrica das amostras manuseadas. Este cálculo é sempre feito em triplicata e a média dos três valores encontrados é que será utilizado.

6.2.1 Índices físicos

- LOCAL FÊNIX

Na Tabela 2 encontram-se os valores das umidades gravimétricas utilizadas para os cálculos necessários.

Tabela 2 - Umidades gravimétricas da amostra do Fênix em diferentes profundidades.

Profundidade	0,5 metros	1,0 metro	1,5 metros
Umidade gravimétrica	8,2%	9,9%	8,7%

Para o cálculo da massa específica dos solos foi necessário medir o volume interno de cada cilindro de PVC. Com o auxílio de um paquímetro mediram-se os valores do diâmetro e

da altura deste cilindro, resultando em um volume de amostra interno ao cilindro bastante próximo ao real. É necessário também pesar o conjunto cilindro e amostra, e em seguida apenas o cilindro. A subtração desses dois valores resulta na massa apenas da amostra (M). Todos os valores são encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 –Dimensões dos cilindros e massas das amostras do local Fênix.

Profundidade (m)	0,5	1,0	1,5
D (cm)	7,5	7,5	7,5
H (cm)	5,0	5,0	4,6
V (cm ³)	223,49	223,22	205,96
M (g)	425,11	347,41	321,6

Na Tabela 4 estão os índices físicos possíveis de calcular com os dados obtidos até o momento.

Tabela 4 - Massa específica dos os sólidos e outros índices físicos das amostras do local Fênix para cada profundidade.

Profundidade (m)	0,5	1,0	1,5
ρ (g/cm ³)	1,90	1,56	1,56
ρ_d (g/cm ³)	1,76	1,42	1,44
e	0,52	0,89	0,87
n (%)	0,34	0,47	0,46
Sr (%)	0,42	0,30	0,27

- LOCAL ARACÊ

Foram feitos estudos de índices físicos em dois pontos para o local.

Expõem-se as taxas de umidade gravimétricas de ambas as regiões utilizadas separadamente para cada profundidade (Tabela 5).

Tabela 5 - Umidades gravimétricas da amostra do Aracê (Ponto 1 e Ponto 2).

Profundidade (m)	Ponto 1			Ponto 2		
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
Umidade (%)	8,81	8,74	8,87	6,29	6,52	6,77

Em seguida faz-se o dimensionamento dos cilindros usados para levar o material do local para o laboratório. Pesa-se também o material contido em tal volume. Tais valores de ambos os locais se encontram na Tabela 6:

Tabela 6 - Dimensões dos cilindros e massas das amostras do Aracê (Ponto 1 e Ponto2).

Profundidade (m)	Ponto 1			Ponto 2		
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
D (cm)	7,50	7,56	7,54	7,48	7,55	7,53
H (cm)	4,51	4,97	4,49	4,77	5,01	4,89
V (cm ³)	199,19	223,02	200,29	209,48	224,04	217,82
M (g)	296,94	348,88	331,24	334,64	361,76	351,82

Com os valores anteriores é possível então obter os índices físicos de ambos os locais, encontrados na Tabela 7:

Tabela 7 - Massa específica dos os sólidos e outros índices físicos das amostras do Aracê (Ponto 1 e Ponto 2) para cada profundidade.

Profundidade (m)	Ponto 1			Ponto 2		
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
ρ (g/cm ³)	1,49	1,56	1,65	1,60	1,61	1,62
ρ_d (g/cm ³)	1,37	1,44	1,52	1,50	1,52	1,51
e	0,94	0,85	0,75	0,78	0,77	0,77
n (%)	0,48	0,46	0,43	0,44	0,43	0,44
Sr (%)	0,25	0,27	0,31	0,22	0,23	0,24

6.2.2 Massa específica dos sólidos

Inicia-se o ensaio com a calibração do picnômetro, que é feito com a pesagem do recipiente vazio, do recipiente contendo água destilada a temperatura ambiente e a densidade da água na mesma temperatura, os valores são encontrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Calibração do picnômetro usado para obtenção da massa específica dos sólidos.

M_p (g)	M_{(T₀) (g)}	T (°C)
160,41	658,43	24,1

- LOCAL FÊNIX

Para o cálculo da massa específica do solo no local Fênix foi preciso calcular inicialmente a umidade inicial da amostra (8,1%), a massa inicial (59,20g) e a massa seca inicial da amostra (56,37g).

Em seguida faz-se a pesagem do conjunto do picnômetro e da solução deaerada com a amostra em diferentes temperaturas, como encontrada na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores necessários para o cálculo da massa específica do solo do Fênix.

T (°C)	M (g)
15,5	697,93
17,8	697,44
20,0	697,31
23,0	696,88
23,7	696,73

Agora, com todos esses dados, a partir dos cálculos necessários, chega-se ao valor de massa específica do solo da amostra do local Fênix de 2,68g/cm³.

- LOCAL ARACÊ

Calcula-se a taxa de umidade da amostra, com valor de 8,1%, a massa da amostra inicial de 62,51g e a massa seca da amostra de 57,77g. A pesagem do conjunto feito para o ensaio em diferentes temperaturas é encontrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores necessários para o cálculo da massa específica do solo do Aracê.

T (°C)	M (g)
16,4	695,43
18,3	695,26
20,3	694,99
22,2	694,75
23,9	694,59
24,8	694,46

Foi obtido o valor de massa específica dos sólidos de 2,663 g/cm³ para o Ponto 1 do local do Aracê, e 2,680 g/cm³ para o Ponto 2.

6.2.3 Granulometria

- LOCAL FÊNIX

Para a granulometria do local Fênix foi utilizada a quantidade de 120g de solo *in natura* de umidade gravimétrica inicial do solo de 8,11%.

A Tabela 11 contém os valores obtidos pelo ensaio de peneiramento da amostra do local Fênix.

Tabela 11 – Ensaio de peneiramento para estudo granulométrico da amostra do local Fênix.

Número da Peneira	Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (g)
16	1,18	0,02
30	0,60	0,29
50	0,30	8,98
100	0,15	38,57
200	0,075	46,42
Prato	Sem abertura	4,48

Por sua vez, na Tabela 12 encontram-se os valores obtidos pelo ensaio de sedimentação da mesma amostra.

Tabela 12 - Etapa de sedimentação para estudo granulométrico da amostra do local Fênix.

t (min)	T (°C)	r (H)
0,5	19,2	12,0
1	19,2	10,9
2	19,2	10,2
4	19,2	10,0
8	19,2	10,0
15	19,6	9,8
30	20,0	9,5
60	20,0	9,2
120	20,5	9,0
240	21,1	8,8
480	21,0	8,1

Como resultado é possível montar o gráfico da Figura 22.

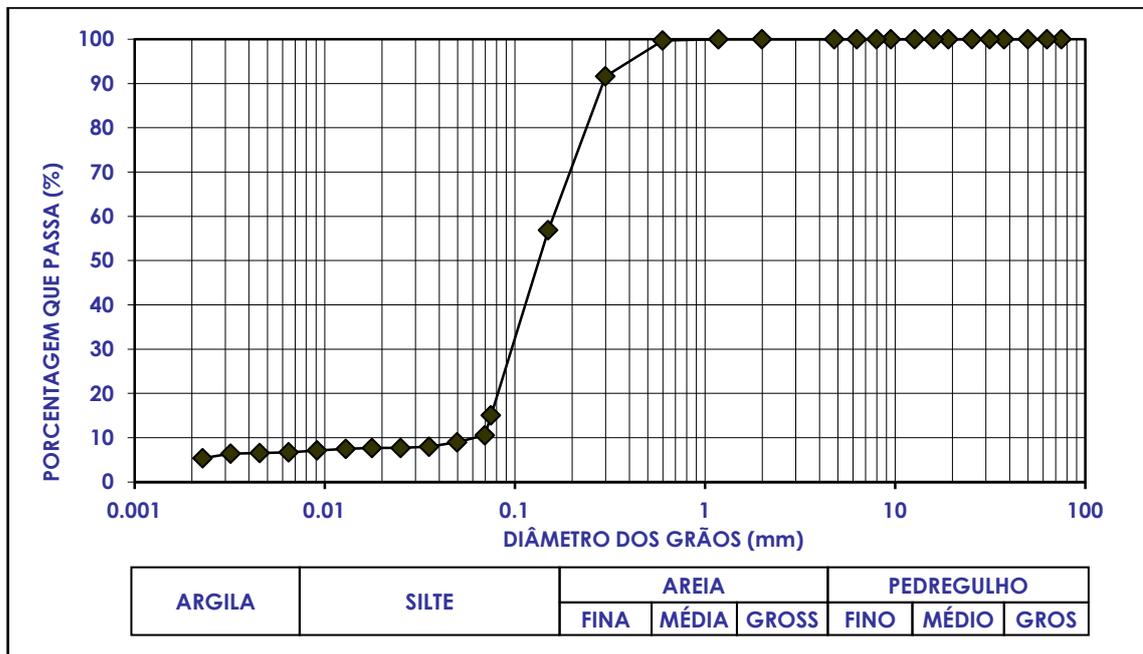


Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica da amostra do local Fênix.

- LOCAL ARACÊ

Pela etapa de sedimentação do ensaio de granulometria para os dois pontos do local do Aracê, montou-se a Tabela 13 com os valores obtidos:

Tabela 13 - Ensaio de peneiramento para estudo granulométrico do material do local do Aracê.

Número da Peneira	Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (g) Ponto 1	Massa Retida (g) Ponto 2
16	1,18	0,0	1,0
30	0,60	2,0	12,7
50	0,30	16,9	38,2
100	0,15	57,6	46,7
200	0,075	30,2	22,2
Prato	---	7,8	2,1

Na Tabela 14, a etapa de sedimentação para essas duas amostras.

Tabela 14 - Etapa de sedimentação para estudo granulométrico do material do local do Aracê.

t (min)	T (°C) Ponto 1	r (H) Ponto 1	T (°C) Ponto 2	r (H) Ponto 2
0,5	22,0	17,5	19,2	12,5
1	22,0	17,0	19,2	11,3
2	22,0	16,2	19,2	10,6
4	22,0	16,1	19,2	10,4
8	22,0	15,9	19,2	10,2
15	22,0	15,8	19,6	10,2
30	22,5	15,7	20,0	10,0
60	22,5	15,5	20,0	10,1
120	22,8	15,4	20,5	10,0
240	23,0	15,1	21,1	9,8
480	23,0	14,8	21,0	9,5

As Figuras 23 e 24 a seguir mostram os gráficos resultantes do ensaio.

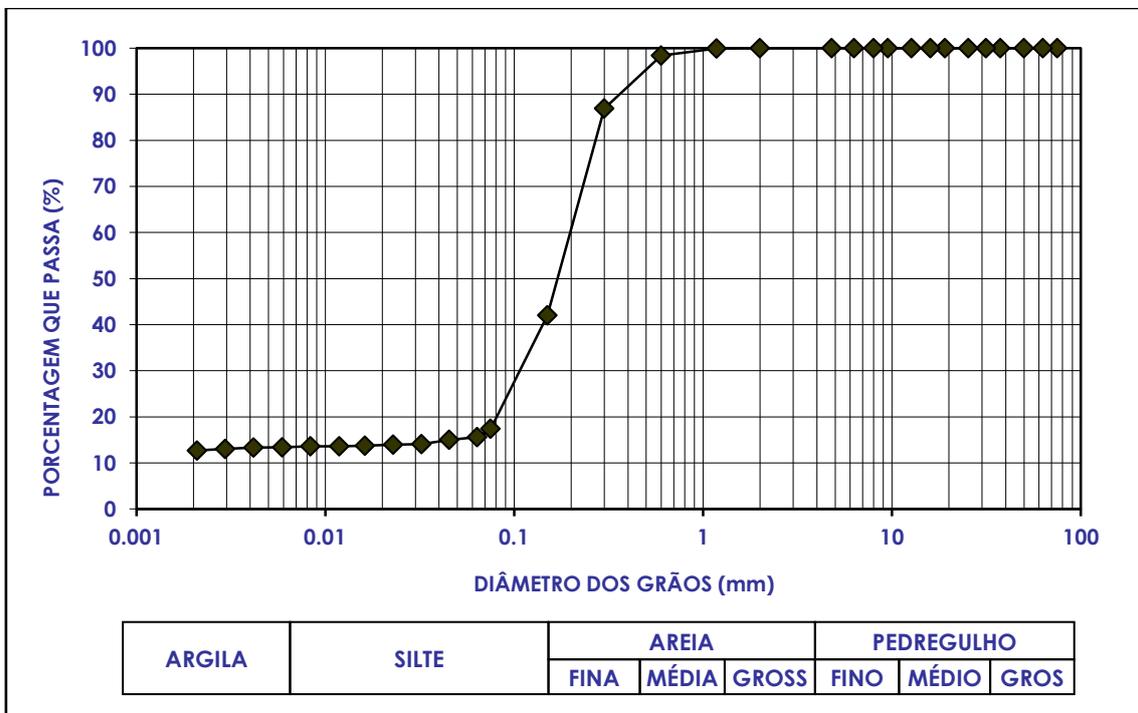


Figura 23 - Curva de distribuição granulométrica do local do Aracê, Ponto 1.

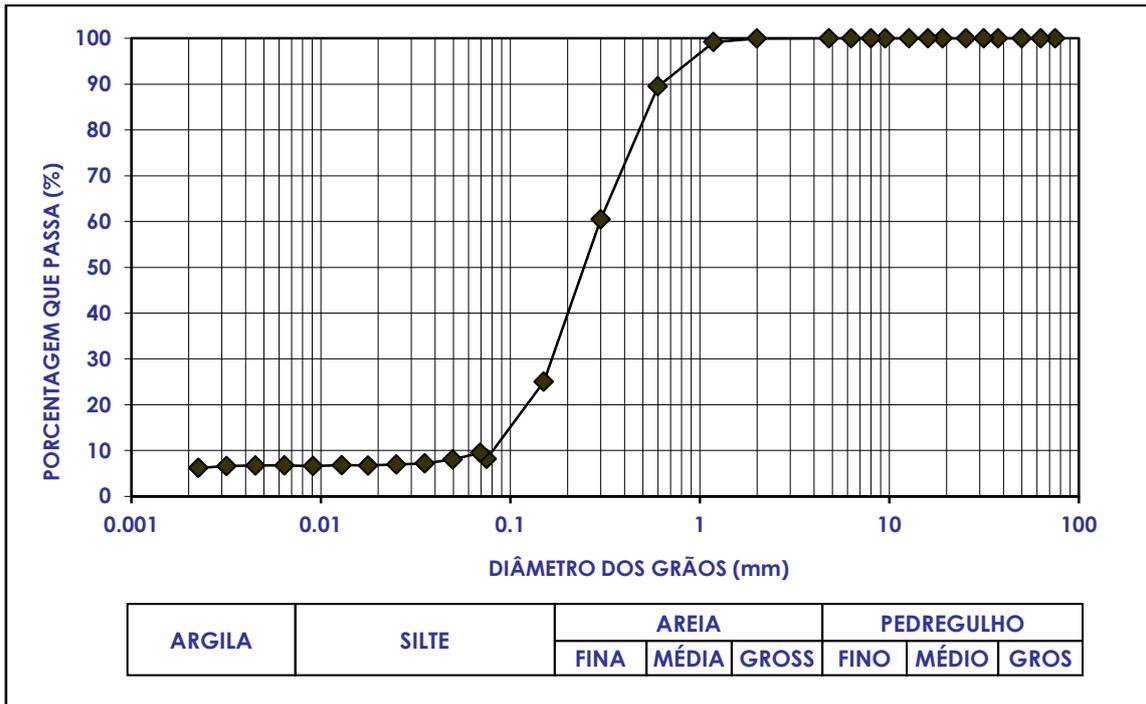


Figura 24 – Curva de distribuição granulométrica do local do Aracê, Ponto 2.

6.3 ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

6.3.1 Duplo anel

- LOCAL FÊNIX

O ensaio foi feito durante o período de tempo de 3h35min. Nos primeiros 10 minutos, as leituras foram feitas a cada 30 segundo; após essas leituras iniciais, o intervalo de leitura foi espaçado para 5 minutos. O gráfico da variação da taxa de infiltração com o tempo encontra-se na Figura 25.

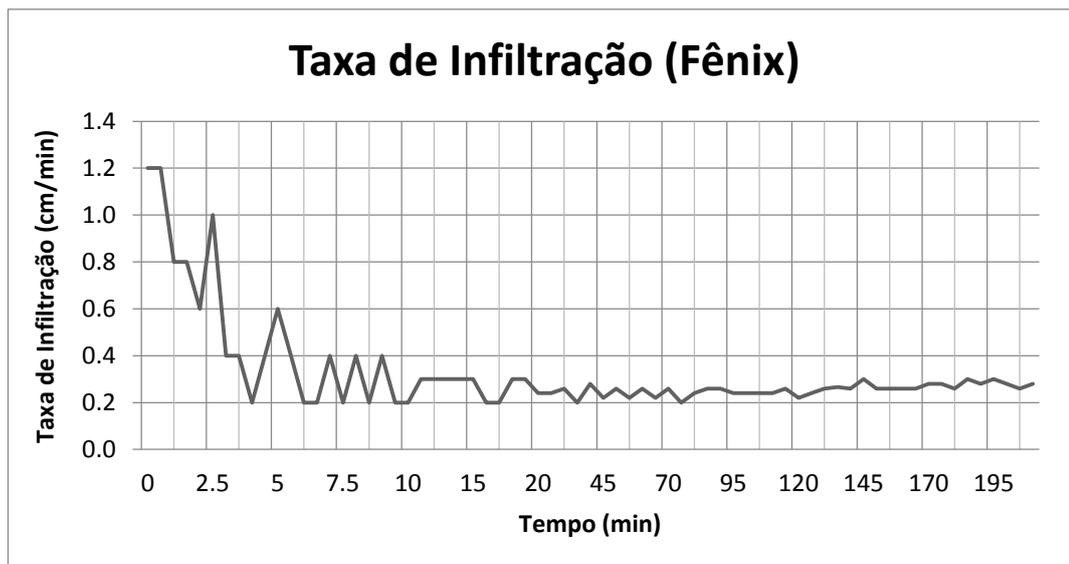


Figura 25 – Gráfico da taxa de infiltração no local Fênix a partir do ensaio de duplo anel.

Estes dados ao final uma taxa constante de infiltração de 0,28 cm/min, equivalente á 162 mm/h.

Foi medido o teor de umidade para amostras saturadas, no caso em questão foi aproveitado o ensaio de duplo anel que já havia sido realizado.

Foram coletadas, após o ensaio de duplo anel, com o auxílio de um trado, amostras do solo então saturado ocorrido pelo ensaio. Estas amostras foram recolhidas com profundidades espaçadas em 20 cm entre elas. A Tabela 15 apresenta os valores de umidade conforme a profundidade de cada tipo de amostra.

Tabela 15 - Valores obtidos no ensaio de teor de umidade em diferentes profundidades para o local Fênix.

Profundidade (cm)	Umidade solo in natura (%)	Umidade solo saturado (%)
Superfície	4,79	24,91
20	8,52	18,42
40	7,82	16,63
60	8,28	16,99
80	7,32	16,62
100	7,41	15,71
120	7,83	16,01
140	7,82	16,12
160	7,90	8,03
180	8,09	7,86
200	7,96	8,01

Resultando na Figura 26:

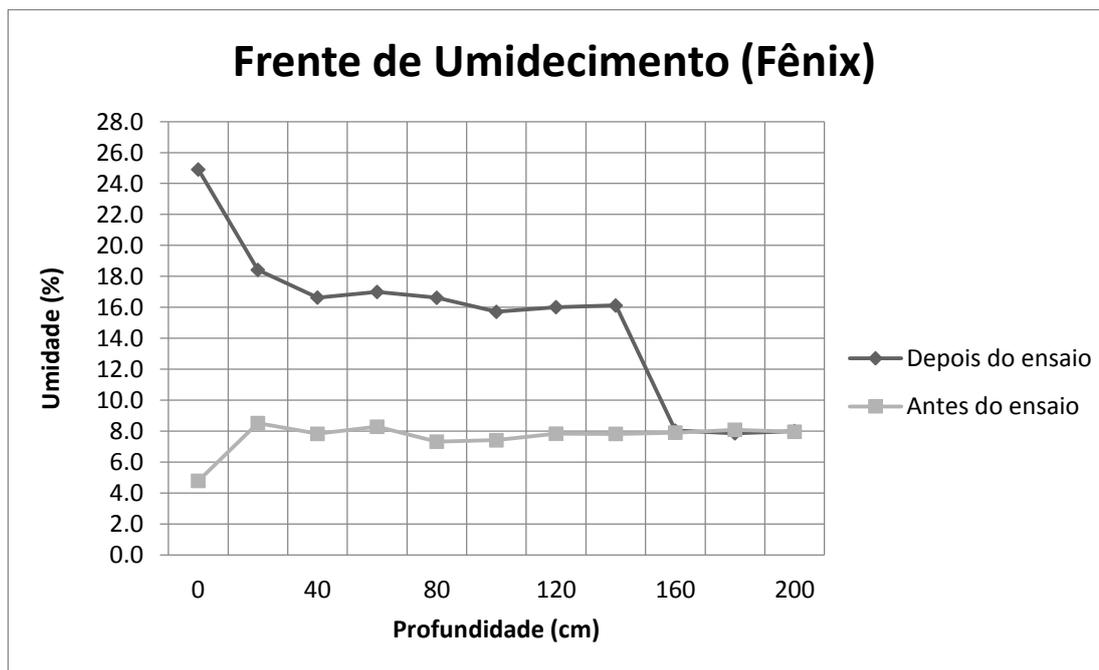


Figura 26 - Teor de Umidade em relação à profundidade no local Fênix.

Com a análise dos perfis construídos anteriormente é possível observar que a frente de umedecimento ocorre entre as profundidades 140cm e 160cm. Tira-se a média entre os dois e adota, portanto, o valor da profundidade da frente de umedecimento igual à 150cm.

Com todos os dados coletados até então, associados ao valor de 8 centímetros para altura da lâmina de água no anel interno durante o ensaio, é possível calcular a condutividade hídrica saturada (K_{fs}). O valor de condutividade hídrica saturada encontrada para o local foi de $4,4 \times 10^{-3}$ cm/s.

- LOCAL ARACÊ

O mesmo procedimento para o Fênix foi desenvolvido para o Ponto 2 do local do Aracê (Figura 27).

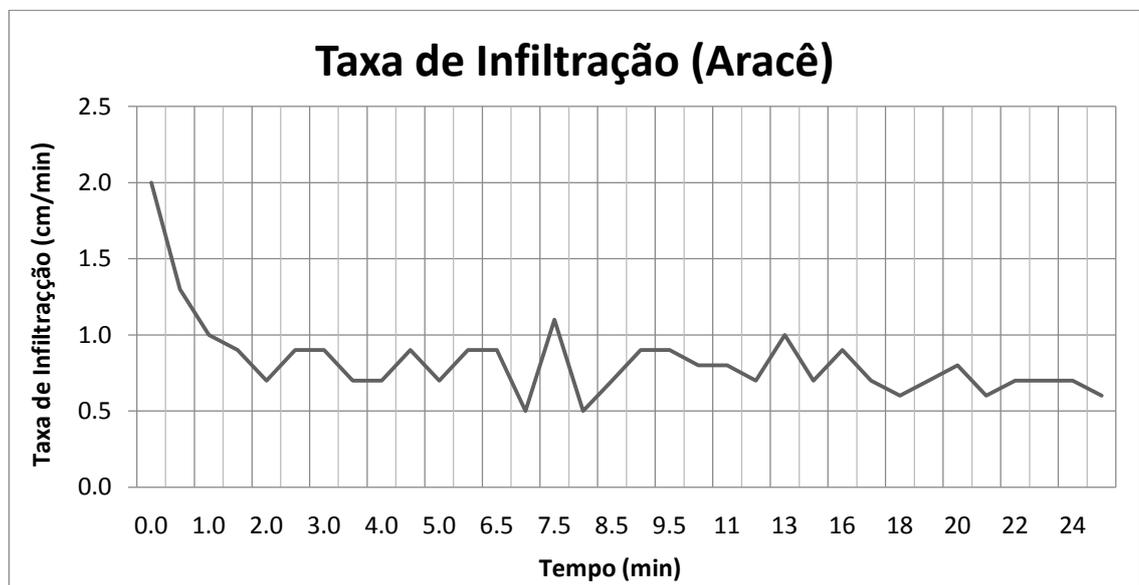


Figura 27 – Gráfico da taxa de infiltração no ponto 2 do local Aracê a partir do ensaio de duplo anel.

Durante o ensaio ocorreu problemas de falta de água, por isso o ele foi interrompido antes da estabilização da infiltração (três leituras de mesmo valor). Foi utilizado, portanto, o último valor do ensaio para análise, que representa 0,6 cm/min de infiltração, equivalente á 360mm/h.

Os dados de umidade encontrados para o solo antes e depois do ensaio se encontram na Tabela 16.

Tabela 16- Valores obtidos no ensaio de teor de umidade em diferentes profundidades para o local do Aracê.

Profundidade (cm)	Umidade solo in natura (%)	Umidade solo saturado (%)
Superfície	6,19	21,27
20	8,36	19,82
40	7,96	17,39
60	8,21	18,16
80	8,49	16,05
100	8,65	15,76
120	8,12	16,44
140	8,42	16,12
160	-	15,15
180	-	16,68
200	-	15,66
220	-	15,26
240	-	8,65

O gráfico dos resultados mostrados anteriormente se encontra na Figura 28:

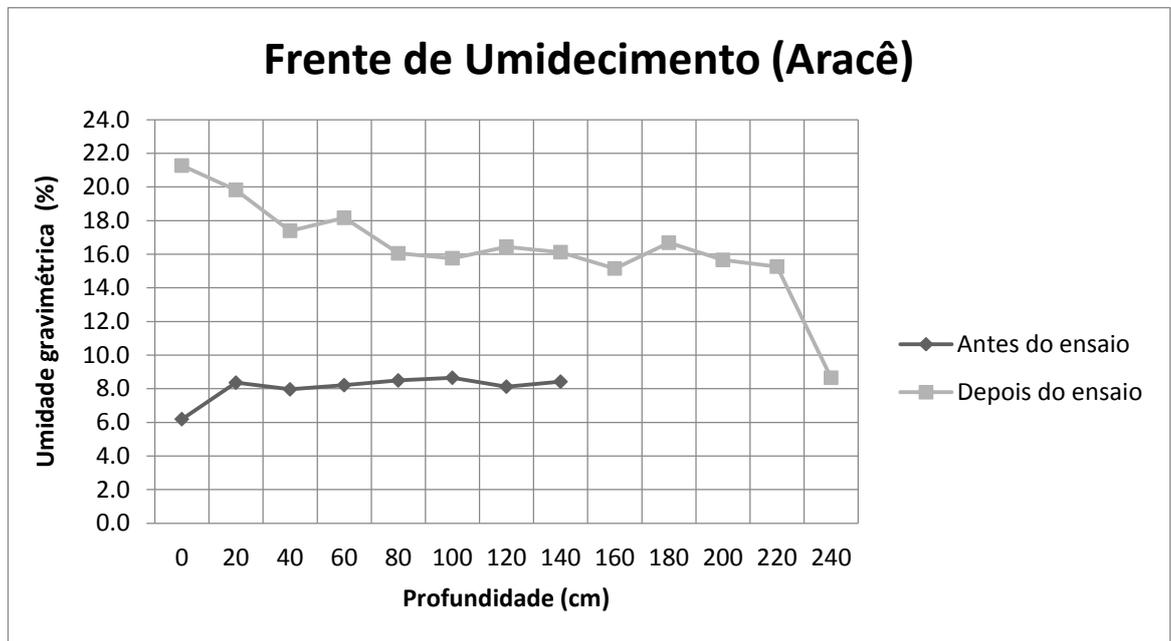


Figura 28- Teor de Umidade em relação à profundidade no local Aracê.

Considera-se que no gráfico de umidade do solo *in natura* a taxa de umidade continuaria constante, assim como aconteceu com as umidades desse caso entre as profundidades de 20 e 140 centímetros, pode-se considerar que foi alcançado o limite da

frente de umedecimento. Com uma média entre as profundidades, será considerado tal limite alcançado com 230 centímetros de profundidade. Ao final encontra-se para a amostra do Aracê, a partir dos cálculos necessários, o valor da condutividade hidráulica saturada de 0,02 cm/s.

Os valores deste ensaio se aparentam bastante elevados, porém isso pode ser explicado pelo fato de o ensaio ter sido realizado em uma área de plantação de eucalipto, que geram macroporosidades no solo e que interferem na infiltração.

6.3.2 Infiltração com o Permeâmetro de Guelph modificado

Antes do ensaio é necessário o conhecimento das dimensões do aparelho, encontrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Dimensões do aparelho de Guelph modificado.

Tubo acrílico	Tubo PVC	Espessura PVC	Área
8,47 cm	1,56 cm	0,37 cm	54,1 cm ²

Quando instalado em campo, o furo produzido para o ensaio é feito com um trado de raio de 3 centímetros, e para cada ensaio foram utilizadas duas alturas de cargas diferentes: 5cm e 10cm.

Um passo comum entre os ensaios dos dois pontos é encontrar os dois fatores de forma, necessários para a conta final. Para a carga hidráulica de 5 cm é encontrado o fator de forma de 0,85; enquanto para a carga hidráulica de 10cm este valor é de 1,3.

As taxas de infiltração para cada carga e para cada profundidade, quando repetidas em pelo menos três leituras consecutivas, são consideradas constantes e serão usadas para os cálculos do ensaio.

- LOCAL FÊNIX

As taxas constantes para o local Fênix se encontram na Tabela 18.

Tabela 18 - Taxas de infiltração obtidas pelo permeâmetro de Guelph Modificado no local Fênix.

Profundidade	20 cm		40 cm		60 cm	
Carga (cm)	5	10	5	10	5	10
Infiltração (cm/min)	0,50	5,00	1,75	2,00	2,00	2,50
Infiltração (cm/s)	0,008	0,083	0,029	0,033	0,033	0,042

Ao se aplicarem todos esses valores obtidos nas fórmulas de K_{fs} e ϕ_{Gm} obtêm-se os valores encontrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores dos parâmetros K_{fs} e ϕ_{Gm} do local Fênix.

Profundidade	20 cm		40 cm		60 cm	
Parâmetro	K_{SAT} (cm/s)	ϕ_{Gm} (cm ² /s)	K_{SAT} (cm/s)	ϕ_{Gm} (cm ² /s)	K_{SAT} (cm/s)	ϕ_{Gm} (cm ² /s)
Valor	$2,7 \times 10^{-2}$	-0,059	$4,9 \times 10^{-3}$	0,045	$7,5 \times 10^{-3}$	0,032

Nota-se o surgimento de um número negativo para o parâmetro ϕ_{Gm} e um valor bastante elevado para o parâmetro K_{SAT} para a profundidade de 20 centímetros. Esses valores ocorrem devido á diferença bastante grande entre a infiltração dos dois estágios (com 5 centímetros e com 10 centímetros de carga). Esta divergência pode ser explicada por algumas hipóteses: o solo da superfície (20 centímetros) se apresenta compactado ou até mesmo não representa o mesmo material estudado - isso pode ocorrer com algum transporte natural ou mesmo artificial de material mais arenoso para a superfície do local - outro problema pode ser simplesmente algum erro do operário no manuseio do equipamento.

Na literatura, diz-se que valores negativos para os parâmetros do método de Guelph feito em dois estágios diferentes são possíveis, e esses resultados são causados pela possível

heterogeneidade no meio, resultando em características de fluxo distintos entre um estágio e outro (SOTO *et al.*, 2009).

- LOCAL ARACÊ

Devido ao mesmo problema de escassez de água que ocorreu com o ensaio de Duplo anel, no ensaio de Guelph foi possível apenas realizar o procedimento com uma única profundidade, e não três profundidades diferentes como se fez no caso do local Fênix. Os resultados são encontrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Taxas de infiltração obtidas pelo permeâmetro Guelph Modificado no local Aracê.

Profundidade	40 cm	
Carga	5	10
Infiltração (cm/min)	1,6	2,6
Infiltração (cm/s)	0,027	0,043

Por fim, encontram-se os parâmetros contidos na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores dos parâmetros K_{SAT} e ϕ_{Gm} do local Aracê.

Profundidade	40 cm	
Parâmetro	K_{SAT} (cm/s)	ϕ_{Gm} (cm ² /s)
Valor (cm/s)	$9,0 \times 10^{-3}$	0,023

Por sua vez, os valores para o local do Aracê se mostram aparentemente adequados.

6.4 CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Foram coletados ao menos três cilindros de PVC contendo o material indeformado em seu interior para cada profundidade de 0,5m; 1,0m e 1,5m.

Como já se comentou, foi utilizado o programa “Soil Water Retention Curve”, desenvolvido na ESALQ para a obtenção dos parâmetros necessários. Como resultado o programa forneceu os valores dos parâmetros encontrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores dos parâmetros das curvas de retenção dos solos.

	Profundidade (m)	θ_r	θ_s	α	m	n
FÊNIX	0,5	0,013	0,189	0,400	0,311	1,451
	1,0	0,015	0,227	0,175	0,723	3,611
	1,5	0,011	0,248	0,170	0,622	2,645
ARACÊ	0,5	0,023	0,220	0,170	0,620	2,628
	1,0	0,010	0,238	0,219	0,800	4,998
	1,5	0,011	0,247	0,203	0,776	3,455

Os gráficos contidos da Figura 29 até a Figura 34 são das curvas de retenção de água nos solos a partir dos parâmetros obtidos.

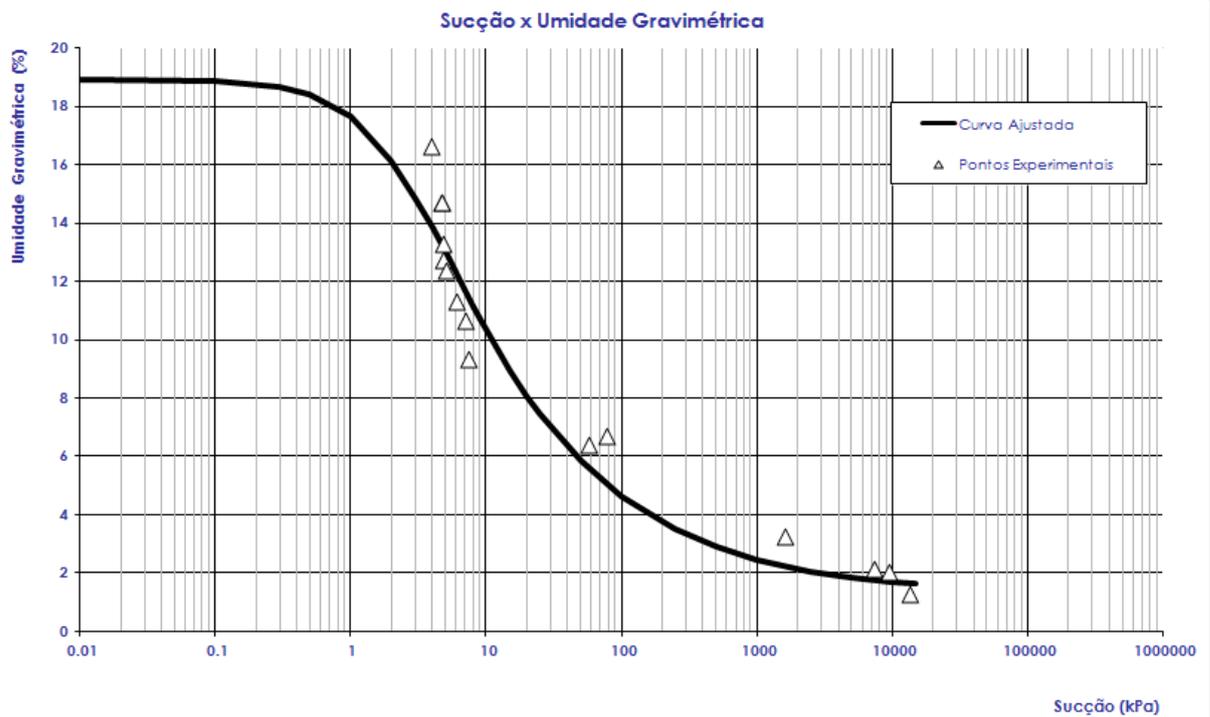


Figura 29 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 0,5m.

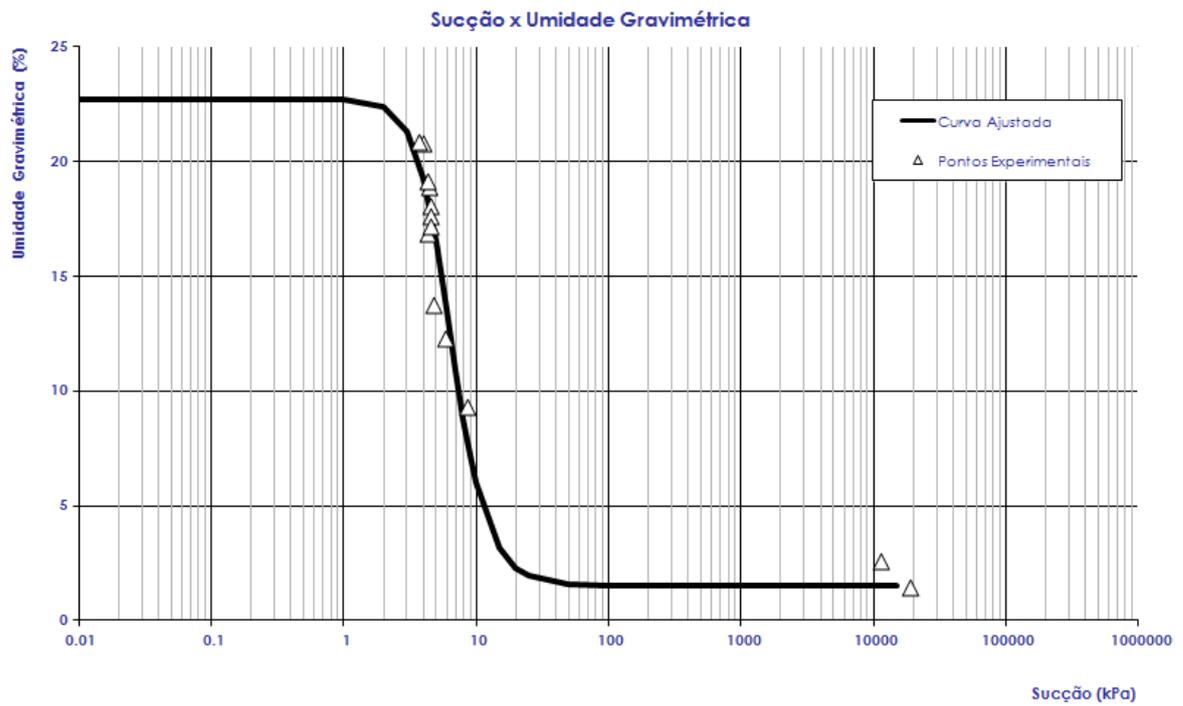


Figura 30 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 1,0m.

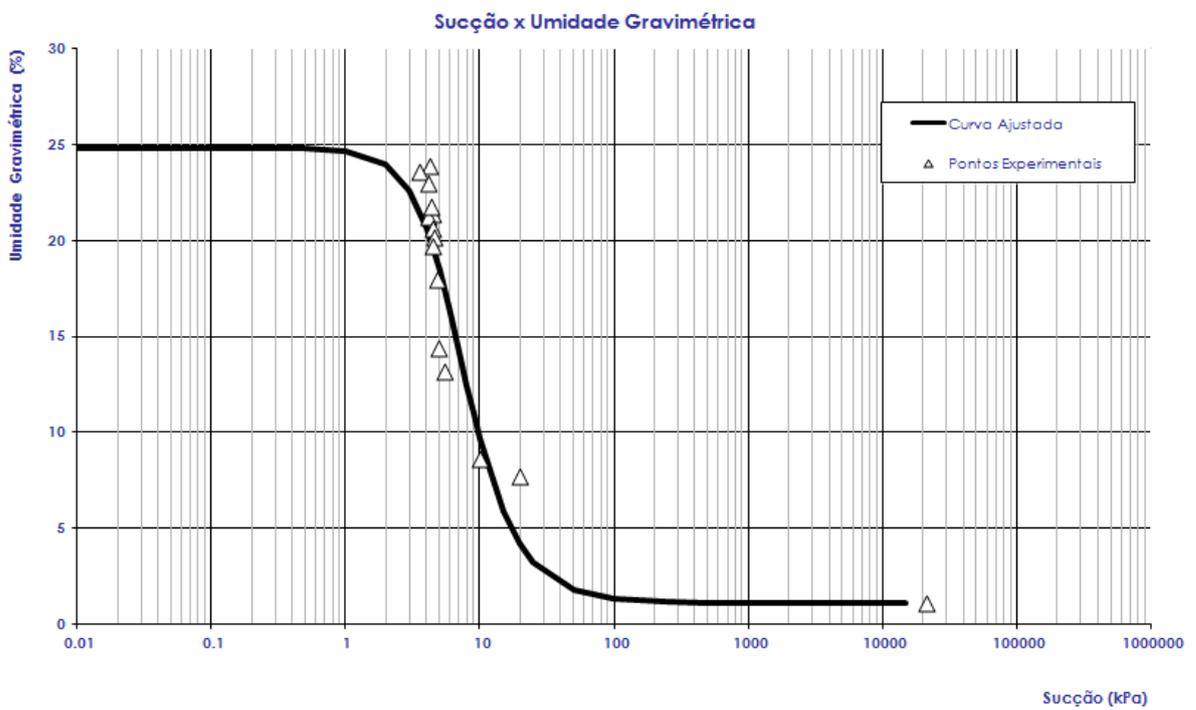


Figura 31 - Curva de retenção de água no solo do local Fênix, profundidade de 1,5m.

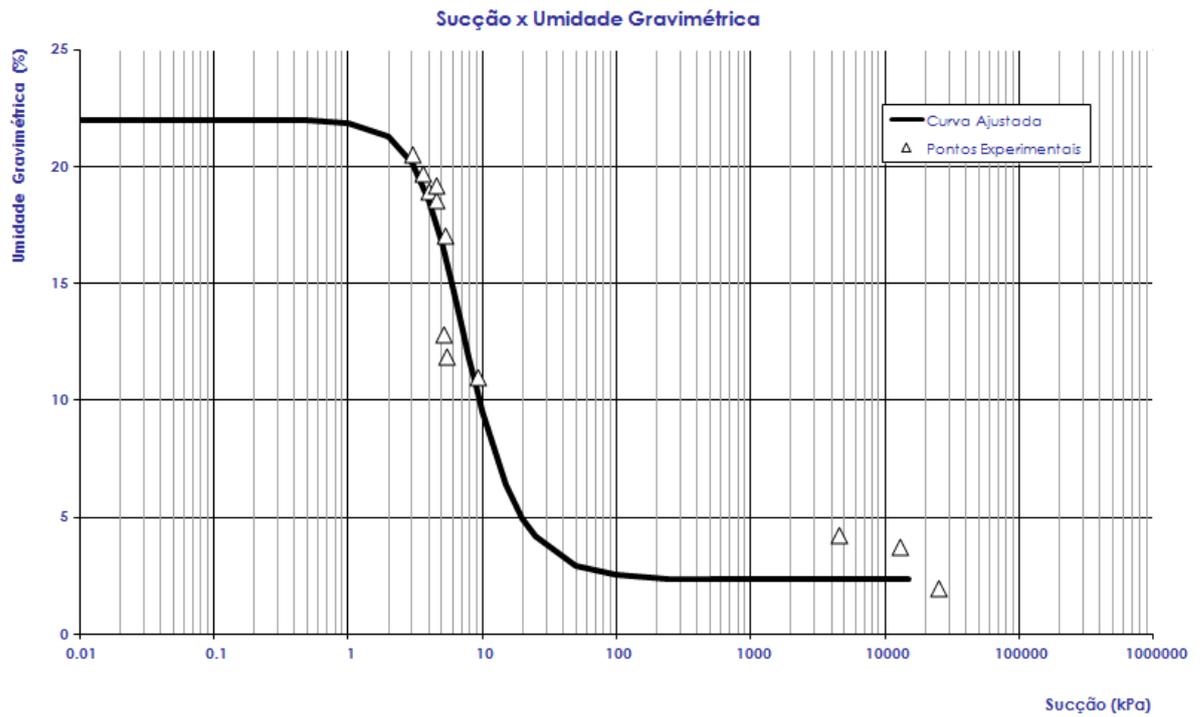


Figura 32 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 1, profundidade de 0,5m.

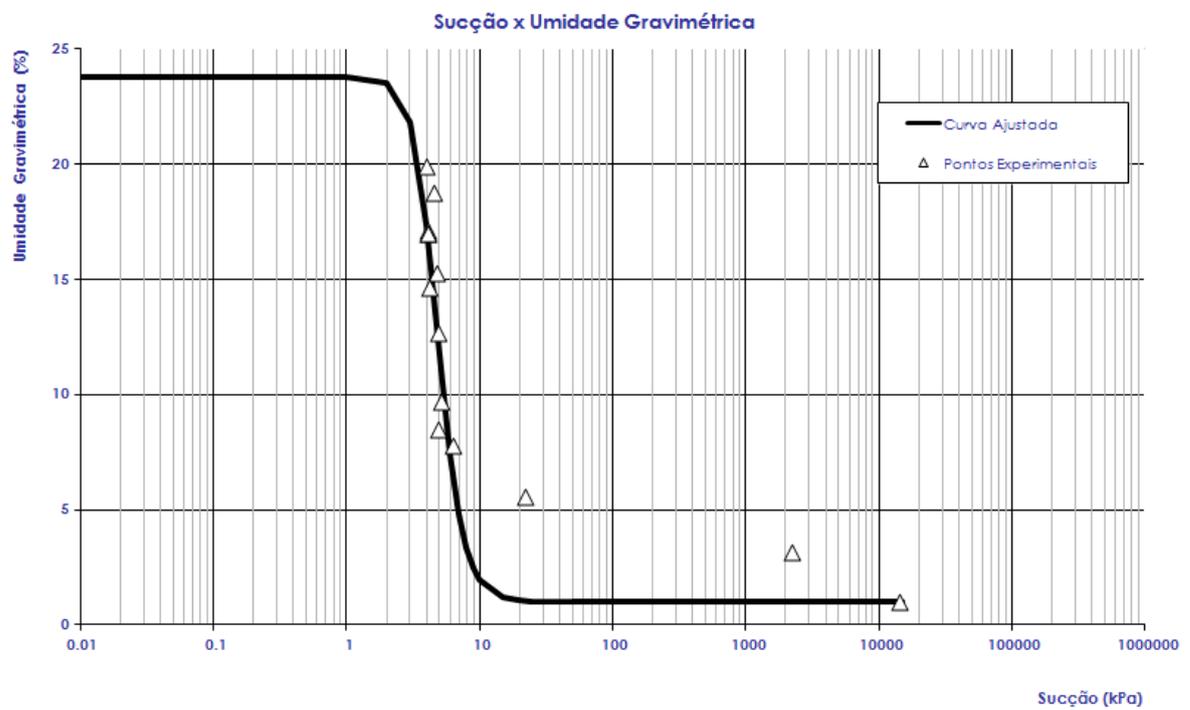


Figura 33 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 2, profundidade de 1,0m

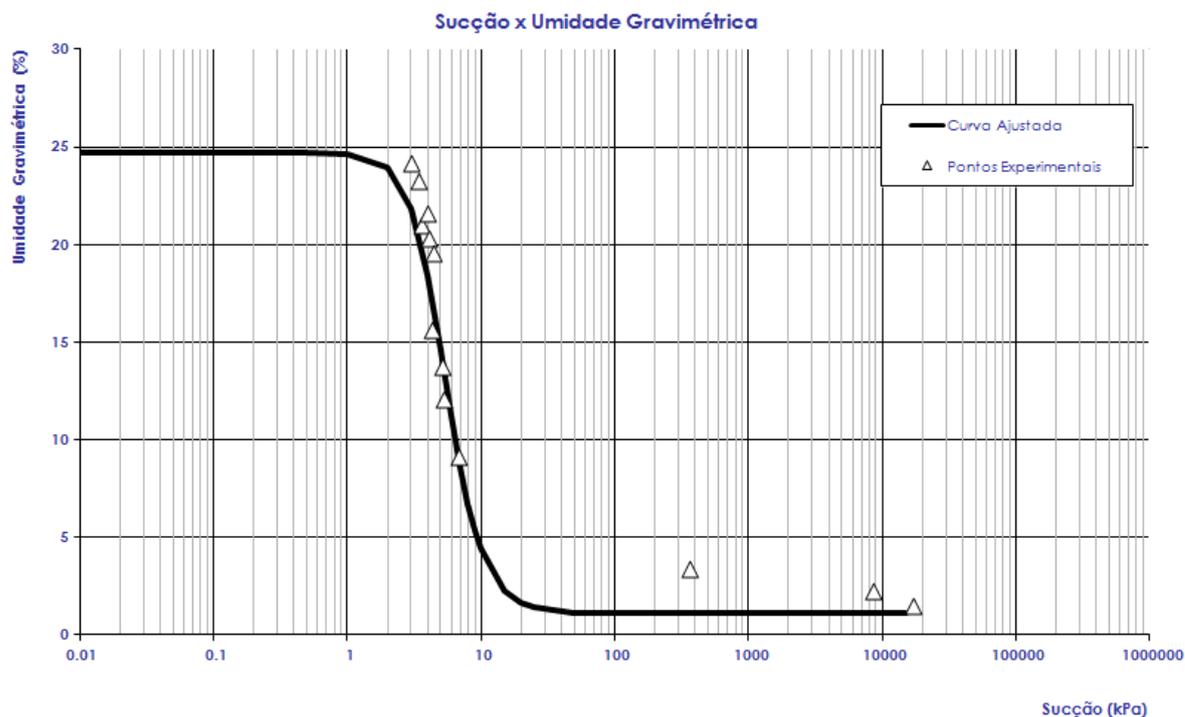


Figura 34 - Curva de retenção de água no solo do local Aracê, ponto 1, profundidade de 1,5m.

Infelizmente a maioria das curvas de retenção não apresenta um traçado de acordo com o esperado devido á falta de alguns pontos no gráfico; estas curvas se encontram extremamente acentuadas, o que também pode dificultar a correlação desses gráficos com os dados dos tensiômetros. Para evitar este problema, decidiu-se utilizar somente a curva de 0,5 metros do local Fênix para todos os perfis no momento de realizar o monitoramento das duas regiões, pois ela foi a única com inclinação adequada para o estudo.

Para ajudar na visualização de todos os dados, foi feito, nas seguintes tabelas, uma junção de todos os valores obtidos durante o estudo até o momento.

Na Tabela 23 está a síntese de todos os valores da local Fênix.

Tabela 23 - Resumo dos dados do Fênix.

	Profundidade	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Sr (%)	ρ_s (g/cm ³)
Índices Físicos	0,5	1,90	1,76	0,52	0,34	0,42	2,68 g/cm ³
	1,0	1,56	1,42	0,89	0,47	0,30	
	1,5	1,56	1,44	0,87	0,46	0,27	
Granulometria	Material	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
	%	1,5	1,1	14,4	46,5	10,0	26,5
Curva de Retenção	Profundidade	0,5		1,0		1,5	
	θ_r	0,013		0,015		0,011	
	θ_s	0,189		0,227		0,248	
	α	0,400		0,175		0,170	
	m	0,311		0,723		0,622	
	n	1,451		3,611		2,645	
Guelph	Profundidade	20		40		60	
	K_{SAT} (cm/s)	$2,7 \times 10^{-2}$		$4,9 \times 10^{-3}$		$7,5 \times 10^{-3}$	
	ϕ_{Gm} (cm ² /s)	-0,059		0,045		0,032	
Duplo anel	Infiltração			Kfs			
		0,28 cm/min				$4,43 \times 10^{-3}$ cm/s	

Por sua vez, na Tabela 24 está o resumo de todos os dados obtidos pelos dois pontos do local Aracê.

Tabela 24 - Resumo dos dados do Ponto 1 do local Aracê.

	Profundidade	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Sr (%)	ρ_d (g/cm ³)
Índices Físicos	0,5	1,49	1,37	0,94	0,48	0,25	2,66 g/cm ³
	1,0	1,56	1,44	0,85	0,46	0,27	
	1,5	1,65	1,52	0,75	0,43	0,31	
Granulometria	Material	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
	%	0,0	6,7	42,3	16,3	9,8	24,9
Curva de Retenção	Profundidade	0,5	1,0	1,5			
	θ_r	0,023	0,010	0,011			
	θ_s	0,220	0,238	0,247			
	α	0,170	0,219	0,203			
	m	0,620	0,800	0,776			
	n	2,628	4,998	3,455			
Guelph	Profundidade	40					
	K_{SAT} (cm/s)	$9,0 \times 10^{-3}$					
	ϕ_{Gm} (cm ² /s)	0,023					
Duplo anel	Infiltração	Kfs					
	0,6 cm/min	0,02 cm/s					

Analisando as duas tabelas, pode-se observar que no geral a caracterização dos dois solos é bastante similar, porém que existem divergências nos valores para os índices físicos á 0,5 metros da superfície. Isso, como discutido anteriormente, pode ser explicado por algumas hipóteses: O material mais próximo da superfície no local Fênix pode apresentar grande compactação ou até mesmo apresentar solo diferente decorrente de algum tipo de transporte de material proveniente de outro local.

6.5 DADOS DE CHUVAS

Para o monitoramento das precipitações da água nessas áreas, foram utilizados os valores coletados durante o período de 01/01/2009 à 30/02/2010 para ambas as regiões, obtidos no estudo do Fagundes (2009) (FAGUNDES, 2009).

Na Figura 35 e na Figura 36 estão as quantificações das chuvas mensais para ambas as localizações.

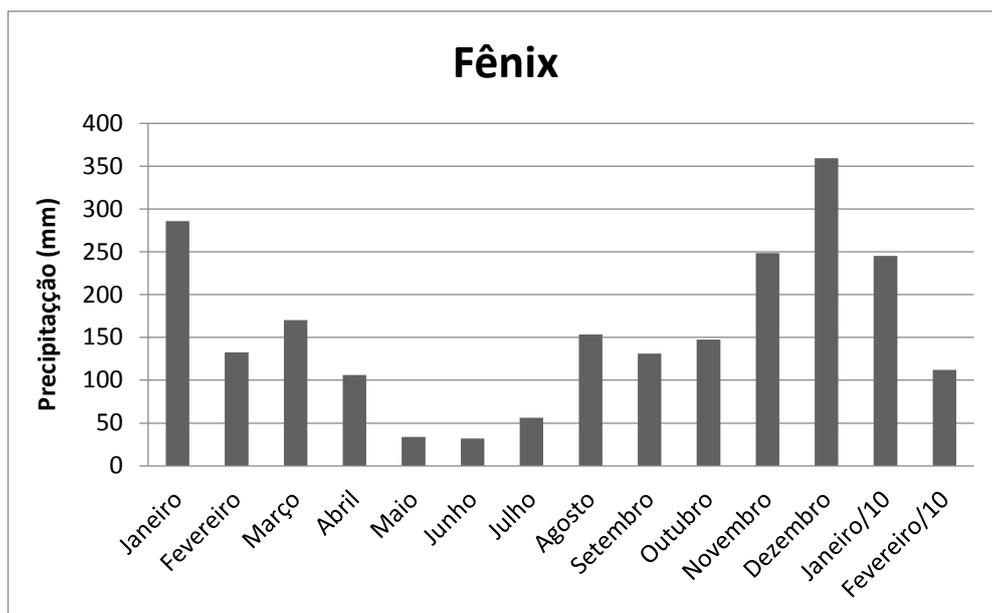


Figura 35 - Precipitações mensais no local Fênix.

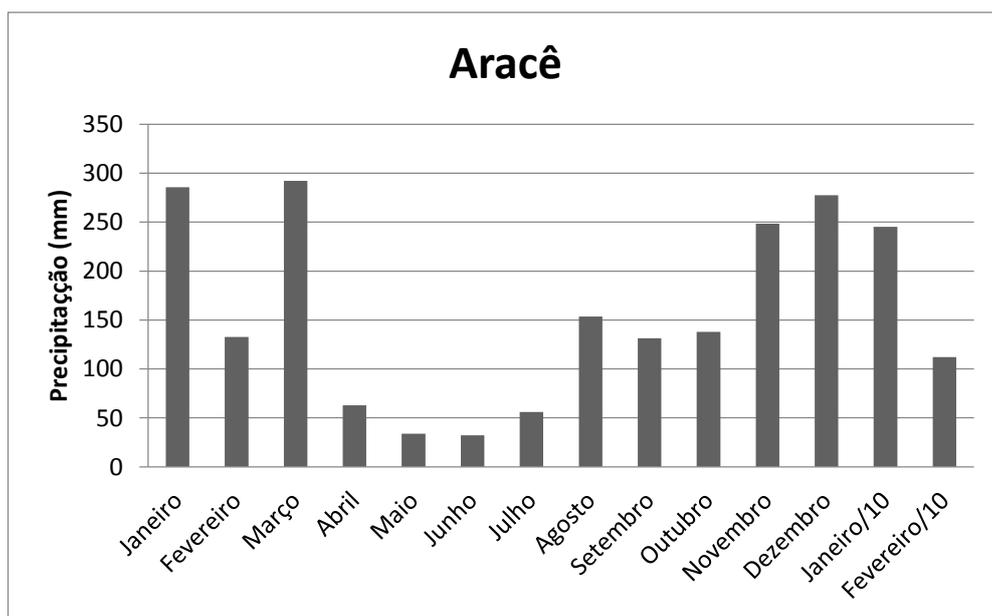


Figura 36 - Precipitações mensais no local Aracê.

Na Tabela 25 e na Tabela 26 estão os valores diários de precipitações de ambas as regiões, já na Tabela 27, encontram-se os valores diários de precipitações dos meses de janeiro e fevereiro do ano de 2010, esses dados foram utilizados comumente tanto para o local Fênix quanto para o local Aracê.

Tabela 25 - Precipitações diárias no ano de 2009 na área do Fênix (valores em mm). (FAGUNDES, 2009)

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	12,10			-	-	0,40	-					
2	34,50	9,32	9,32	-								0,59
3	24,19	7,73	7,73				0,79					22,80
4	6,74	1,39	1,39	0,40					10,71		1,19	25,98
5				1,98	0,20						27,17	
6				0,59					10,71	0,20	3,17	18,24
7									0,20	47,39	29,15	39,86
8		4,76	4,76						30,93	1,19	6,94	3,77
9	6,94	1,59	1,59						27,96		9,72	16,66
10	2,97	0,20	0,20		3,17	0,59			1,78			
11		2,78	2,78		0,20	4,96	6,54				0,40	0,40
12		27,17	27,17	2,78		6,15				9,52		13,48
13		9,72	9,72	57,90								2,97
14	26,57	7,54	7,54	42,44	19,24				3,97			11,50
15	4,56	38,07	38,07		8,13					0,99	17,85	21,61
16	19,83	0,79	0,79								0,59	23,60
17	12,89											6,35
18	1,59							7,14		7,73		0,40
19	0,40							59,09	3,17	18,44		
20	13,48							57,71	0,20		0,20	12,49
21		12,10	12,10					1,59	19,83		12,89	20,62
22									0,40	16,46	0,20	
23							6,94	27,56	21,02		40,25	
24		7,34	7,34				20,42	0,40	0,20		1,19	0,40
25	43,03	1,98	1,98			1,39	20,23					
26	13,88	0,20	0,20			4,36	0,59			45,41	0,40	1,78
27	11,70					14,08	0,40				26,57	2,78
28	35,30				0,99	0,20			0,20		39,07	7,73
29	11,10	-	3,37								31,33	91,22
30	3,97	-	34,31				0,20				0,20	8,73
31		-		-	1,78	-			-		-	5,35
TOTAL	285,75	132,66	170,34	106,09	33,71	32,12	56,12	153,48	131,27	147,34	248,47	359,32

Tabela 26 - Precipitações diárias no ano de 2009 na área do Aracê (valores em mm) (FAGUNDES, 2009).

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	12,10					0,40						
2	34,50	9,32										0,59
3	21,22	7,73					0,79					22,80
4	9,72	1,39	5,95	0,40					10,71		1,19	25,98
5				1,98	0,20						24,79	
6				0,59					10,71	0,20	5,55	10,91
7									0,20	47,39	27,56	47,00
8		4,76							27,76	1,19	8,53	3,77
9	6,94	0,40	14,08						31,13		9,72	16,86
10	2,97	1,39	4,56		3,17	0,59			1,78			
11		2,78	85,07		0,20	4,96	6,54				0,40	0,20
12		27,17	0,40	2,78		6,15						13,68
13		9,72	77,14	49,58								2,97
14	26,57	7,54		7,54	19,04				3,97			11,50
15	4,36	35,69	22,41		8,33					0,99	17,85	21,42
16	20,03	3,17	0,20								0,59	23,80
17	12,69											6,15
18	1,78							6,74		7,54		0,59
19	0,40		1,59					57,51	3,17	18,64		
20	13,48		0,20					59,29	0,20		0,20	12,49
21		12,10	17,25					1,98	19,83		11,70	20,62
22			0,20						0,40	16,46	1,39	
23			0,79				6,94	27,56	21,02		38,27	
24		7,34					18,44	0,40	0,20		3,17	0,20
25	42,83	1,98				1,39	22,21					0,20
26	14,08	0,20				4,16	0,59			45,41	0,40	1,78
27	7,73					14,08	0,40				26,57	2,78
28	39,26		24,59		0,99	0,40			0,20		37,88	7,73
29	11,10	-	3,37								32,52	7,73
30	3,97	-	34,31				0,20				0,20	7,93
31		-		-	1,78	-			-		-	7,73
TOTAL	285,75	132,66	292,10	62,86	33,71	32,12	56,12	153,48	131,27	137,82	248,47	277,42

**Tabela 27 - Precipitações diárias nos meses de janeiro e fevereiro de 2010 (valores em mm)
(FAGUNDES, 2009).**

	Janeiro/2010	Fevereiro/2010
1		1,39
2	12,29	
3		
4		5,95
5		
6	12,69	
7	46,4	
8	4,16	
9	0,79	
10		
11		2,78
12		
13		
14	3,57	
15	8,73	
16	10,91	0,79
17	0,59	3,57
18		2,58
19	3,57	3,57
20	1,19	1,59
21	25,58	
22	4,56	
23		
24	0,4	4,56
25	1,78	0,4
26	9,72	
27	0,79	17,25
28	20,23	67,82
29	61,08	-
30	12,49	-
31	3,57	-
TOTAL	245,09	112,25

6.6 POÇOS DE MONITORAMENTO

Com os valores dos poços de monitoramento utilizados para o estudo, foi elaborado o gráfico da Figura 38 (Apêndices). Tal gráfico avalia a variação da altura dos níveis d'água para cada poço de monitoramento isoladamente. Essa variação não leva em consideração a cota topográfica em que os poços de monitoramento se encontram.

É possível notar, pela Figura 38, a presença de quatro faixas de tempo com comportamentos bastante definidos:

Primeira faixa: Período entre 15 de janeiro ao final do mês de junho de 2009, quando se observa uma decaída nos valores de níveis d'água da maioria dos poços de monitoramento.

Segunda faixa: Período entre junho até final de novembro de 2009, em que se observa que os valores dos níveis d'água sobem suavemente.

Terceira faixa: É nítido que nesta faixa, entre novembro de 2009 e junho de 2010, na maioria dos poços de monitoramento, os valores de níveis d'água sofrem uma queda considerável.

Quarta faixa: Os níveis d'água monitorados pelos poços entre aproximadamente 10 de julho de 2010 até o final do estudo voltam a apresentar um aumento em seus valores.

6.7 DADOS DOS TENSIÔMETROS

Foram utilizados para o monitoramento da infiltração da água conforme as profundidades em estudo (profundidades de 0,5m; de 1,0m e de 1,5m), os valores de tensiômetros em mmHg referentes aos valores coletados durante o período de 17 de fevereiro de 2009 a 3 de fevereiro/2010 para ambas as regiões.

6.8 CORRELAÇÃO ENTRE CURVA DE UMIDADE GRAVIMÉTICA DO SOLO E PLUVIÓGRAFOS

Com a equação da curva de retenção de água no solo e os valores dos tensiômetros para cada local, foi feita então a correlação entre estes dados para encontrar qual é a umidade do solo a cada dia e a cada profundidade. Espera-se que tal monitoramento mostre uma possível frente de umidade que ocorre das profundidades menores para as maiores.

Alcança-se então o objetivo principal do estudo, que é a obtenção do monitoramento das umidades contidas no solo e as precipitações encontradas durante o período de tempo estabelecido. Esses monitoramentos se encontram nos gráficos contidos entre a Figura 39 e a Figura 44 (Apêndices).

- LOCAL FÊNIX

Inicia-se a avaliação do monitoramento do local Fênix, pelo período de 1 de janeiro a 30 de junho de 2009, ilustrado pela Figura 39, quando, a princípio, observa-se uma tendência de certa constância nos valores de umidade. Porém, entre os dias 23 a 29 de maio de 2009, ocorre uma queda nítida nesses valores, principalmente quando analisada a taxa de umidade gravimétrica de profundidade 0,5 metros. Isso ocorre, pois, até a data 14 de abril de 2009, as chuvas são intensas e constantes, seguidas por uma redução brusca nas taxas de precipitação que dura até dia 9 de maio de 2009, resultando então na queda dos valores de umidade. Logo após este período, houve um retorno aos níveis de umidade anteriores que ocorreram provavelmente pelas chuvas dos dias 10 a 15 de maio de 2009.

Durante o período de 30 de julho a 31 de outubro de 2009 (Figura 40), os valores de umidades gravimétricas nos solos iniciam-se por um acréscimo no nível de umidade, passando novamente por um declínio. Esta subida no gráfico pode ser explicada pelas chuvas dos dias 23 ao dia 27 de julho de 2009. Devido ao considerável período sem leituras nos tensiômetros observa-se apenas a subida desses valores na profundidade de 1,5 metros, sugerindo que a água precipitada já tivesse sido infiltrada nas camadas de solo superiores.

Por fim, no período de 17 de outubro ao dia 6 de novembro de 2009 (Figura 40 e Figura 41), nota-se que correu um pico nas taxas de umidade gravimétrica para as três camadas estudadas simultaneamente, com valor maior para a profundidade de 0,5 metros e menor para a profundidade de 1,5 metros. Isso ocorre devido ao processo natural de perda de água no solo: a evapotranspiração. Este pico talvez tenha ocorrido principalmente pela forte chuva que ocorreu no dia 7 de outubro de 2009. O resto do período se mostra consideravelmente constante.

- LOCAL ARACÊ

Na Figura 42, representante do monitoramento ocorrido entre 1º de fevereiro a 30 de junho de 2009 no local Aracê, é interessante resaltar dois eventos: o primeiro entre o dia 9 de março a dia 14 de abril de 2009, e o outro do dia 15 de abril até 9 de maio de 2009. Estes intervalos representam períodos de bastante precipitação e outra de seca, respectivamente, refletindo no perfil da umidade do solo: No período de fortes chuvas as taxas de umidade apresentam, no geral, valores altos; enquanto que, após esse período, nota-se uma nítida queda nesses valores decorrente do respectivo período sem chuva.

No período transcorrido entre os dias 30 de junho e dia 31 de outubro de 2009 (Figura 43), observa-se uma tendência de aumento, de forma generalizada, nas taxas de umidade gravimétrica do solo, com picos de umidade condizentes com as chuvas, o que ocorre, por exemplo, nos picos do dia 6 e 28 de agosto de 2009, que foram precedidos justamente por dias bastante chuvosos (23 a 27 de junho e 18 a 23 de agosto de 2009, respectivamente). Outro evento interessante é a queda simultânea nas taxas de umidade gravimétrica das três profundidades distintas no dia 15 de outubro de 2009, justificada pelo período sem chuva entre 24 de setembro e 6 de outubro de 2009.

Analisando o pico generalizado dos índices de umidade gravimétrica ocorrido no dia 28 de outubro de 2009 (Figura 43 e Figura 44), sendo a variação da umidade para a profundidade 0,5 metros bastante maior que a variação de umidade da profundidade de 1,5 metros, nota-se que parcela da água precipitada atinge profundidades maiores do solo local, mostrando que parte desta água infiltrada pode resultar em uma recarga do aquífero.

6.9 CORRELAÇÃO ENTRE POÇOS DE MONITORAMENTO E PLUVIÓGRAFOS

Levando em consideração a separação do gráfico dos poços de monitoramento em quatro faixas (tópico 6.6) foi feito o cálculo de precipitação diária média, separadamente, para os mesmos intervalos de tempo utilizados para tais faixas (Tabela 28).

Tabela 28 - Precipitação diária média dividida em períodos.

Precipitação média (mm/dia)		
Período 1	Período 2	Período 3
5,06	4,15	7,13

Onde o Período 1 corresponde ao intervalo entre os dias 15 de janeiro a 31 de maio de 2009, o Período 2, entre os dias 1 de junho a 30 de novembro de 2009 e o Período 3, entre os dias 1º de novembro de 2009 a 28 de fevereiro de 2010.

Considera-se que em média, portanto, as chuvas do Período 1 foram moderadas, as do Período 2 de baixa intensidade, e as chuvas do Período 3 de forte intensidade.

Feitas essas análises, é possível correlacionar os períodos de chuva com as faixas dos poços de monitoramento: O Período 1 (chuvas moderadas) foi refletido na Faixa 2 (ascensão nos níveis d'água); o Período 2 (chuvas fracas) refletido na Faixa 3 (decréscimo nos níveis d'água) e, finalmente, o Período 3 (chuvas fortes) refletiu-se na Faixa 3 (novamente ascensão nos níveis d'água).

Pode-se notar, portanto, que existe um nítido reflexo das precipitações da região com as variações dos níveis d'água constatados pelos poços de monitoramento.

7 CONCLUSÕES

A primeira constatação que pode ser feita em relação ao estudo é de que, com a comparação entre as características geológicas dos locais de estudo, pode-se observar que estes apresentam solos muito similares. Tanto os índices físicos quanto a granulometria e as de curva de retenção mostram referir-se a solos arenosos.

Os ensaios de infiltração foram importantes para a determinação das condutividades hidráulicas, que apresentaram variações de valores para condição saturada entre $4,9 \times 10^{-3}$ e $2,7 \times 10^{-2}$ cm/s com os ensaios de Guelph modificado, e de valores de 2×10^{-2} e $4,3 \times 10^{-3}$ cm/s com os ensaios de Duplo Anel para os locais Aracê e Fênix, respectivamente.

Os dados de monitoramento dos pluviógrafos e dos poços de monitoramento da região estudada apresentam resultados bastante confiáveis, enquanto os valores de tensiômetros dependem de certos fatores, principalmente do leitorista e da frequência em que esses dados são coletados.

Os resultados do monitoramento, em conjunto com os obtidos nos outros ensaios, permitem uma boa análise do comportamento das águas na região estudada.

Como conclusão final, analisando todos os dados obtidos, pode-se dizer que os ensaios em campo, em laboratório e de monitoramento mostram concordância entre eles. Graças ao grande teor de vazios e de porosidade, por exemplo, espera-se uma alta taxa de infiltração do solo no local, comprovado com os ensaios feitos em campo, o que pode ser refletido também no monitoramento das chuvas em conjunto com a umidade de água no solo a diferentes profundidades conforme o tempo.

Com todos os dados obtidos no estudo pode-se concluir que, pelo comportamento observado da água na região, é bastante provável que a região norte da cidade de São Carlos (SP) seja uma área de recarga de água subterrânea do aquífero Guaraní.

8 BIBLIOGRAFIA

BRANDÃO, V. S.; CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. v.1. 120 p. Viçosa: Editora UFV, 2006.

CETESB. **Relatório de Qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2001-2003**. São Paulo, p.137. 2004.

CETESB. **Relatório de Qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2004-2006**. São Paulo, p.138. 2007.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. **A low cost method of assessing clay desiccation for low buildings**. In: Proceeding of the Institution of Civil Engineers. 2v. p.82-89. 1992.

CUSTODIO, E. **Aquifer overexplotation: what does it mean?** Hydrogeology Journal [S,I.], v. 10, n. 2, p. 254-278, 2002.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K., BACHI, O. O.; LOPES, P. P. **Programa computacional para modelagem da curva de retenção da água no solo**. Versão 3.00 beta. Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” – ESALQ, 2003.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aquífero Guarani**, 2004. Disponível em <<http://www.cnpma.EMBRAPA.br/projetos/index.php3?sec=guara>>. Acesso em 13/06/2014.

USGS – United States Geological Survey **The Water Cycle**. Disponível em <<http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em 14/06/2014.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. 397p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FREITAS NETO, O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 178f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada.** 2008. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GOUVÊA, T. H. **Análise da Influência da Precipitação e de Características do Solo na Variação do Nível d'Água em Área de Recarga do Aquífero Guarani.** 2009. 142f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GREEN, W.H., AMPT, G.A. **Studies on soil physics: Flow of air and water through soils.** Journal of Agricultural Science, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

HEALY, R.; COOK, P. **Using groundwater levels to estimate recharge.** Hydrogeology Journal [S.I.], v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002.

KOOREVAOR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of soil physics. Developments in Soil Science.** Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V, 1983.

LERNER, D. N; ISSAR, A.S.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge.** Hannover: IAH, 1990.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** 1. Ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção com o método do papel filtro.** In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Anais X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Funções. Foz do Iguaçu, PR, v.2, p.515-522. 1994.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de Água Subterrânea em Área Urbana: Aspectos Quantitativos.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MEDEIROS, A. T.; **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba, CE.** Piracicaba, 103p, 2002.

NISHYAMA, L.; ZUQUETTE, L. V. **Importância da Cartografia Geotécnica Para Caracterização de Vulnerabilidade de Aquíferos Livres: Exemplo do Aquífero Botucatu na Quadrícula de São Carlos – SP.** Geociências (São Paulo) [S.I.], v. 13, n. 2, p. 345-357, 1994.

PERUCHI, F. **Evapotranspiração real a partir de medidas lisimétricas e sob diferentes condições de disponibilidade hídrica.** 2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RAWLS, W.J.; DAVID, G.; van MULLEN, J.A.; WARD, T.J. **Infiltration.** In: ASCE. Hydrology handbook. 2. Ed. New York: [s.n.], P.75-124. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 28). 1996.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 4.ed. Campinas: Fundação Cargill, 466p. 1985.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2.ed. Piracicaba: USP/ESALQ – Departamento de Física e Meteorologia, 505p, 1996.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C; **Solos, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações.** 2. Ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. **Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the “Guelph Permeameter”.** Proceedings, National Water Association Conference on Characterization and Monitoring of Vadose (Unsaturated) Zone, Denver, Colorado-EUA, 25p. 1985.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. **Infiltração e armazenamento no solo.** In: TUCCI, C.E.M Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade. ABRH, P.335-72, 2000.

SOILMOISTURE. **Guelph Permeameter operating instructions.** Soilmoisture Equipment Corp., 2005.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. **Análise do método permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada.** Águas subterrâneas. v.23, n.01, p.137-152, 2009.

THORNTHWAITE, C. W. **Na approach toward a rational classification of climate.** Geophysical Review. v.38, p.55-94, 1948.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos- SP.** (1967). 78 f. (Concurso de monografias) – Prefeitura Municipal de São Carlos, São Carlos, 1967.

VAN GUENUCHTEN, M. T. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** Soil Sci Soc Am J [S.I.], v. 44, n. 5, p. 892-898, September 1, 1980.

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B.; PEJON, O. J. **Initial assessment of the infiltration and overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer).** State of São Paulo, Brazil. Environmental Geology [S.I.], v. 50, n. 3, p. 371-387, 2006.

APÊNDICES

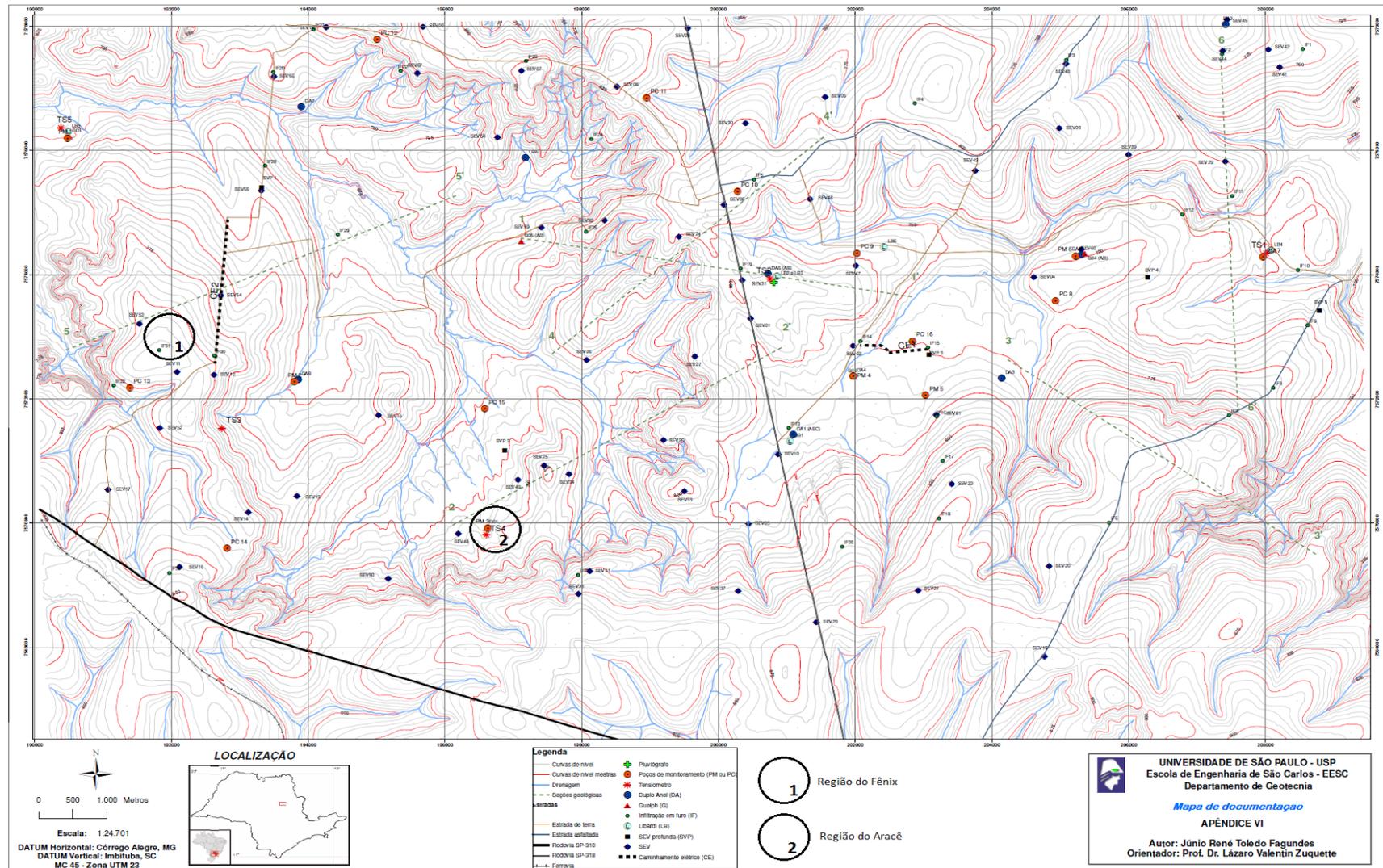


Figura 37 - Localização e documentação da área de estudo (Fonte: Modificado de Fagundes, 2010).

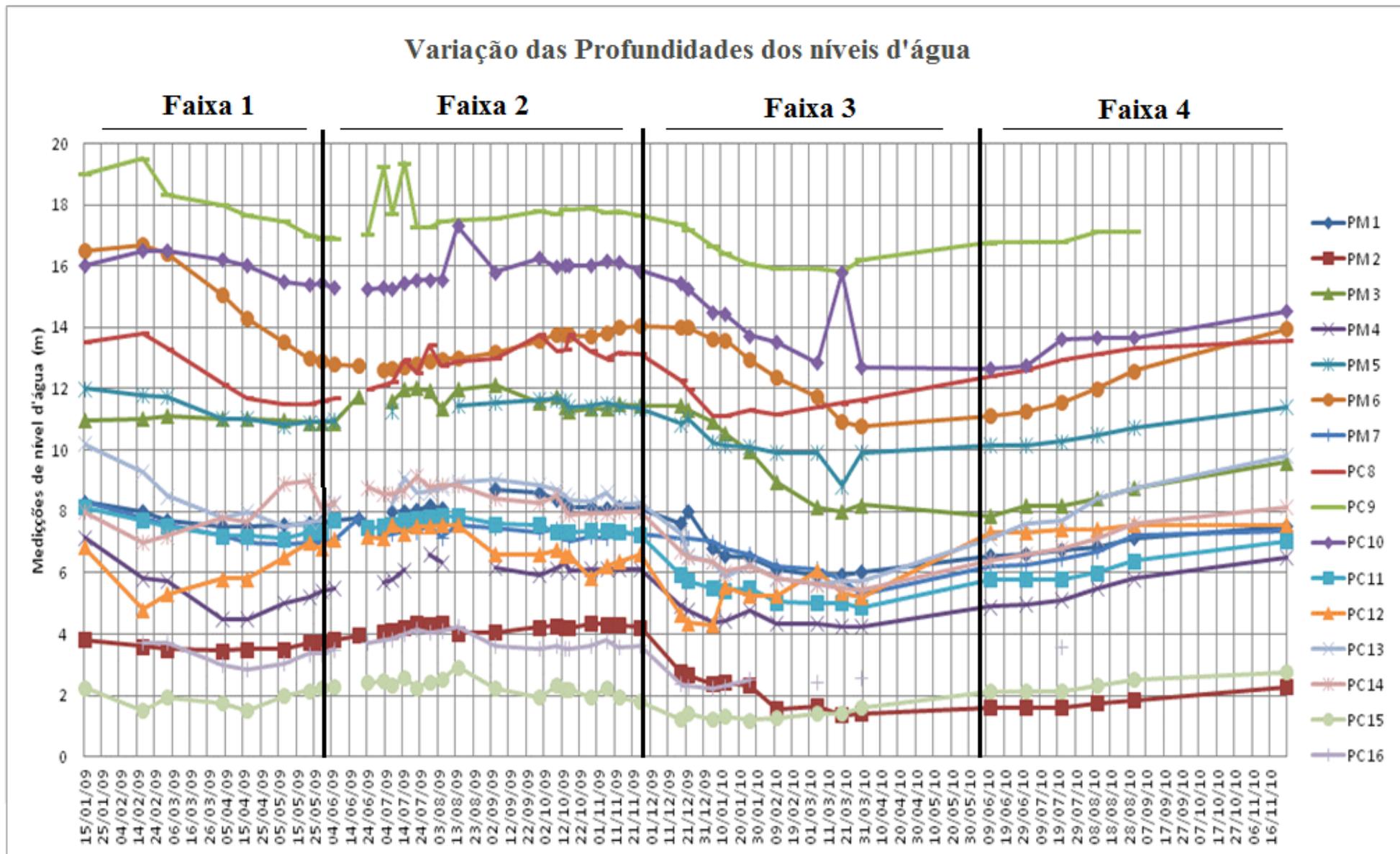


Figura 38- Diferença de nível da região saturada em várias localizações nos anos de 2009 e 2010, calculados a partir de poços de monitoramento.

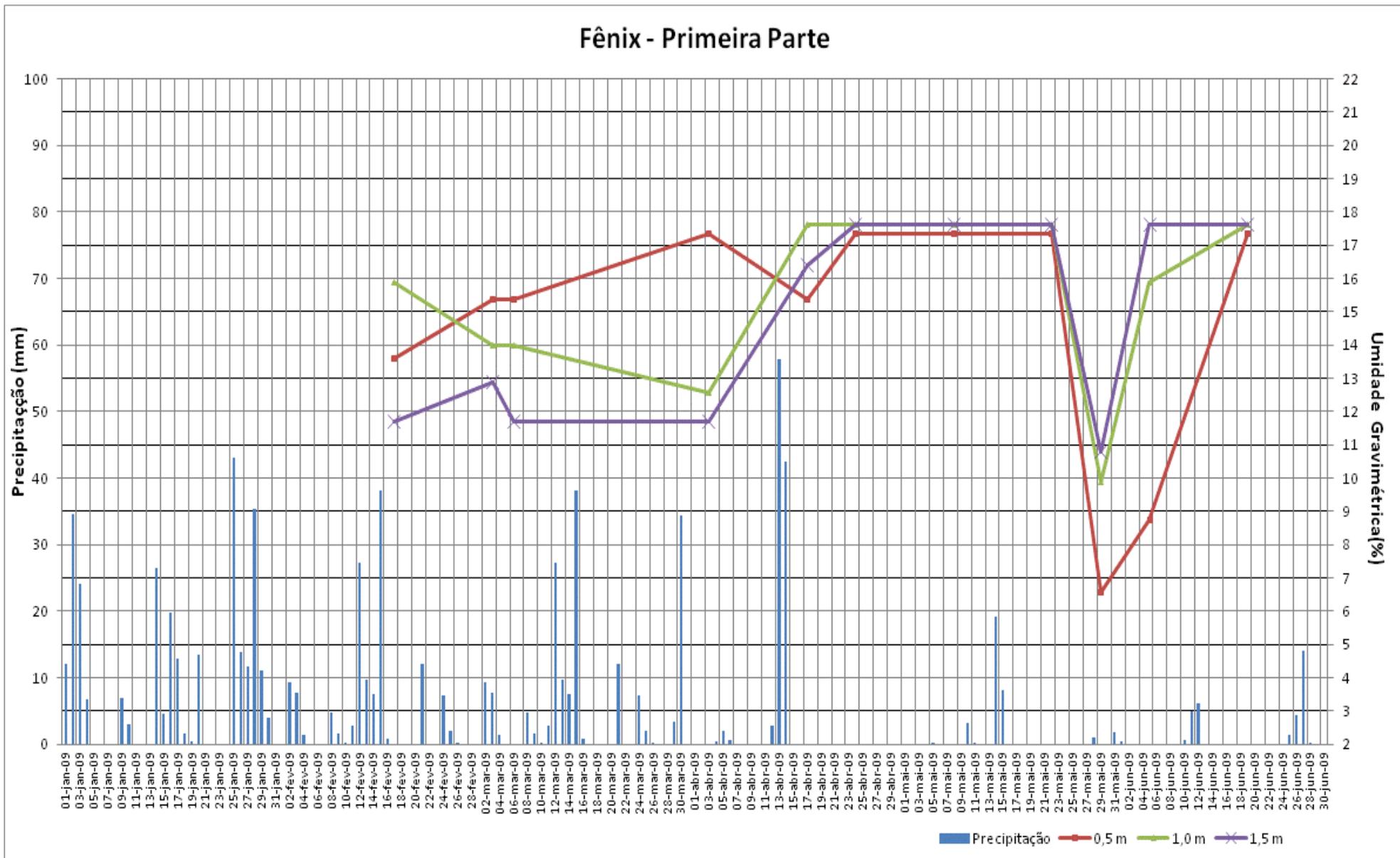


Figura 39 – Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Primeira parte do local Fênix.

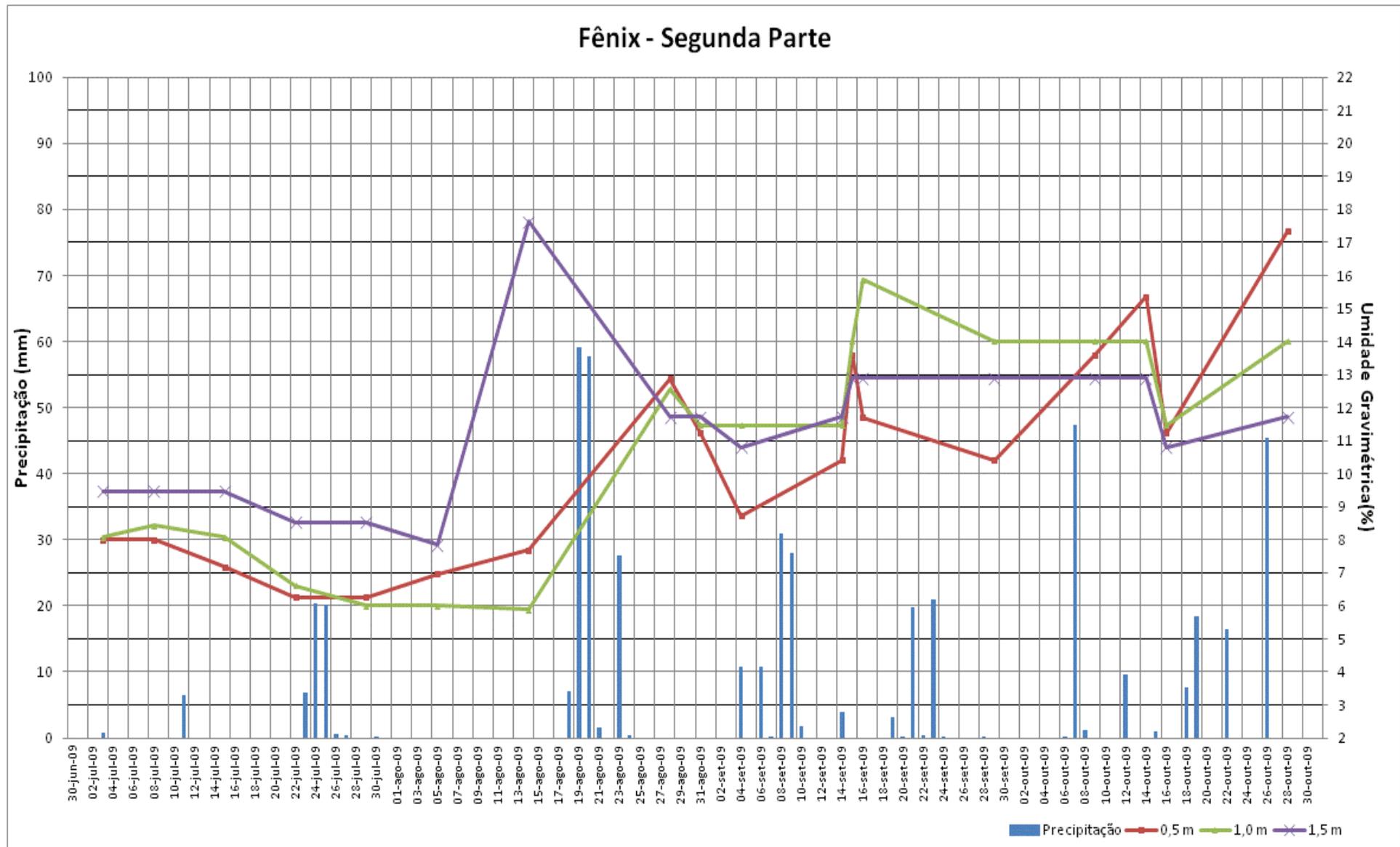


Figura 40 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Segunda parte do local Fênix.

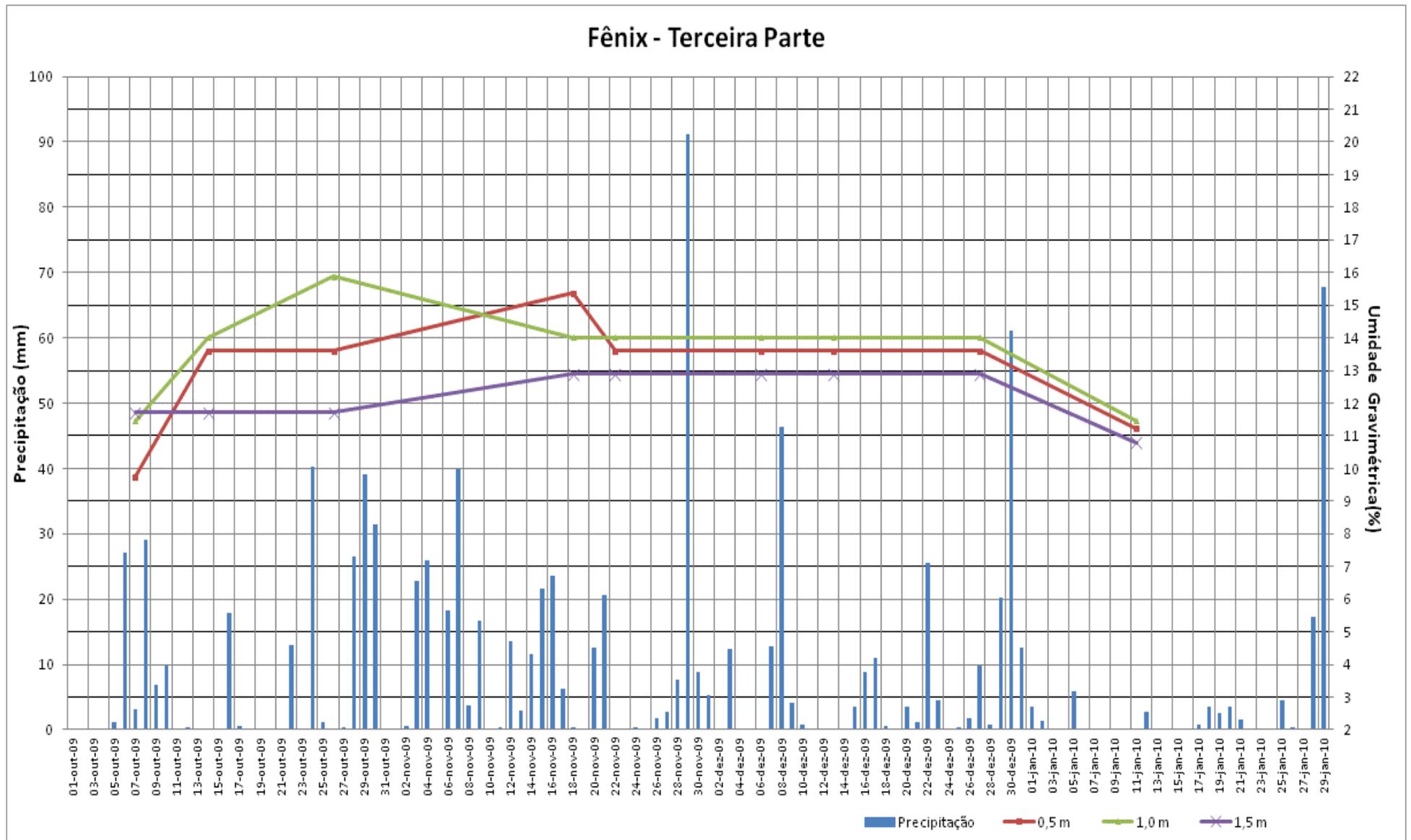


Figura 41 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Terceira parte do local Fênix.

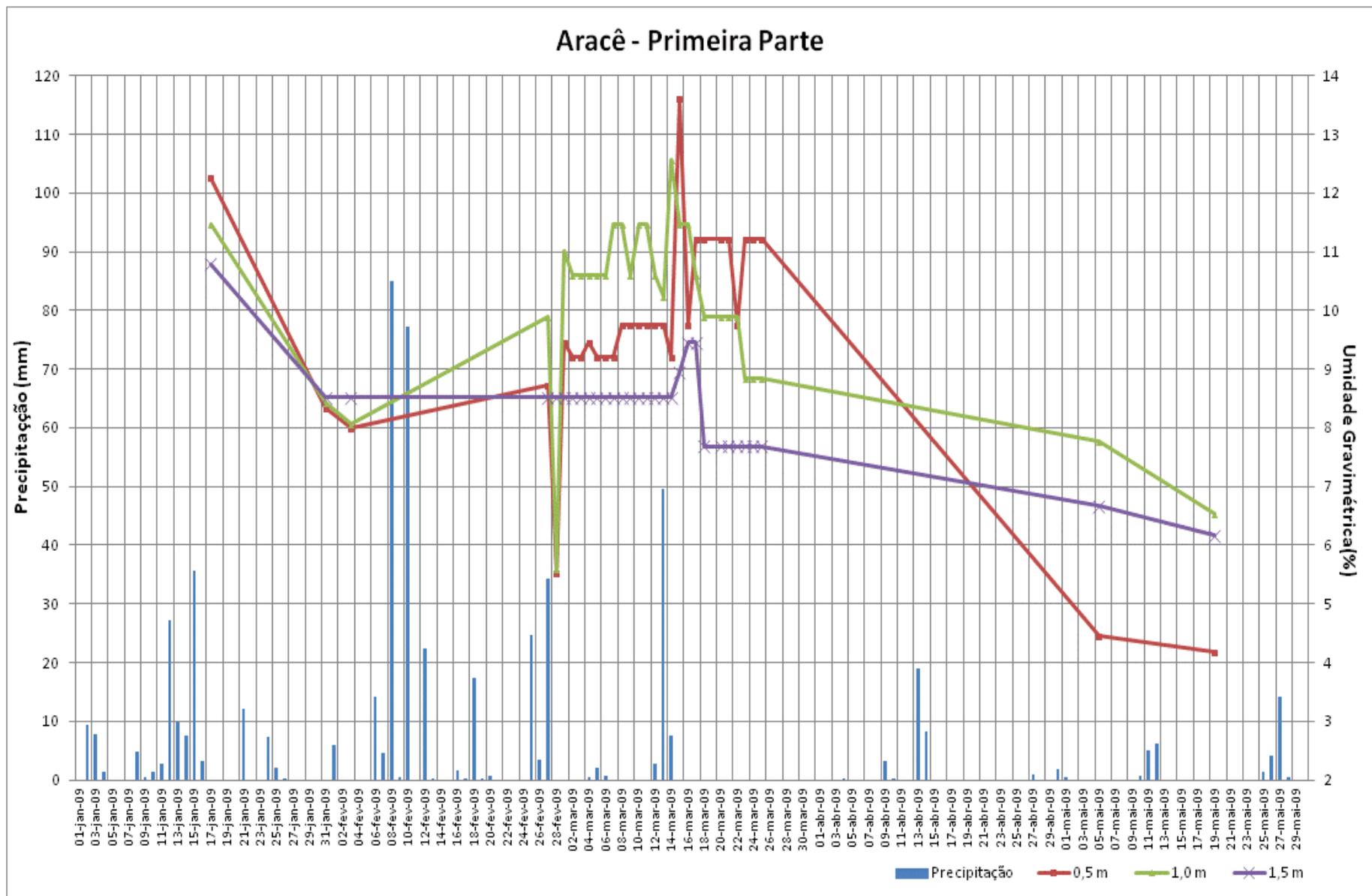


Figura 42 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Primeira parte do local Aracê.

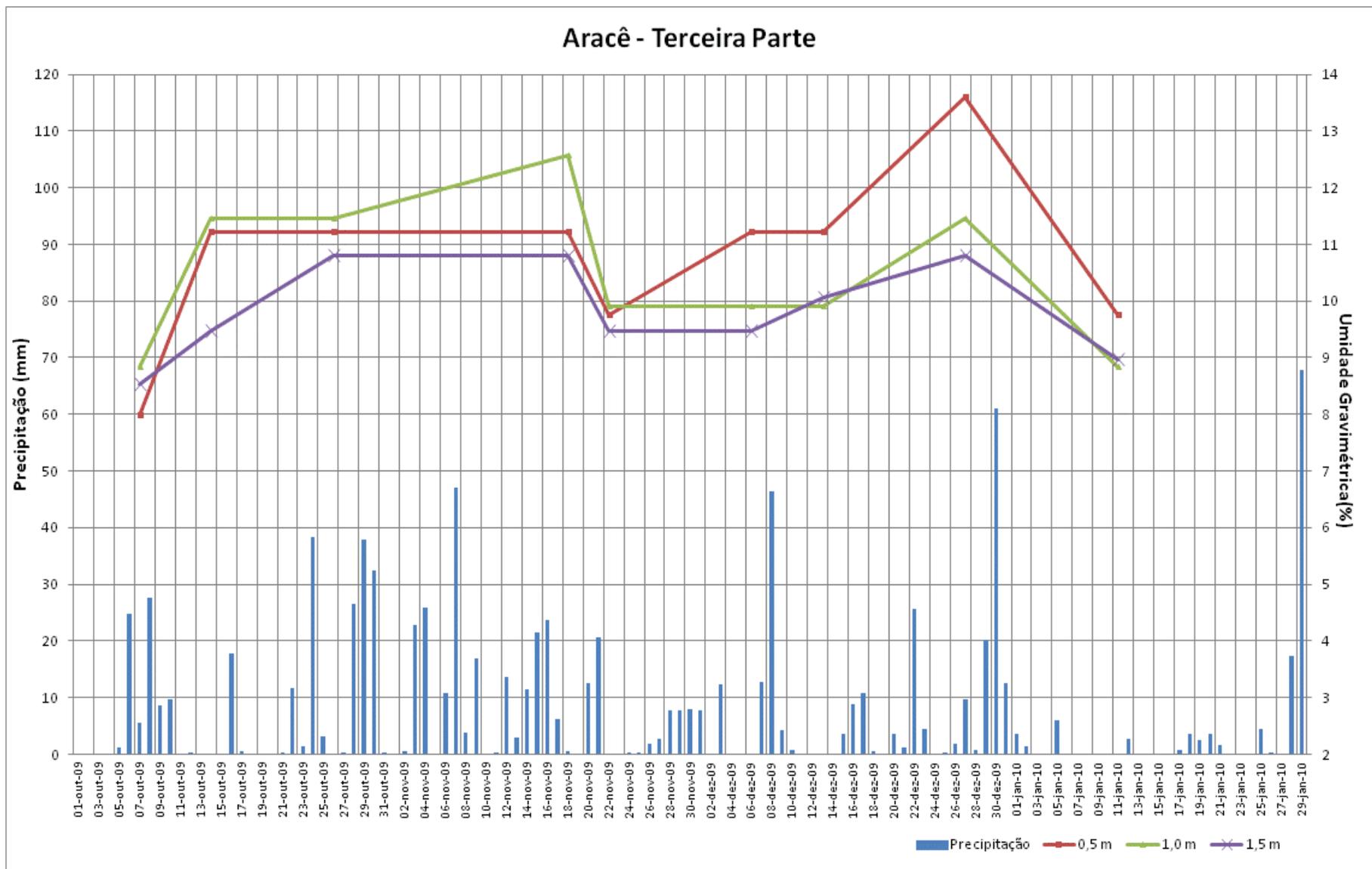


Figura 44 - Correlação entre os dados de umidade do solo com as precipitações – Terceira parte do local Aracê.